

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 8(39)
Частина II**

Кропивницький • 2023

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 8(39)
Part II**

Kropyvnytskyi • 2023

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 27 грудня 2023 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.; Дідик О.К., канд. техн. наук, доц.; Зоценко М.Л., д-р техн. наук, проф.; Іващук 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, доц.; 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 Є.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; 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, доц.; Філімоніхін Г.Б., д-р техн. наук, проф.; Шепеленко І.В., д-р техн. наук, доц.; 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*

Реєстраційне свідоцтво: серія KB № 23513-13353 ПР від 13.07.2018 р.

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

DOI: 10.32515/2664-262X

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.664

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.3-10](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.3-10)

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

Функціональний портрет шестеренної гідравлічної машини

Одним із важливих питань розвитку машинобудування є підвищення ефективності функціональних показників різного роду механізмів, серед яких гідравлічні шестеренні насоси та мотори. Особливу увагу необхідно звертати на показники об'ємної подачі та крутного моменту. Одним із шляхів є дослідження взаємовпливу вихідних параметрів функціонування шестеренної гідравлічної машини.

Одними із основних параметрів, котрі визначають функціональні показники роботи шестеренної гідравлічної машини є об'ємна подача, потужність та крутний момент, котрі в свою чергу утворюють загальний коефіцієнт корисної дії. Для визначення впливу обумовлених показників на загальний коефіцієнт корисної дії та підвищення ефективності функціонування шестеренної гідравлічної машини необхідно побудувати функціональний портрет. Отриманий функціональний портрет дасть можливість визначити показник оптимізації роботи шестеренної гідравлічної машини, як в режимі насоса, так і в режимі мотору. В свою чергу, він дозволить поєднати кореляційні залежності між собою. Для отримання оптимальних показників для побудови функціонального портрету розроблена схема діагностування шестеренної гідравлічної машини в режимі насос-мотор та приведені алгоритм їх роботи.

В результаті побудови функціонального портрету шестеренної гідравлічної машини в режимі насоса встановлено, що її функціонування не має інерційності та параметри мають стабільний характер. В свою чергу функціональний портрет шестеренної гідравлічної машини в режимі мотору має зону інерційності, котра в залежності від моменту пуску може мати сталий або не сталий характер.

функціональний портрет, шестеренний насос, шестеренний мотор, об'ємна подача, загальний коефіцієнт корисної дії

Постановка проблеми. Зростання вимог до сучасних сільськогосподарських механізмів та машин різного роду передбачає підвищення функціональних показників їх складових. Значного розповсюдження в сільськогосподарському машинобудуванні набули шестеренні гідравлічні насоси та мотори. Конструкція даних типів механізмів відома вже багато років, але все ще залишаються шляхи підвищення їх функціональних показників за рахунок різного роду досліджень. Одним із шляхів підвищення їх ефективності є дослідження впливу вихідних функціональних характеристик в залежності один відносно одного при роботі в режимі насоса та мотору. Отже, проведення даного дослідження для шестеренних гідравлічних насосів та моторів є актуальним науковим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На підставі існуючих методів аналізу та оцінки шестеренної гідравлічної машини, як технічного об'єкту, необхідно дати визначення системи, що розглядається [1,2,3,4,5].

Технічна система (ТС) – замкнена система функціонування технічного об'єкта, яка вміщує вхідні та вихідні параметри, які відповідають можливій зоні експлуатації [1].

Технічний процес (ТП) – замкнений процес функціонування технічного об'єкта,

який вміщує вхідні та вихідні параметри, з обмеженням їх значень, які відповідають конкретному об'єкту в заданій зоні експлуатації [2,3,6,7,8,9,10].

Гідравлічні шестеренні машини, що досліджуються, доцільно розглядати, як у вигляді технічної системи (ТС), так і у вигляді технічного процесу (ТП).

Гідравлічна ТС, як у вигляді насосу, так і у вигляді мотора, характеризується параметрами, в тому числі наступними.

Вхідні параметри:

- модуль зубчатого зачеплення m , мм;
- кількість зубців шестеренні; z , шт;
- ширина зубчатого вінця b , мм.

Вихідні параметри:

- об'єм робочої камери, q , см³.

Гідравлічна машина, як процес (ТП), характеризується параметрами, в тому числі наступними.

Вхідні параметри:

- частота обертання, n , хв-1;
- тиск на виході, P , МПа, (кг/см²);
- в'язкість робочої рідини, μ , сСт;
- температура робочої рідини, t° с;
- кутова швидкість, ω , рад/сек.

Вихідні параметри:

- об'ємна подача, Q , дм³/хв;
- потужність, P , кВт;
- крутний момент, T , Н·м
- загальний коефіцієнт корисної дії, η_3 .

При функціонуванні в режимі насоса загальний коефіцієнт η_3 визначається:

$$\eta_3 = \frac{T \cdot \omega}{Q \cdot p} \quad (1)$$

При функціонуванні в режимі мотора загальний коефіцієнт η_3 визначається:

$$\eta_3 = \frac{Q \cdot p}{T \cdot \omega} \quad (2)$$

Кореляційні залежності між параметрами, які утворюють потужність можуть свідчити про ефективність функціонування ТС(ТП).

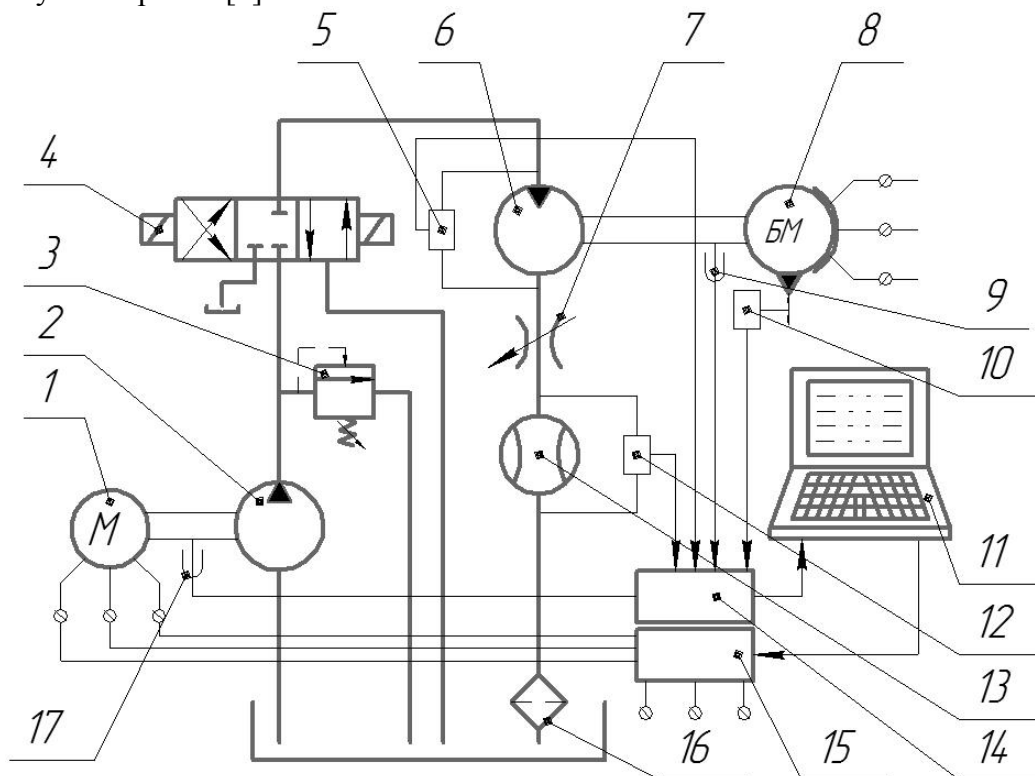
Для визначення параметра оптимізації у вигляді потужності P , необхідно створити функціональний портрет ТС.

Функціональний портрет ТС – це замкнена система показників, яка вміщує кореляційні залежності між окремими параметрами, визначеними в умовах прямого експерименту та параметрами, які визначені на підставі непрямого експерименту із знаходженням розбіжностей між ними [1,5].

Функціональний портрет будується в умовах стійкого режиму експлуатації ТС. Для побудови функціонального портрету здійснюється на підставі реальної схеми ТС(ТП) з визначенням її технічних характеристик, як в статусі ТС, так і в статусі ТП.

Постановка завдання. На підставі проведеного дослідження було запропоновано побудувати функціональний портрет гідравлічної шестеренної машини в режимі насосу та мотору, що дасть можливість здійснити аналіз для підвищення її ефективності.

Виклад основного матеріалу. Для отримання даних необхідних для побудови функціонального портрету гідравлічної шестеренної машини, розробимо схему її діагностування рис. 1 [2].



1 – електродвигун привода; 2 – насос; 3 – запобіжний клапан; 4 – гідророзподільник; 5 – датчик тиску; 6 – мотор; 7 – дросель; 8 – баланс машина; 9 – датчик частоти обертів; 10 – датчик крутного моменту; 11 – дисплей; 12 – датчик об’ємної подачі; 13 – розходомір; 14 – аналого-цифровий перетворювач; 15 – цифро-аналоговий перетворювач; 16 – фільтр; 17 – датчик частоти обертів

Рисунок 1 – Схема діагностування системи гідромашин у складі: НАСОС-МОТОР

Джерело розроблено авторами

Функціональний портрет при роботі в режимі насосу представлено на рис.2 та в режимі мотору на рис.3, що будуть характеризуватися наступними параметрами.

Вхідні параметри при роботі в режимі насосу:

- частота обертання, n , хв-1 (кутова швидкість, ω , рад/сек);
- тиск на виході, P , МПа (кг/см²).

Вихідні параметри при роботі в режимі насосу:

- об’ємна подача, Q дм³/хв.

Кореляційні залежності при роботі в режимі насосу:

- потужність, P , на виході в залежності від об’ємної подачі, Q , та тиску, p .

$$P = \frac{Q \cdot \Delta p}{600 \cdot \eta_3} \quad (3)$$

Вхідні параметри при роботі в режимі мотору:

- об’ємна подача, Q дм³/хв;
- тиск на виході, p , МПа (кг/см²).

Вихідні параметри при роботі в режимі мотору:

- крутний момент, T , Н·м
- частота обертів, n , хв-1 (кутова швидкість, ω , рад/сек);

Кореляційні залежності при роботі в режимі мотору:

- крутний момент, T , від тиску, P на вході, та об'ємної подачі, Q

$$T = \frac{Q \cdot p}{2\pi \cdot \eta_3} \quad (4)$$

Статичну характеристику системи, яка відображається на функціональному портреті можна побудувати двома способами.

Перший спосіб застосовується при послідовному з'єднанні елементів системи. Спочатку її будують у вигляді графіків, в однаковому масштабі елементів системи статичної характеристики, при чому кількість графіків повинна бути не більшою, ніж чотири. Якщо їх отримано більше, то здійснюється попарне об'єднання із доведенням загального числа графіків до чотирьох із наступним хрестоподібним розміщенням.

На рис.2 наведені три статичні характеристики шестеренної гідравлічної машини, яка працює в режимі насоса. У вільному квадранті проведена пряма під кутом 45° . Вона відповідає характеристикам четвертого елемента, у якого коефіцієнт підсилення дорівнює одиниці, тому він не впливає на статичні характеристики системи. Цей показник є універсальним параметром для функціонування в умовах насоса – це потужність, P , квт.

На рис.3 наведені три статичні характеристики шестеренної гідравлічної машини, яка працює в режимі мотора. Для функціонування в режимі мотора універсальним параметром прийнято крутний момент, T , Н·м.

Отримані на рис. 2 залежності 1,2,3 від $P=f(Q)$, визначені в таблиці 1, залежності 4,5,6 від $Q=f(P)$ наведені в таблиці 2 та залежності 7,8,9 від $P=f(P)$ - в таблиці 3.

Таблиця 1 – Кореляційні залежності від $P=f(Q)$

Поз. Рис.2	n, с-1	Q, дм ³ /хв	P, МПа
1	8.5	7...3	10,0
2	40	40...20	17,0
3	60	50...35	20,0

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 – Нормативні функціональні залежності $Q=f(P)$

Поз. Рис.2.	n, с-1	P, МПа
4	60	0...20
5	40	0...17
6	8,5	0...10

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3 – нормативні функціональні залежності $P=f(P)$

Поз. Рис.2	n, с-1	P, МПа	P, квт
7	8,5	0...10	0...3,0
8	40	0...17	0...12,5
9	60	0...20	0...20,0

Джерело: розроблено авторами

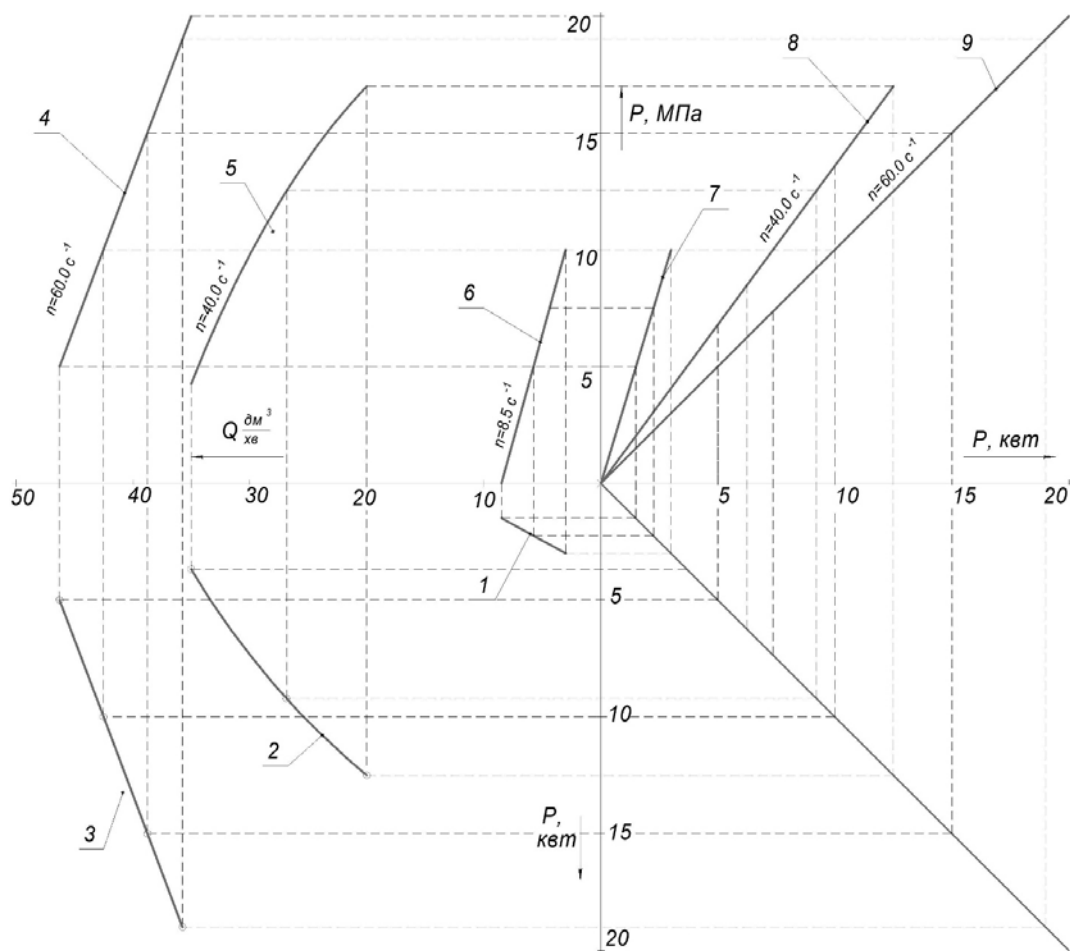


Рисунок 2 – Функціональний портрет шестеренного гідравлічного насосу (об’єм камери $q=16.0 \text{ см}^3$)
 Джерело: розроблено авторами на підставі [6]

Отримані на рис. 3 залежності 1,2 від $M=f(Q)$, визначені в таблиці 4, залежність 3 від $Q=f(n)$ наведено в таблиці 5 та залежності 4,5 від $M=f(n)$ - в таблиці 6.

Таблиця 4 – Кореляційні залежності від $M=f(Q)$.

Поз. Рис.3	$n, \text{с}^{-1}$	$P, \text{МПа}$
1	8,5...60	25,0
2	8,5...60	10,0

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 5 – Нормативні функціональні залежності $Q=f(n)$.

Поз. Рис.3.	$P, \text{МПа}$	$n, \text{с}^{-1}$
3	10...25	8,5...60

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 6 – нормативні функціональні залежності $M=f(n)$.

Поз. Рис.3	$P, \text{МПа}$	$n, \text{с}^{-1}$
4	10,0	8,5...60
5	25,0	8,5...60

Джерело: розроблено авторами

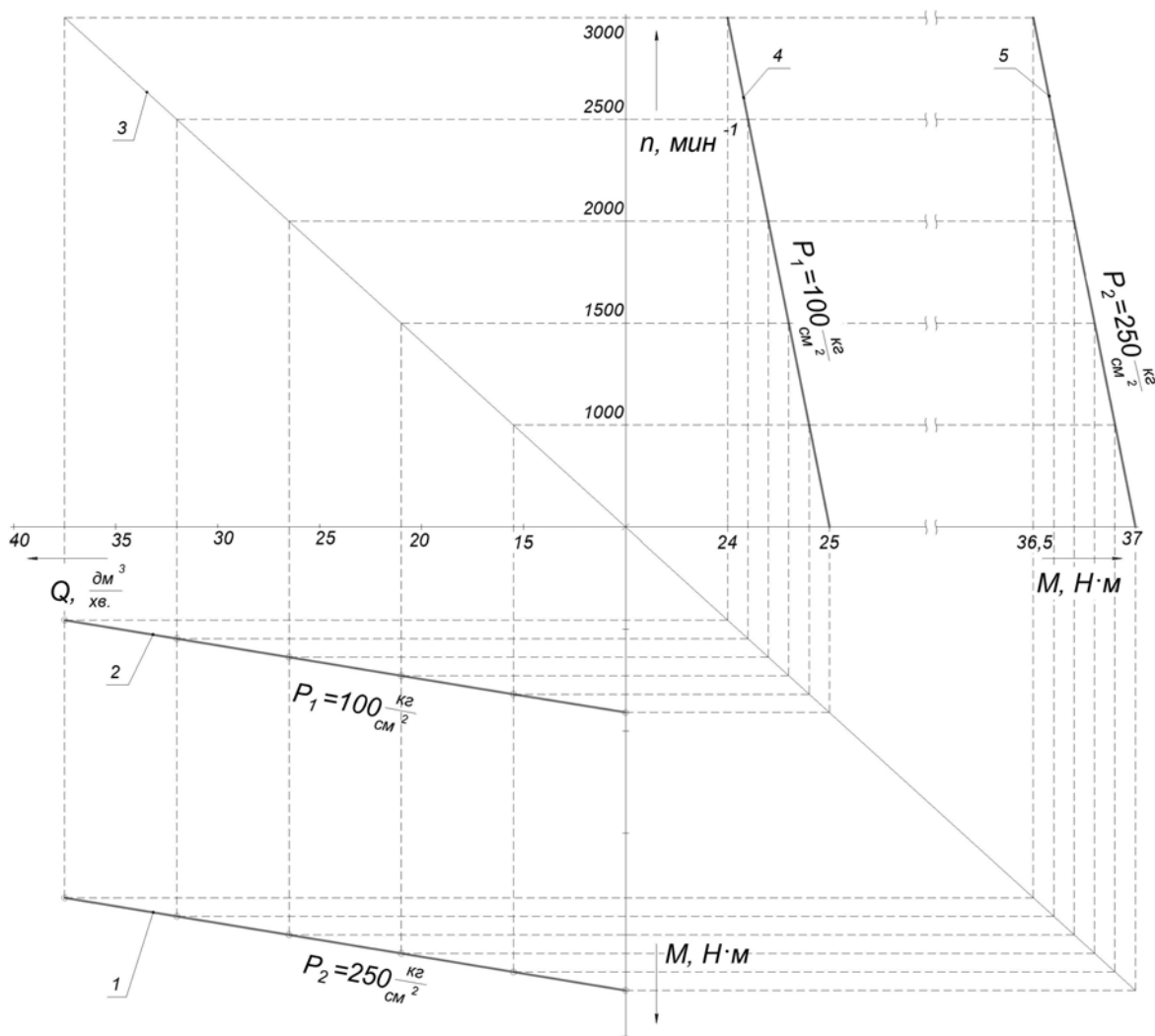


Рисунок 3 – Функціональний портрет шестеренного гідравлічного мотору (об’єм камери q=16.0 см³)
 Джерело: розроблено авторами

Отже, на підставі отриманих функціональних портретів маємо, що гідравлічна машина при функціонуванні в режимі насоса не має інертності, з урахуванням чого її функціональні параметри відносно стабільні і залежать від розмірного портрета. Орієнтація торцевих підшипників відбувається при експлуатації в режимі насоса в умовах тертя, ковзання, динаміки, внаслідок чого забезпечується краща герметизація.

В свою чергу, гідравлічна машина при функціонуванні в режимі мотора має інерційність у момент пуску ($Q_0 \cdot \rho_0$), котра буде визначатися співвідношенням:

$$Q_0 \cdot \rho_0 > 0; \tag{4}$$

$$M \cdot \omega = 0. \tag{5}$$

Зона інерційності при роботі в режимі мотора може бути стабільною, а може змінюватися. Орієнтація торцевих підшипників відбувається в умовах тертя ковзання у статиці, внаслідок чого можлива недостатня герметизація, що впливає на інерційність. Лінії 1,2,3 рис.2 та лінії 1,2 рис.3 фіксують виконання нормативних параметрів гідравлічних машин. Ці лінії умовно відповідають значенню ККД, $\eta \rightarrow 1,0$. Про

відхилення їх від номінального значення можуть свідчити фактичні значення ККД і встановлювати зону їх допустимого значення.

Висновки. В результаті побудови функціонального портрету шестеренної гідравлічної машини в режимі насоса встановлено, що її функціонування не має інерційності, а параметри мають стабільний характер. В свою чергу, функціональний портрет шестеренної гідравлічної машини в режимі мотору має зону інерційності, котра в залежності від моменту пуску може мати сталий або не сталий характер.

Також, на підставі отриманого функціонального портрету можливо припустити, що вірогідною причиною відмовлення шестеренного насоса та мотору при проведенні приймально-здавальних випробувань може бути недостатнє дослідження їх кореляційних залежностей на стадії розробки конструкторської документації.

Список літератури

1. Кузнецов Ю. М., Новосоолов Ю. К., Луців І. В. Теорія технічних систем: підручник. Севастополь : СевНТУ, 2011. 246 с.
2. Підгаєцький М. М., Скібінський О. І. Технологія випробування та сертифікації продукції в машинобудуванні: навч. посіб. Кіровоград : КНТУ, 2014. 144 с.
3. Матвієнко О.О. Математична модель втрат робочої рідини через радіальний зазор шестеренного насоса типу НШ. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 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. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : 05.05.17 / Націон. техн. ун-т «ХПІ». Харків, 2013. 442с.
6. Кириченко А.М., Щербина К.К., Годорожа В.А. Функціональний портрет шестеренного гідравлічного насоса. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС - 2023)*: матер. XIII міжнар. наук.-практ. конф., 25-26 трав., 2023р. 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, Бюл. № 2.

References

1. Kuznietsov, Yu. M., Novos'olov, Yu. K. & Lutsiv, I. V. (2011). *Teoriia tekhnichnykh system [Theory of technical systems]*. Sevastopol : SevNTU [in Ukrainian].
2. Pidhaiets'kyj, M. M. & Skibins'kyj, O. I. (2014) *Tekhnolohiia vyprovuvannia ta sertyfikatsii produktsii v mashynobuduvanni [Technology of testing and certification of products in mechanical engineering]*. Kirovohrad : KNTU [in Ukrainian].
3. Matviienko, O.O. (2005). Matematychna model' vtrat robochoi ridyny cherez radial'nyj zazor shesterennoho nasosa typu NSh [Mathematical model of losses of the working fluid due to the radial clearance of the gear pump type NSh]. *Zbirnyk naukovykh prats' Kirovohrads'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v sil'skohospodars'komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Collected Works of Kirovohrad National Technical University. Machinery in Agricultural Production, Industry Machine Building, Automation, 16, 235-240* [in Ukrainian].

4. Kuleshkov, Y.V., Krasota, M.V., Rudenko, T.V. et al. (2022). Pidvyschennia podachi shesterennykh nasosiv zasobiv transportu ta sil'skohospodars'koi tekhniki [Increasing the Supply of Gear Pumps for Vehicles and Agricultural Machinery]. *Tsentrал'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian National Technical University. Technical sciences*, 4(36), 1, 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) [in Ukrainian].
5. Kulieshkov, Yu.V. (2013). Pidvyschennia tekhnichnoho rivnia shesterennoho nasosa na osnovi novykh fizychnykh i matematychnykh modelej robochoho protsesu podachi [Increasing the technical level of the gear pump on the basis of new physical and mathematical models of the working process of feeding]. *Doctor's thesis*. Kharkiv [in Ukrainian].
6. Kyrychenko, A.M., Scherbyna, K.K. & Hodorozha, V.A. (2023) Funktsional'nyj portret shesterennoho hidravlichnoho nasosu [Functional portrait of a gear hydraulic pump]. Comprehensive quality assurance of technological processes and systems (KZYATPS - 2023): *XIII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia (25-26 travn., 2023r) – XIII International scientific and practical conference* (pp. 288-289). Chernihiv: NU "Chernihivska politekhnika" [in Ukrainian].
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*, Vol. 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].

Mykhailo Pidhaietskyi, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Kyryl Shcherbyna**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Kyrychenko**, Prof., DSc., **Viktor Hodorozha**, post-graduate, **Tetiana Dzhus**, master student
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Functional portrait of a gear hydraulic machine

Increasing the efficiency of the functional performance of various mechanisms, including hydraulic gear pumps and motors, is one of the most important issues in the development of mechanical engineering. Special attention should be paid to the indicators of the volume flow rate and the torque. One of the ways is to study the mutual influence of the output parameters of the hydraulic gear machine.

Some of the main parameters that determine the functional performance of a gear hydraulic machine are volume flow, power and torque, which in turn form the overall efficiency. It is necessary to create a functional portrait in order to determine the influence of these indicators on the overall efficiency and to improve the efficiency of the gear hydraulic machine. The resulting functional portrait will make it possible to determine the indicator for optimizing the operation of a gear hydraulic machine, both in pump mode and in motor mode. In turn, it will allow us to combine correlations with each other. In order to obtain the optimal indicators for building a functional portrait, a scheme for diagnosing a gear hydraulic machine in the pump-motor mode has been developed. An algorithm for its operation has been presented.

As a result of the construction of a functional diagram of a gear hydraulic machine in pump mode, it was found that its operation has no inertia and its parameters are stable and dependent on the dimensional diagram. The orientation of the end bearings occurs during operation in pumping mode under frictional, sliding and dynamic conditions, which ensures improved sealing. On the other hand, the functional portrait of a gear hydraulic machine in motor mode has a zone of inertia, which can be stable or not, depending on the starting moment. Also, on the basis of the obtained functional portrait, it can be assumed that the probable cause of the failure of the gear pump and the motor during the acceptance tests may be the insufficient study of their interdependencies at the stage of development of the design documentation.

functional portrait, gear pump, gear motor, displacement, total efficiency

Одержано (Received) 27.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 29.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 621.787.4

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.11-23](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.11-23)

І.В. Шепеленко, проф., д-р техн. наук, **М.І. Черновол**, академік НААН України, проф., д-р техн. наук, **С.М. Лещенко**, доц., канд. техн. наук, **М.В. Красота**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: kntucpfzk@gmail.com

Я.Б. Немировський, проф., д-р. техн. наук, **В.П. Шумляківський**, доц., канд. техн. наук
Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир, Україна

Пошук оптимальних параметрів фінішної антифрикційної безабразивної обробки гільз циліндрів автотракторних двигунів

В роботі представлені результати досліджень, які спрямовані на підвищення якості отримання антифрикційних покриттів при використанні фінішної антифрикційної безабразивної обробки гільз циліндрів автомобільних і тракторних двигунів. За показники якості антифрикційного покриття обрано його суцільність, шорсткість поверхні та масоперенесення антифрикційного матеріалу. Параметрами оптимізації є основні режими фінішної антифрикційної безабразивної обробки, а також геометричні характеристики вихідної поверхні, що обробляється. В результаті реалізації багатфакторного експерименту отримані статистичні моделі, що дають можливість оцінити вплив досліджувальних факторів на критерії оптимізації. Аналіз математичних моделей дозволив визначити оптимальні варіанти поєднання технологічних факторів, що забезпечують якість покриття, а також встановити раціональні значення режимів фінішної антифрикційної безабразивної обробки та геометричних характеристик вихідної поверхні.

антифрикційне покриття, гільза циліндрів, автотракторні двигуни, якість покриття, багатокритеріальна оптимізація, технологічні параметри, геометричні характеристики поверхні

Постановка проблеми. Загальновизнаним напрямком підвищення якості робочих поверхонь деталей машин та механізмів є розробка та широке застосування захисних покриттів [1]. Особливе місце серед таких покриттів займають антифрикційні, які маючи низький коефіцієнт тертя, у відповідності до призначення забезпечують сприятливі антифрикційні властивості [2]. З усього різноманіття способів отримання антифрикційних покриттів перевагу слід віддати покриттям з оптимальними значеннями твердості та модуля пружності, з підвищеними антифрикційними властивостями, а також таким, що забезпечують створення сприятливих внутрішніх напружень, максимальних адгезійних характеристик покриття з основним матеріалом [3]. Саме такі властивості притаманні покриттям, які отримуються при використанні фінішної антифрикційної безабразивної обробки (ФАБО) гільз циліндрів автотракторних двигунів [4].

Створення будь-якого захисного покриття, в тому числі антифрикційного, неминуче пов'язане з пошуком та розв'язанням оптимізаційної задачі. При цьому об'єктом оптимізації можуть бути компоновка шарів, їх товщина, технологічні режими нанесення, властивості покриттів та ін. [5].

Формування антифрикційного покриття при ФАБО багато в чому залежить від технологічних параметрів, що визначають умови контактування інструменту з оброблюваною поверхнею, а форма і розміри мікронерівностей, як переконливо

доведено у роботах [6-8], визначають якість отриманого покриття. Дослідження особливостей контактування поверхонь, їх закономірностей, а також основних параметрів процесу ФАБО, дає змогу підвищити якість антифрикційного покриття, а отже, й експлуатаційні властивості деталі. Широке застосування ФАБО стримується відсутністю науково-обґрунтованих даних щодо зв'язку технологічних факторів процесу з геометричними параметрами поверхневого шару, і насамперед, із шорсткістю, яка, на думку дослідників [9, 10 та ін.], є одним з основних критеріїв якості отриманого покриття. У зв'язку з цим вельми актуальними видаються дослідження та пошук оптимальних значень параметрів процесу ФАБО, що забезпечують формування якісного антифрикційного покриття з врахуванням умов контактної взаємодії антифрикційного інструменту з оброблюваною поверхнею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Антифрикційні властивості покриттів можуть бути оцінені такими показниками: рівномірністю нанесених покриттів, їх маслоємністю, шорсткістю, товщиною покриття та зносостійкістю поверхні [11]. На наш погляд, всі ці вимоги цілком можуть визначати якість покриттів, отриманих ФАБО.

У ряді досліджень [12-14], присвячених утворенню антифрикційного покриття ФАБО, автори приймають шорсткість поверхні за основний критерій оцінювання якості плівки, що наноситься.

З огляду на те, що параметри шорсткості поверхні багато в чому визначають інтенсивність зношування пар тертя, певним чином впливають на показники її фізичного стану (наклеп, внутрішні напруження, мікротріщини, структуру), корозійну стійкість та надійність нерухомих з'єднань деталей, тому параметр R_a (середнє арифметичне відхилення профілю) цілком можливо використати за один з показників якості покриття. У зв'язку з тим, що авторами робіт [15, 16] отримано та обґрунтовано вихідний мікрорельєф поверхні для створення сприятливих умов для мікрорізання антифрикційного матеріалу мікровиступами вихідної поверхні та інтенсифікації процесу утворення покриття фрикційно-механічним методом, постає необхідність проведення спеціальних досліджень впливу технологічних параметрів ФАБО на шорсткість поверхневого шару.

В роботі [17] якість покриття, отриманого ФАБО, оцінювали її товщиною. Однак, слід відзначити наявність суперечливої інформації щодо величини цього показника. Так автори робіт [18-20] отримали товщину покриття фрикційно-механічним методом ФАБО у межах 0,3 – 0,5 мкм, а в роботі [21] вказано товщину покриття порядку 10 мкм. Така велика відмінність у результатах свідчить про необхідність проведення додаткових досліджень задля визначення об'єктивних даних щодо величини цього показника якості покриття.

Оптимізації процесу нанесення захисних покриттів присвячено низка досліджень [5, 22 та ін.]. При цьому якість обробки оцінювали за допомогою балів, а параметрами слугували: колір покриття; зменшення довжини натираючого стрижня – інтенсивність натирання; рівномірність покриття (його суцільність); згладжування шару покриття. Такий підхід до оцінки якості покриття та ефективності технології ФАБО є не зовсім точним, оскільки колір, товщина, пористість та інші показники є непрямими характеристиками якості покриття, які можуть бути прийняті на етапі відпрацювання технології нанесення покриттів. На етапі експлуатації виробу першорядною властивістю покриття слід вважати його здатність чинити опір зношуванню (зносостійкість).

Показниками якості покриття можуть також виступати адгезія покриття до основного матеріалу [5, 22, 23], напружено-деформований стан поверхневого шару [24, 25], характеристики міцності покриття тощо [5].

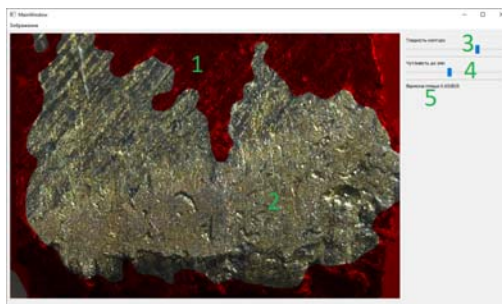
Наведені дані літературних джерел не дають змоги дати оцінку ефективності технології ФАБО з точки зору якості отриманих покриттів. У зв'язку з цим виникає необхідність у проведенні досліджень щодо визначення впливу технологічних параметрів процесу ФАБО на якість покриття, отриманого фрикційно-механічним методом.

В роботі [5] представлено методологію оптимізації технологій нанесення покриттів за критеріями міцності та зносостійкості, які забезпечують максимально можливу міцність та довговічність деталі з покриттям за мінімальних витратах на процес нанесення покриттів. Перспективи використання напряму оптимізації методом факторного планування експерименту переконливо доведені на таких технологіях, як газополум'яне та детонаційне напилення [26], вакуумплазмове напилення [27], електроіскрове легування [28], іонне азотування [29]. Стосовно ФАБО такий підхід не використовувався.

Постановка завдання. Метою представлених досліджень є оцінка впливу технологічних факторів процесу ФАБО на якість антифрикційних покриттів та отримання їх раціональних значень.

Методика проведених досліджень. За критерії оптимізації були прийняті наступні показники якості антифрикційного покриття:

1. Відносна площа покриття S_n/S , де S_n – площа покриття; S – площа досліджуваної поверхні. Величину площі покриття визначили виходячи з результатів металографічного аналізу поверхні, використовуючи методи цифрової обробки зображень на ПК (рис.1). З цією метою була написана програма на мові C++ з використанням фреймворка Qt і бібліотек обробки зображення OpenCV [30].



1 – зона без покриття; 2 – зона з покриттям; 3, 4 – регулятори, які дозволяють пристосувати алгоритм виділення до можливостей камери; 5 – відношення зони з покриттям до загальної площі

Рисунок 1 – Інтерфейс програми для визначення площі покриття

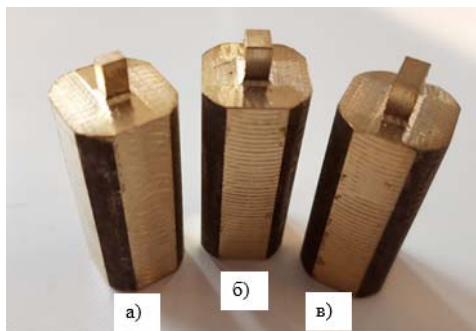
Джерело: розроблено авторами

2. Маса покриття m . Величину масоперенесення визначали шляхом визначення різниці маси латунного інструменту до і після ФАБО.

3. Зміна значення висотного параметра R_a (середнього арифметичного відхилення профілю), який вимірювали за допомогою профілографа Mahr XR20. Причому за значення R_a застосовували його середнє значення, що було отримано в результаті трьох вимірів.

В якості параметрів оптимізації обрано основні режими ФАБО при вибраній схемі обробки: шлях тертя L , навантаження на інструмент P , а також довжина опорної поверхні оброблюваного зразка Δl .

Шлях тертя L змінювали в межах 2...30 мм за рахунок варіювання довжини латунного інструменту l (рис.2) і кількості його проходів n .



а) $l = 2$ мм; б) $l = 4$ мм; в) $l = 6$ мм

Рисунок 2 – Латунний інструмент для ФАБО з довжиною її робочої частини:

Джерело: розроблено авторами

Сили, що припадають на 1 мікронерівність 1 мм її ширини P_{Σ} , визначали згідно залежності $\frac{P_{\Sigma} \cdot S}{L \cdot b}$, де P_{Σ} – сумарна сила, $\frac{L}{S}$ – число виступів мікрорельєфу, b – ширина інструменту, S – подача верстату.

Величину опорної поверхні досліджуваного зразка (рис.3), а отже протяжність контакту з інструментом, варіювали в межах $\Delta l = 0,2 \dots 0,6$ мм на підставі отриманих раніше закономірностей [31].

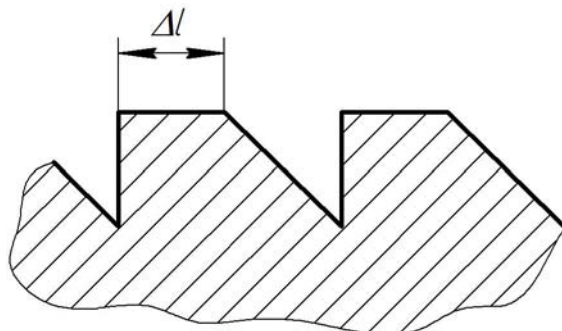


Рисунок 3 – Форма мікрорельєфу досліджуваного зразка

Джерело: розроблено авторами

Метою серії дослідів була реалізація матриці центрального композиційного плану 2^3 +зіркові точки, в результаті чого встановлено вплив ряду факторів ($L \times n$ (сумарного шляху тертя), P_{Σ} (сили, що припадає на 1 мікронерівність 1 мм її ширини), Δl (довжини контакту) на показники, що характеризують якість покриття, отриманого ФАБО.

Для встановлення впливу обраних факторів на показники, що характеризують якість антифрикційного покриття реалізовували матрицю центрального ротатабельного композиційного плану 2^3 +зіркові точки, яка дозволила отримати математичні моделі впливу факторів на прийняті функції відгуку: m – маси антифрикційного покриття; S_n/S – відносної площі покриття; $R_a/R_{a \text{ вих}}$ – зміни значення середньоарифметичного відхилення профілю поверхні.

Ротатабельний план має п'ять рівнів: верхній, нульовий, нижній і два крайніх («зіркові точки»). Інтервал від нульового рівня до «зіркових точок» визначено

«зірковим плечем», що дорівнює 1,68 [32]. Задля унеможливлення впливу систематичних помилок, спричинених неврахованими факторами, досліди проводили у випадковому порядку, для чого використовували таблицю випадкових чисел.

Обробка експериментальних даних виконувалася за допомогою пакету прикладних програм STATISTICA 12.0.

Виклад основного матеріалу. Отримані рівняння регресії мають наступний вигляд:

$$Y_1(m) = 0,005519 + 0,000735 \cdot x_1 - 0,000462 \cdot x_2 - 0,001442 \cdot x_3 - \\ - 0,001895 \cdot x_1^2 - 0,001603 \cdot x_2^2 - 0,001799 \cdot x_3^2 + \quad ; \quad (1) \\ + 0,000248 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,000306 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,00031 \cdot x_2 \cdot x_3$$

$$Y_2\left(\frac{S_n}{S}\right) = 0,668755 + 0,044408 \cdot x_1 - 0,056635 \cdot x_2 - 0,275208 \cdot x_3 - \\ - 0,199841 \cdot x_1^2 - 0,200608 \cdot x_2^2 - 0,149047 \cdot x_3^2 - \quad ; \quad (2) \\ - 0,014875 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,042875 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,006198 \cdot x_2 \cdot x_3$$

$$Y_3\left(\frac{R_a}{R_{a \text{ еих}}}\right) = 0,626308 - 0,088358 \cdot x_1 - 0,00778 \cdot x_2 + 0,077667 \cdot x_3 + \\ + 0,163163 \cdot x_1^2 + 0,048406 \cdot x_2^2 + 0,061634 \cdot x_3^2 - \quad , \quad (3) \\ - 0,017354 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,015312 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,003099 \cdot x_2 \cdot x_3$$

де x_1 – сумарний шлях тертя, мм;

x_2 – сила, що припадає на 1 мікронерівність 1 мм її ширини, Н;

x_3 – довжина контакту, мм.

Статистична оцінка отриманих результатів дозволила вважати дослідити рівноточними. Значимість отриманих коефіцієнтів перевіряли за допомогою критерію Стьюдента, а адекватність рівнянь – з використанням критерію Фішера.

Аналіз Парето-карти (рис.4) та табличних результатів експерименту для маси покриття m дозволив визначити найбільший вплив значення величини опорної поверхні x_3 (довжина контакту) та квадратичний вплив усіх трьох факторів x_1^2 (сумарний шлях тертя), x_2^2 (сила, що припадає на 1 мікронерівність 1 мм її ширини), x_3^2 (довжина контакту).

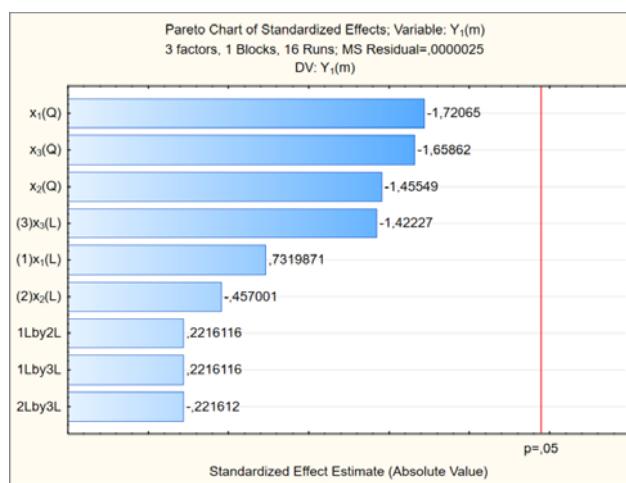
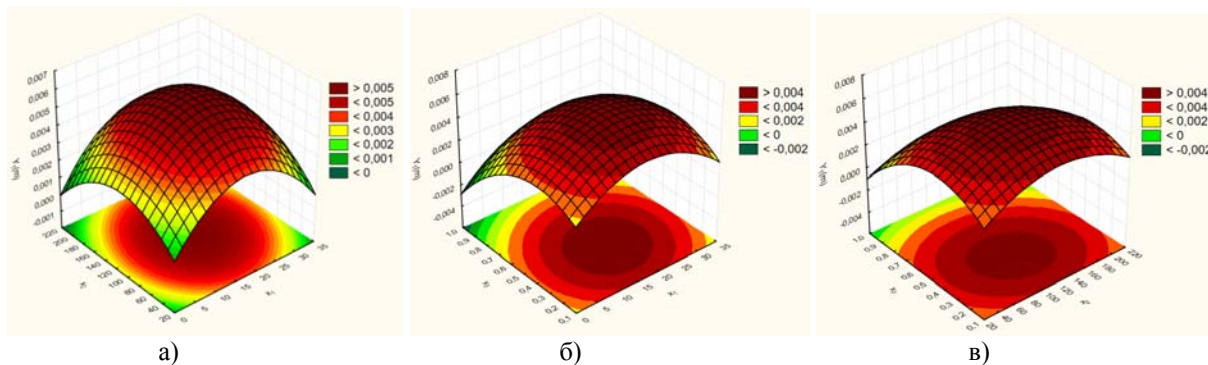


Рисунок 4 – Стандартизована Парето-карта для $Y_1(m)$

Джерело: розроблено авторами

Поверхні відгуку та графіки ліній рівного виходу (рис.5) дозволяють відмітити, що найбільше масоперенесення відбувається при наступних значеннях факторів: $x_1 \rightarrow L \times n = 18 \dots 19 \dots 20$ мм; $x_2 \rightarrow P_\Sigma = 20/b \dots 24/b \dots 28/b$; $x_3 \rightarrow \Delta l = 0,3 \dots 0,4 \dots 0,5$ мм.



а) $Y_1(x_1, x_2)$; б) $Y_1(x_1, x_3)$; в) $Y_1(x_2, x_3)$

Рисунок 5 – Поверхні відгуку та графіки ліній рівного виходу $Y_1(m)$:

Джерело: розроблено авторами

Отримавши Парето-карту для відносної площі покриття S_n/S (рис.6), відзначаємо максимальний вплив на критерій оптимізації Y_2 параметру x_3 , який фактично визначає загальну площу покриття. Поверхні відгуку та графіки ліній рівного виходу для S_n/S (рис.7) дозволяють відмітити, що найбільша суцільність покриття досягається при наступних значеннях чинників: $x_1 \rightarrow L \times n = 16 \dots 18 \dots 20$ мм; $x_2 \rightarrow P_\Sigma = 20/b \dots 24/b \dots 28/b$; $x_3 \rightarrow \Delta l = 0,2 \dots 0,25 \dots 0,3$ мм.

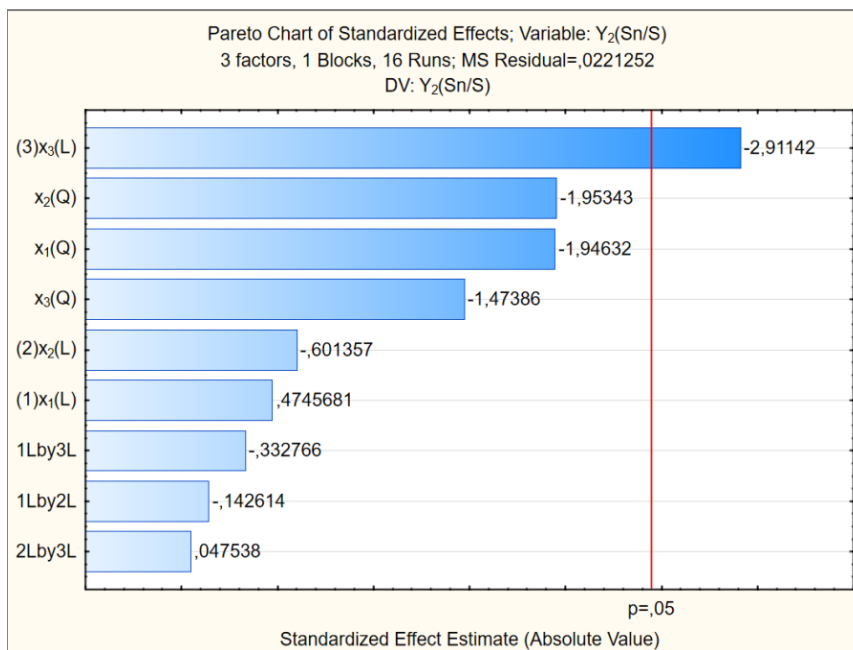


Рисунок 6 – Стандартизована Парето-карта для $Y_2(S_n/S)$

Джерело: розроблено авторами

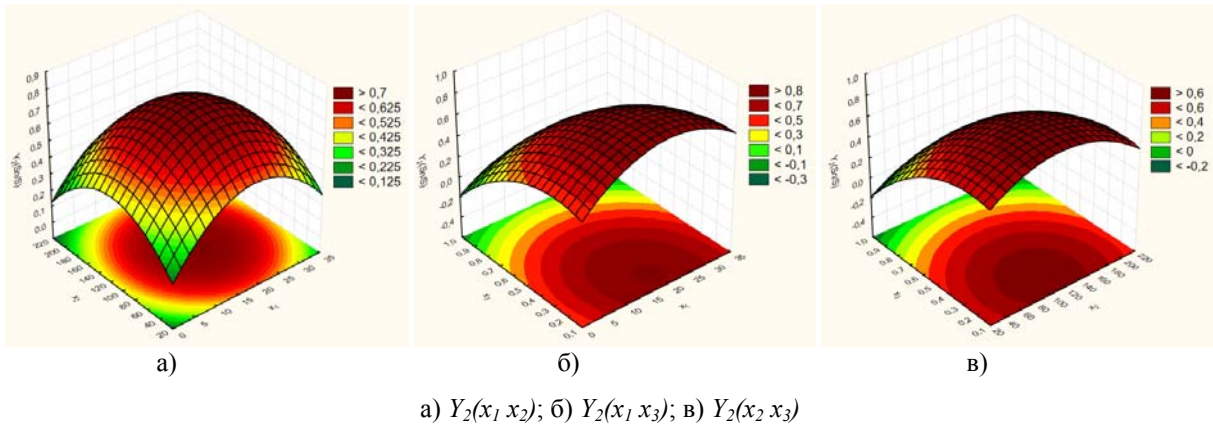


Рисунок 7 – Поверхні відгуку та графіки ліній рівного виходу $Y_2(S_n/S)$

Джерело: розроблено авторами

Стандартизована Парето-карта для відносної шорсткості поверхні (рис.8) свідчить про максимальний вплив на критерій оптимізації Y_3 параметрів x_1 , x_3 та x_2 , які визначають зміну шорсткості поверхні. Поверхні відгуку та графіки ліній рівного виходу для $R_a/R_{a\text{вих}}$ представлені на рис.9. Їх аналіз дозволяє відмітити, що найменша величина відносної шорсткості поверхні досягається при наступних значеннях чинників: $x_1 \rightarrow L \times n = 18...20...22$ мм; $x_2 \rightarrow P_\Sigma = 22/b...26/b...30/b$; $x_3 \rightarrow \Delta l = 0,3...0,35...0,4$ мм.

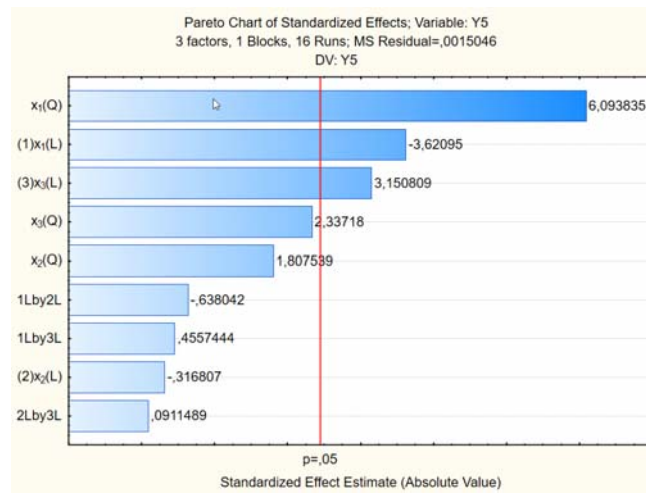


Рисунок 8 – Стандартизована Парето-карта для $Y_3(R_a/R_{a\text{вих}})$

Джерело: розроблено авторами

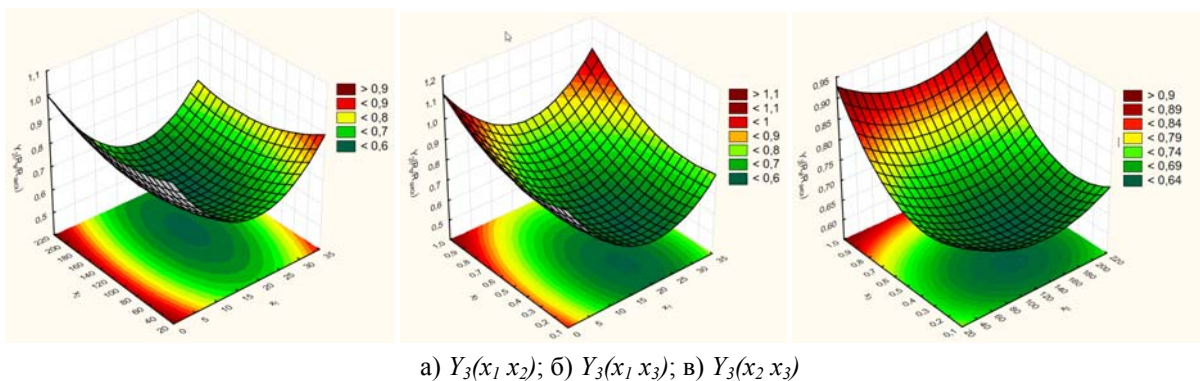


Рисунок 9 – Поверхні відгуку та графіки ліній рівного виходу $Y_3(R_a/R_{a\text{вих}})$

Джерело: розроблено авторами

Враховуючи обернено-пропорційний зв'язок критеріїв оптимізації $Y_1(m)$ і $Y_2(S_n/S)$ з $R_a/R_{a \text{ вих}}$ досягнення їх максимальних значень одночасно неможливе, що показує різниця в раціональних значеннях деяких параметрів, насамперед, x_3 та x_1 .

Тому, для аналізу впливу фактору на критерії оптимізації побудовані експериментальні графіки розсіювання з гистограмами (рис.10), які дозволяють графічно визначити раціональні значення кожного параметру, з оцінкою реальних значень маси антифрикційного покриття, відносної площі покриття та шорсткості поверхні.

Експериментальні графіки розсіювання (рис.10) дозволяють уточнити зміни факторів та встановити їх взаємний вплив на критерії оптимізації. Можна побачити, що при збільшенні шляху тертя $x_1(\Delta L)$ до 18...20 мм досягається максимальний ефект масоперенесення антифрикційного матеріалу. Однак подальше зростання шляху тертя не сприяє збільшенню масоперенесення. На наш погляд, це пов'язано тим, що найбільш активно відбувається перенесення антифрикційного матеріалу на перших проходах інструменту. Подальше збільшення їх кількості не суттєво впливає на приріст матеріалу.

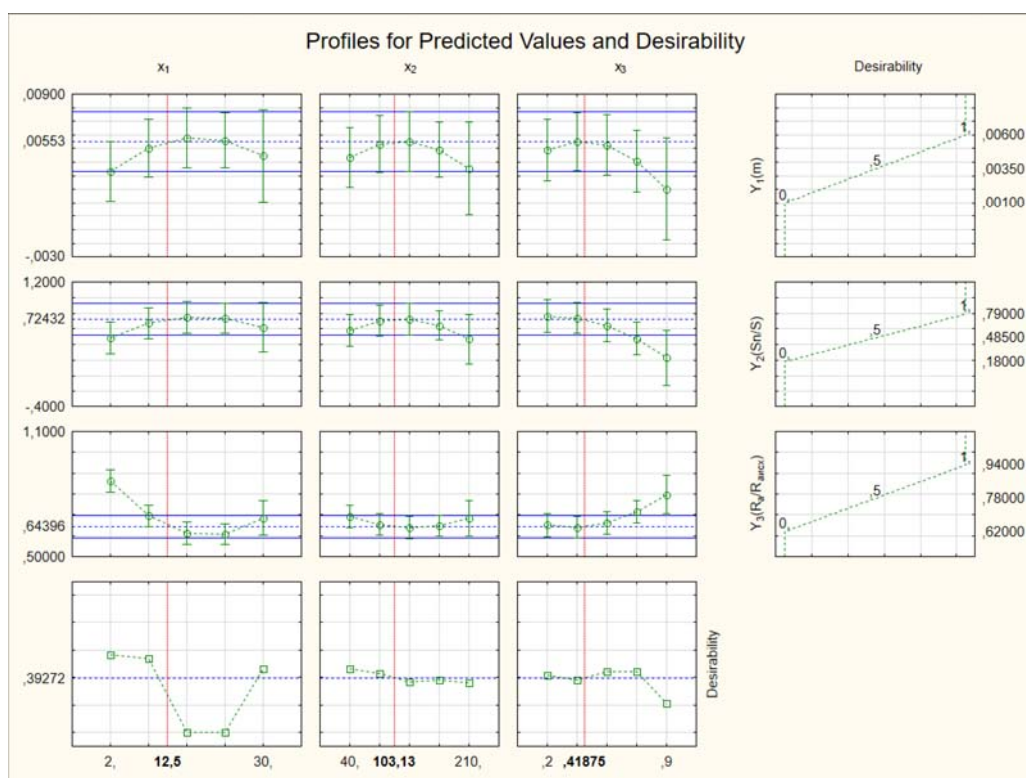


Рисунок 10 – Графіки розсіювання з гистограмами, що характеризують вплив досліджуваних факторів на якість нанесення покриттів

Джерело: розроблено авторами

В свою чергу збільшення сили, що припадає на 1 мікронерівність 1 мм її ширини $x_2(P_z)$ до величини $20/b...28/b$ теж сприяють зростанню масоперенесення. Деяке підвищення цього технологічного параметру зменшує перенесення антифрикційного матеріалу. Можна стверджувати, що такий характер пов'язаний з процесом руйнування поверхневого шару мікронерівностей чавуну. Саме на перших проходах інструменту досягається максимальний радіус мікронерівностей, що зменшує процес стружкоутворення при мікрорізанні. Зазначимо, що збільшення масоперенесення відбувається при значенні довжини контакту $x_3(\Delta l) = 0,3...0,5$ мм.

Чітко прослідковується пряма залежність масоперенесення антифрикційного матеріалу та площі покриття, тому можна констатувати наступні закономірності. При

значеннях $x_1(\Delta L)$ до 18...20 мм, $x_2(P_{\Sigma})=20/b...28/b$, $x_3(\Delta l) = 0,2...0,6$ мм спостерігається найбільша площа покриття, що пояснюється вже розглянутими вище міркуваннями.

Зменшення показника R_a на досліджувальній поверхні відбувається при значеннях шляху тертя $x_1(\Delta L)=18...22$ мм. Наступні цикли натирання не збільшують якість антифрикційного покриття. При підвищенні сили, що припадає на 1 мікронерівність 1 мм її ширини $x_2(P_{\Sigma})$, до значень $22/b...30/b$ спостерігається зниження показника R_a , що пояснюється інтенсивним натиранням антифрикційного матеріалу (латуні Л63) у впадини мікроступів та згладжування їх вершин. Найбільш раціональні значення довжини контакту $x_3(\Delta l)$ з точки зору зменшення показника R_a відбувається при значеннях 0,3...0,6 мм. Це ще раз підтверджує встановлене нами твердження про суттєвий вплив вихідної поверхні мікрорельєфу на якість покриття, отриманого ФАБО [33].

Аналіз поверхонь відгуку та графіків ліній рівного виходу для обраних критеріїв оптимізації (рис.5, 7, 9), а також графіків розсіювання впливу технологічних факторів (рис.10) дозволяє визначити їх раціональні значення: $x_1(\Delta L) = 12$ мм, $x_2(P_{\Sigma})=21/b...28/b$, $x_3(\Delta l) = 0,4$ мм.

Висновки. 1. Виділені та систематизовані основні технологічні фактори, що впливають на якість нанесеного покриття. Експериментально встановлено вплив технологічних параметрів процесу ФАБО на якість антифрикційного покриття.

2. Побудована статистична математична модель залежності якості антифрикційного покриття від технологічних параметрів процесу ФАБО, яка дозволяє оцінити вплив кожного з факторів на обрані критерії оптимізації.

3. Визначено оптимальні варіанти поєднання технологічних факторів, що забезпечують якість покриття. Встановлені раціональні значення режиму ФАБО та геометричних характеристик вихідної поверхні.

Список літератури

1. Щепетов В.В., Харченко О.В., Харченко С.Д. Зносостійкі захисні покриття: за ред. чл.-кор. НАН України В.П. Бабака. Наукова думка, 2022. 122 с.
2. Nemyrovskiy Y., Shepelenko I., Medvedieva O. Improving the Durability of Agricultural Machinery Parts by Applying Antifriction Coatings. *Acta Scientific Agriculture*. 2020. Vol. 4. № 5. P. 46–57. <https://actascientific.com/ASAG/ASAG-04-0840.php>
3. Shepelenko I., Posviatenko E., Cherkun V. The mechanism of formation of anti-friction coatings by employing friction-mechanical method. *Problems of Tribology*. 2019. 24(1/91), 35–39. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-91-1-35-39>
4. Mykhailo Chernovol, Shepelenko Igor, Budar Mohamed R.F. Effectiveness increase in application of FANT of the components of mobile agricultural machines. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин»*. 2015. Вип. 45(1). С. 10–13. <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/2128>
5. Солових Є.К. Науково-методологічні основи підвищення несучої здатності функціональних покриттів конструктивними та технологічними методами: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.03.07. Київ, 2013. 36 с.
6. Abdullah Rasheed A, Ihor Shepelenko, Eduard Posviatyenko. Experimental quality improvement of the application of antifriction coating. *First International Conference on Advances in Physical Sciences and Materials* 13-14 August 2020, Coimbatore, India. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020. Vol. 1706. pp.1–11. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1706/1/012187>
7. Shepelenko I., Tsekhanov Y., Nemyrovskiy Y., Posviatenko E. Improving the Efficiency of Antifriction Coatings by Means of Finishing the Antifriction Non-abrasive Treatment. In: Tonkonogyi, V., et al. *Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer*, Cham. 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_30
8. Shepelenko I. et al. Modeling of contact interaction of microroughnesses of treated surfaces during finishing anti-friction non-abrasive treatment FANT. *Mechatronic Systems 2*. Routledge, 2021. 237–246. <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/37245/106488.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

9. Шепеленко І.В., Кириченко А.М., Магопець С.О., Красота М.В., Василенко І.Ф. Зміна шорсткості поверхні при нанесенні антифрикційних покриттів. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин»*. 2022. Вип.52. С.156–165. <http://zbirniksgm.kntu.kr.ua/pdf/52/18.pdf>
10. Sun H., Tan W., Ruan Y. *et al.* Surface roughness classification using light scattering matrix and deep learning. *Sci. China Technol. Sci.* (2023). <https://doi.org/10.1007/s11431-023-2545-8>
11. Шепеленко І.В. Наукові основи технології нанесення антифрикційних покриттів з використанням пластичного деформування: автореф. дис....д-ра техн. наук: 05.02.08. Київ, 2021. 43 с.
12. Shepelenko I. Technological factors influence on the antifriction coatings quality. *Problems of Tribology*. 2021. 26(2/100). P. 50–57. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-100-2-50-57>
13. Shepelenko I. The study of surface roughness in the process of finishing anti-friction non-abrasive treatment. *Problems of Tribology*. 2020. 25(1/95), 34–40. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-95-1-34-40>
14. Shepelenko I., Nemyrovskiy Y., Stepchyn Y., Mahopets S., Melnyk O. (2024). Creation of a Combined Technology for Processing Parts Based on the Application of an Antifriction Coating and Deforming Broaching. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) *Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_19
15. Шепеленко І.В., Цеханов Ю.О., Немировський Я.Б. Дослідження мікрорізання в процесі фінішної антифрикційної безабразивної обробки. *Прогресивні технології в машинобудуванні – 2020*: зб. наукових праць ІХ Міжнар. наук.-техн. конф., 3 – 7 лютого 2020 р., Львів - Плай, 2020. С.162–164.
16. Shepelenko I., Tsekhanov Yu., Nemyrovskiy Ya., Posvyatenko E., Eremin P. Simulation of micro-cutting in the process of finishing anti-friction non-abrasive treatment. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science* 2019. Vol. 5, no. 2. P. 43-52, <https://doi.org/10.23939/ujmems2019.02.043>
17. Шепеленко І.В., Немировський Я.Б., Посвятенко Е.К. Підвищення якості антифрикційних покриттів з використанням пластичного деформування. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2022. Т. 6, № 1. С.24–30. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.1.255655>
18. Shepelenko I., Cherkun V., Warouma A. Improvement of finishing antifriction treatment without abrasive of the rubbing parts surfaces of agricultural machineries. *Int J Agric Res Innov Technol*. 2014. № 4(1). P. 98–101. <https://ageconsearch.umn.edu/record/305359/>
19. Nemyrovskiy Y., Shepelenko I., Posviatenko E., Chernovol M., Zlatopolskiy F. Creation of progressive hole processing processes based on the study of contact phenomena during deforming broaching and finishing antifriction non-abrasive treatment in various technological environments. *Problems of Tribology*. 2022. №27(1/103). P. 14–25. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-103-1-14-25>
20. Nemyrovskiy Ya., Shepelenko I., Osin R. & Posviatenko E. Improving the processing quality of cylinder liners using combined technology. *Cutting and Tools in Technological Systems*. 2022. № 96. P. 121–130. <http://rits.khpi.edu.ua/article/view/252506>
21. Косіюк М.М., Костюк С.А., Костюк М.А. Технологічне забезпечення нанесення антифрикційного покриття на неповні сферичні поверхні фрикційно-механічним способом. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2018. № 4. С. 38–42. <https://elar.khmnu.edu.ua/items/e3f20be0-836d-4efe-8c35-008bf12fe62c>
22. Solovykh E.K., Lyashenko V.A., Dmitriev Yu.V., Borisov Yu.S. Optimization of the procedure of plasma spraying of erosion-resistant coatings according to strength criteria. *Strength of Materials*. 2008. Vol. 40. Issue 6. P.699–710.
23. Клименко А., Анисимов В., Ситар В. Розробка тонкошарових покриттів на основі фенілону для захисту поверхонь від газо- та гідроабразивного зношування. *Технічні науки та технології*. 2020. № 4 (22). С. 28–34. <http://tst.stu.cn.ua/article/view/227170/227173>
24. Шепеленко І.В., Гуцул В.І., Магопець М.С. Особливості розрахунку напружено-деформованого стану антифрикційних покриттів. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС - 2022)*: матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції (26–27 травня 2022 р.): у 2-х т. Чернігів, 2022. Т.1. С. 104–105.
25. Shepelenko I., Nemyrovskiy Y., Lizunkov O., Vasylenko I., Osin R. (2023). The Stress-Deformed State of the Cylinder Liner’s Working Surface. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Rauch, E., Pitel, J. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI. DSMIE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32767-4_33
26. Solovykh E., Shepelenko I., Chernovol M. *et al.* Multicriteria optimization of heat-resistant coatings detonation spraying technology. *Problems of Tribology*. 2023. 28(4/110). P. 36–43. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-110-4-36-4>

27. Veselivska H.H., Student M.M., Posuvailo V.M. et al. Electrochemical Properties of Plasma-Electrolytically Oxidized Aluminum Coatings Sprayed on MA5 Magnesium Alloy. *Mater Sci*. 2023. Vol. 59. P. 49–55 <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00742-x>
28. Tian N., Zhou S., Zhang C. et al. Effect of High-Current Pulsed Electron Beam Irradiation on the Microstructure and Mechanical Properties of Multilayered TiN/TiCN/Al₂O₃ Coatings. *J. of Materi Eng and Perform* 2023. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08723-6>
29. Solovykh E., Shepelenko I., Solovuch A., Katerynych S. Features of ion nitriding technology multicriteria optimization. *Problems of Tribology*. 2022. Vol. 27, № (4/106). P. 13–18. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-106-4-13-18>
30. Шепеленко І.В., Дреєв О.М., Мохамед Будар Р.Ф. Визначення якості металевих покриттів. *Молодь і технічний прогрес в АПК. Інноваційні розробки в аграрній сфері: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 07 – 08 травня 2020 р. Харків: ХНТУСГ, 2020. Т. 2. С.298–299.*
31. Шепеленко І.В., Немировський Я.Б., Посвятенко Е.К. Інтенсифікація процесу нанесення антифрикційних покриттів. *Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта: матеріали XXI Міжнар. наук.-техн. конф., 06 – 09 жовтня 2020 р. м.Київ: КПІ, 2020. С.94–96.*
32. Vasytkovska K.V., Leshchenko S.M., Vasytkovskyi O.M., Petrenko D.I. Improvement of equipment for basic tillage and sowing as initial stage of harvest forecasting. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 50 Issue 3. P. 13–20.
33. Shepelenko I., Nemyrovskiy Y., Tsekhanov Y., Posviatenko E., Sardak S. Power Parameters of Micro-cutting During Finishing Anti-friction Non-abrasive Treatment. In: Karabegović, I. (eds) *New Technologies, Development and Application III. NT 2020. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2020. Vol 128. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46817-0_22.

References

1. Schepetov, V.V., Kharchenko, O.V. & Kharchenko, S.D. (2022). *Znosostijki zakhysni pokryttia [Wear-resistant protective coatings]*. Naukova dumka [in Ukrainian].
2. Nemyrovskiy, Y., Shepelenko, I. & Medvedieva, O. (2020). Improving the Durability of Agricultural Machinery Parts by Applying Antifriction Coatings. *Acta Scientific Agriculture, Vol. 4, No 5*. P. 46–57. <https://actascientific.com/ASAG/ASAG-04-0840.php> [in English].
3. Shepelenko, I., Posviatenko, E., & Cherkun, V. (2019). The mechanism of formation of anti-friction coatings by employing friction-mechanical method. *Problems of Tribology, 24(1/91)*, 35–39. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-91-1-35-39> [in English].
4. Chernovol, Mykhailo, Shepelenko, Igor & Budar Mohamed R.F. (2015). Effectiveness increase in application of FANT of the components of mobile agricultural machines. *Zahalnoderzhavnyi mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk «Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn»*. 45(1), 10-13. <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/2128> [in English].
5. Solovykh, Ye.K. (2013). *Naukovo-metodolohichni osnovy pidvyschennia nesuchoi zdatnosti funktsional'nykh pokryttiv konstruktyvnyh ta tekhnolohichnyh metodamy [Scientific and methodological bases of increasing the bearing capacity of functional coatings by constructive and technological methods]*. *Extended abstract of a doctoral thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
6. Abdullah Rasheed A., Shepelenko, Ihor & Posviatyenko, Eduard (2020). Experimental quality improvement of the application of antifriction coating. *First International Conference on Advances in Physical Sciences and Materials* 13-14 August 2020, Coimbatore, India. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1706. pp.1–11. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1706/1/012187> [in English].
7. Shepelenko, I., Tsekhanov, Y., Nemyrovskiy, Y. & Posviatenko, E. (2020). Improving the Efficiency of Antifriction Coatings by Means of Finishing the Antifriction Non-abrasive Treatment. In: Tonkonogyi, V., et al. *Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_30 [in English].
8. Shepelenko, I. et al. Modeling of contact interaction of microroughnesses of treated surfaces during finishing anti-friction non-abrasive treatment FANT. *Mechatronic Systems 2*. Routledge, 2021. 237–246. <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/37245/106488.pdf?sequence=2&isAllowed=y> [in English].
9. Shepelenko, I.V. et al. (2022). Zmina shorstkosti poverkhni pry nanesenni antyfryktsiinykh pokryttiv [Changes in surface roughness when applying anti-friction coatings]. *Zahalnoderzhavnyi mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk «Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn»*, 52, 156–165. <http://zbirniksgm.kntu.kr.ua/pdf/52/18.pdf> [in Ukrainian].
10. Sun, H., Tan, W., Ruan, Y. et al. (2023). Surface roughness classification using light scattering matrix and deep learning. *Sci. China Technol. Sci.* <https://doi.org/10.1007/s11431-023-2545-8> [in English].

11. Shepelenko, I.V. (2021). Naukovi osnovy tekhnologii nanesennia antyfraktsiynykh pokryttiv z vykorystanniam plastychnoho deformuvannia [Scientific basis of the technology of applying antifriction coatings using plastic deformation]. *Extended abstract of a doctoral thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
12. Shepelenko, I. (2021). Technological factors influence on the antifriction coatings quality. *Problems of Tribology*, 26(2/100), 50–57. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-100-2-50-57> [in English].
13. Shepelenko, I. (2020). The study of surface roughness in the process of finishing anti-friction non-abrasive treatment. *Problems of Tribology*, 25(1/95), 34–40. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-95-1-34-40> [in English].
14. Shepelenko, I., Nemyrovskiy, Y., Stephyn, Y., Mahopets, S. & Melnyk, O. (2024). Creation of a Combined Technology for Processing Parts Based on the Application of an Antifriction Coating and Deforming Broaching. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) *Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_19 [in English].
15. Shepelenko, I.V., Tsekhanov, Yu.O. & Nemyrovskiy, Ya.B. (2020). Doslidzhennia mikrorizannia v protsesi finishnoi antyfraktsiynoi bezabrazyvnoi obrobky [Investigation of microneedling in the process of antifriction finishing without abrasive treatment]. *Progressive technologies in mechanical engineering - 2020: IX Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia (3 – 7 liutoho 2020 r.) - IX International scientific and technical conference* (pp.162–164). Lviv: Plai [in Ukrainian].
16. Shepelenko, I., Tsekhanov, Yu., Nemyrovskiy, Ya., Posvyatenko, E. & Eremin, P. (2019). Simulation of micro-cutting in the process of finishing anti-friction non-abrasive treatment. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*, 5, 2, 43-52. <https://doi.org/10.23939/ujmms2019.02.043> [in English].
17. Shepelenko, I.V., Nemyrovskiy, Ya.B. & Posviatenko, E.K. (2022). Pidvyschennia yakosti antyfraktsiynykh pokryttiv z vykorystanniam plastychnoho deformuvannia [Improving the quality of anti-friction coatings using plastic deformation]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 6, 1, 24–30. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.1.255655> [in Ukrainian].
18. Shepelenko, I., Cherkun, V. & Warouma, A. (2014). Improvement of finishing antifriction treatment without abrasive of the rubbing parts surfaces of agricultural machineries. *Int J Agric Res Innov Technol*, 4(1): 98–101. <https://ageconsearch.umn.edu/record/305359/> [in English].
19. Nemyrovskiy, Y., Shepelenko, I., Posviatenko, E., Chernovol, M., & Zlatopolskiy, F. (2022). Creation of progressive hole processing processes based on the study of contact phenomena during deforming broaching and finishing antifriction non-abrasive treatment in various technological environments. *Problems of Tribology*, 27(1/103), 14–25. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-103-1-14-25> [in English].
20. Nemyrovskiy, Ya., Shepelenko, I., Osin, R. & Posviatenko, E. (2022). Improving the processing quality of cylinder liners using combined technology. *Cutting and Tools in Technological Systems*, 96: 121–130. <http://rits.khpi.edu.ua/article/view/252506> [in English].
21. Kosiuk, M.M., Kostiuk, S.A. & Kostiuk, M.A. (2018). Tekhnolohichne zabezpechennia nanesennia antyfraktsiynoho pokryttia na nepovni sferychni poverkhni fryktsiyno-mekhanichnym sposobom [Technological support for the application of antifriction coating on incomplete spherical surfaces by friction-mechanical method]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky - Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, 4, 38–42. <https://elar.khmnu.edu.ua/items/e3f20be0-836d-4efe-8c35-008bf12fe62c> [in Ukrainian].
22. Solovykh, E.K., Lyashenko, B.A., Dmitriev, Yu.V. & Borisov, Yu.S. (2008). Optimization of the procedure of plasma spraying of erosion-resistant coatings according to strength criteria. *Strength of Materials, Vol. 40, Issue 6*. P. 699–710 [in English].
23. Klymenko, A., Anisimov, V. & Sytar, V. (2020). Rozrobka tonkosharovykh pokryttiv na osnovi fenilonu dlia zakhystu poverkhon' vid hazo- ta hidroabrazyvnoho znoshuvannia [Development of thin-layer coatings based on phenylene to protect surfaces from gas and water abrasion]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii - Technical sciences and technologies*, 4 (22), 28–34. <http://tst.stu.cn.ua/article/view/227170/227173> [in Ukrainian].
24. Shepelenko, I.V., Hutsul, V.I. & Mahopets, M.S. (2022). Osoblyvosti rozrakhunku napruzhenodeformovanoho stanu antyfraktsiynykh pokryttiv [Features of calculation of the stress-strain state of antifriction coatings]. *Comprehensive quality assurance of technological processes and systems (KZYATPS - 2022): XII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia (26–27 travnia 2022 r.) - XII International Scientific and Practical Conference* (pp. 104–105). Chernihiv [in Ukrainian].
25. Shepelenko, I., Nemyrovskiy, Y., Lizunkov, O., Vasylenko, I. & Osin, R. (2023). The Stress-Deformed State of the Cylinder Liner's Working Surface. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Rauch, E., Piteř, J. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI. DSMIE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32767-4_33 [in English].
26. Solovykh, E., Shepelenko, I., Chernovol, M., Shumliakivsky, V., Solovuch, A. & Katerynych, S. (2023). Multicriteria optimization of heat-resistant coatings detonation spraying technology. *Problems of Tribology*, 28(4/110), 36–43. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-110-4-36-4> [in English].

27. Veselivska, H.H., Student, M.M., Posuvailo, V.M. *et al.* (2023). Electrochemical Properties of Plasma-Electrolytically Oxidized Aluminum Coatings Sprayed on MA5 Magnesium Alloy. *Mater Sci* 59, 49–55 <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00742-x> [in English].
28. Tian, N., Zhou, S., Zhang, C. *et al.* (2023). Effect of High-Current Pulsed Electron Beam Irradiation on the Microstructure and Mechanical Properties of Multilayered TiN/TiCN/Al₂O₃ Coatings. *J. of Materi Eng and Perform* <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08723-6> [in English].
29. Solovykh, E., Shepelenko, I., Solovuch, A., & Katerynych, S. (2022). Features of ion nitriding technology multicriteria optimization. *Problems of Tribology, Vol. 27, № 27(4/106)*, P. 13–18. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-106-4-13-18> [in English].
30. Shepelenko, I.V., Driev, O.M. & Mokhamed Budar R.F. (2020). Vyznachennia iakosti metalevykh pokryttiv [Determining the quality of metal coatings]. *Youth and technical progress in agriculture. Innovative developments in the agricultural sector: Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia (07 – 08 travnia 2020 r.) - International Scientific and Practical Conference* (pp. 298–299). Kharkiv: KhNTUSH [in Ukrainian].
31. Shepelenko, I.V., Nemyrov'skyj, Ya.B. & Posviatenko, E.K. (2020). Intensyfikatsiia protsesu nanesennia antyfraktsiynnykh pokryttiv [Intensification of the process of applying anti-friction coatings]. *Progressive engineering, technology and engineering education: XXI Mizhnarodna naukovo-tehnichna konferentsiia (06 – 09 zhovtnia 2020 r.) - International scientific and technical conference* (pp. 94-96), Kyiv: KPI [in Ukrainian].
32. Vasylykivska, K.V., Leshchenko, S.M., Vasylykovskiy, O.M. & Petrenko, D.I. (2016). Improvement of equipment for basic tillage and sowing as initial stage of harvest forecasting. *INMATEH – Agricultural Engineerin, Vol. 50, Issue 3*. P. 13–20 [in English].
33. Shepelenko, I., Nemyrovskiy, Y., Tsekhanov, Y., Posviatenko, E. & Sardak, S. (2020). Power Parameters of Micro-cutting During Finishing Anti-friction Non-abrasive Treatment. In: Karabegović, I. (eds) *New Technologies, Development and Application III. NT 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 128*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46817-0_22 [in English].

Ihor Shepelenko, Prof., DSc, **Mykhailo Chernovol**, Academician of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Prof., DSc., **Serhii Leshchenko**, Assoc. Prof., PhD of tech. sci., **Michael Krasota**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Yakiv Nemyrovskiy, Prof., DSc., **Volodymyr Shumliakivsky**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine

Searching for optimal parameters of finishing antifriction non-abrasive treatment of cylinder liners of motor tractor engines

This paper presents the results of research aimed at improving the quality of antifriction coatings obtained by finishing antifriction non-abrasive treatment (FANT). It has been previously established that the formation of an antifriction coating during FANT largely depends on the technological parameters that determine the conditions of contact between the tool and the surface being treated. The study of the peculiarities of surface contact, their regularities, as well as the main parameters of the FANT process, makes it possible to improve the quality of the antifriction coating, and therefore the operational properties of the part.

The aim of the presented research is to evaluate the influence of technological factors of the FANT process on the quality of antifriction coatings and to obtain their rational values. The indicators of the quality of the antifriction coating are its continuity, surface roughness and mass transfer of the antifriction material. The optimisation parameters are the main modes of FANT and the geometrical characteristics of the initial surface to be treated. To determine the influence of the selected factors on the indicators characterising the quality of the antifriction coating, a central composite plan matrix was implemented, which allowed us to obtain mathematical models of the influence of factors on the adopted response functions. The processing of the experimental data was carried out using the STATISTICA 12.0 software package.

As a result of the multifactorial experiment, statistical models were obtained that allow assessing the impact of the studied factors on the optimisation criteria. The significance of the obtained coefficients was checked using the Student's criterion, and the adequacy of the obtained equations was checked using the Fisher's criterion. A detailed analysis of the Pareto map and tabular results of the experiment allowed to establish the influence of the research factors on the optimisation criteria. The obtained mathematical models made it possible to determine the optimal combination of technological factors that ensure the quality of the coating, as well as to establish the rational values of FANT modes and geometric characteristics of the output surface.

antifriction coating, cylinder liners, automotive and tractor engines, coating quality, multicriteria optimisation, technological parameters, geometric characteristics of the surface

Одержано (Received) 23.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 28.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 621.82

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.24-34](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.24-34)

І.Б. Гевко, проф., д-р техн. наук, Р.Я. Лещук, доц., канд. техн. наук, А.О. Брикса, асп.,
О.Ю. Стібайло, асп., С.О. Коваль, асп.

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

e-mail: gevkoivan1@ukr.net

Особливості конструкцій і технологічного проектування робочих органів лопатевих гвинтових змішувачів

Проаналізовано типові конструктивні схеми лопатевих гвинтових робочих органів змішувачів і розроблено найбільш технологічні способи їх виготовлення. Визначено основні конструктивно-технологічні параметри способів їх виготовлення з використанням навивання і встановлено основні фактори, які впливають на їх технологічне проектування. Визначено технологічні особливості конструктивних параметрів лопатевих спіралей змішувачів, які виготовлені різними способами, і охарактеризовано найбільш вживані конструкційні та супутні матеріали при їх виготовленні. Встановлено, що найбільш економічно ефективним способом виготовлення лопатевих спіралей змішувачів є навивання спіралей щільним пакетом по внутрішньому торцевому профілю з прямокутних заготовок з подальшим вилученням сегментних отворів для створення лопатей і калібруванням на заданий крок.

лопати, гвинтовий робочий орган, змішувач, спосіб, технологічне проектування

Постановка проблеми. Лопатеві гвинтові змішувачі є типовими засобами для виконання операції змішування будівельних матеріалів, комбікормів, різних видів продуктів у харчовій промисловості тощо [20] і принцип їх роботи використовує поєднання операції переміщення багатокомпонентних сумішей із операцією їх перемішування. Для створення і використання раціональних конструкцій лопатевих гвинтових робочих органів змішувачів, що забезпечують необхідну якість процесу змішування, потрібно розробити і обґрунтувати найбільш технологічні способи їх виготовлення при забезпеченні мінімальної собівартості виготовлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Специфіка розробки і дослідження технологічних процесів виготовлення спіралей шнеків широко висвітлена у наукових працях Б.М. Гевка [12, 21], М.І. Пилипця [9, 12, 18, 19], Р.М. Рогатинського [7, 20], В.В. Васильківа [9-12, 18], О.Л. Ляшука [4, 8, 16, 17, 21], А.Є. Дячуна [1, 4, 8, 16, 17, 20], А.П. Драгана [21] та інших вітчизняних і зарубіжних вчених [2, 3, 5, 6, 13, 15]. Основна увага цими науковцями зосереджувалась на особливостях одержання спіралей шнеків навиванням, прокатуванням, штампуванням та іншими. Також багато уваги приділялось забезпеченню технологічності конструкцій гвинтових спіралей і зниженню енерго- та матеріаловитрат при їх одержанні; проектуванню відповідного технологічного оснащення і обладнання для забезпечення процесів виробництва спіралей шнеків тощо.

Постановка завдання. Метою роботи є технологічне проектування робочих органів лопатевих гвинтових змішувачів.

Виклад основного матеріалу. Особливостями лопатевих гвинтових робочих органів змішувачів є розташування лопатей по гвинтовій лінії вздовж осі вала, на якому

вони, як правило, нерухомо закріплені (рис. 1 а). Проте окремі конструкції робочих органів можуть розташовуватись на валу з можливістю провертання (рис. 1 б).

На рис. 1 зображені найбільш типові представники лопатевих шнеків, виготовлення яких може забезпечуватись різними способами. Для проведення їх технологічного проектування розглянемо більш детально їхні конструктивні схеми (рис. 1). Шнек для змішування з механічним кріпленням елементів (пат. України № 153687) виконано у вигляді пустотілого вала 1 (рис. 1 а), в якому по гвинтовій лінії закріплено елементи 3 відомим способом в отворах 4 спіралі незначної висоти 2. Між елементами 3 існують отвори для просипання та змішування матеріалів 5. При цьому існує можливість здійснювати підбір необхідної величини елементів 3 для регулювання отворів для просипання та змішування матеріалів 5 з метою кращого змішування матеріалів.

Гвинтовий робочий орган змішувача (пат. України № 153774) виконано у вигляді вала 1 (рис. 1 б) з гвинтом 2, який виконано збірним з базової лопатевої спіралі 3 та спіралі Г-подібної форми 4 із внутрішньою суцільною циліндричною частиною 5 та зовнішньою спіральною лопатевою частиною 6. Базова лопатева спіраль 3 та спіралі Г-подібної форми 4 є однаковими по зовнішньому діаметру та кроку. Базову лопатеву спіраль 3 жорстко закріплено на валу 1, а спіраль Г-подібної форми 4 внутрішньою суцільною циліндричною частиною 5 розміщено на валу 1 з можливістю провертання відносно нього. Кінці 7 спіралі Г-подібної форми 4 зафіксовано на валу 1 відомим способом. Крім того, спіраль Г-подібної форми 4 торцевою зовнішньою спіральною лопатевою частиною 6 контактує з базовою лопатевою спіраллю 3. При цьому для інтенсифікації змішування існує можливість здійснювати підбір необхідного зазору між лопатями базової лопатевої спіралі 3 та спіралі Г-подібної форми 4 шляхом провертання спіралі Г-подібної форми 4 відносно вала 1 з подальшою фіксацією її кінців 7 на ньому.

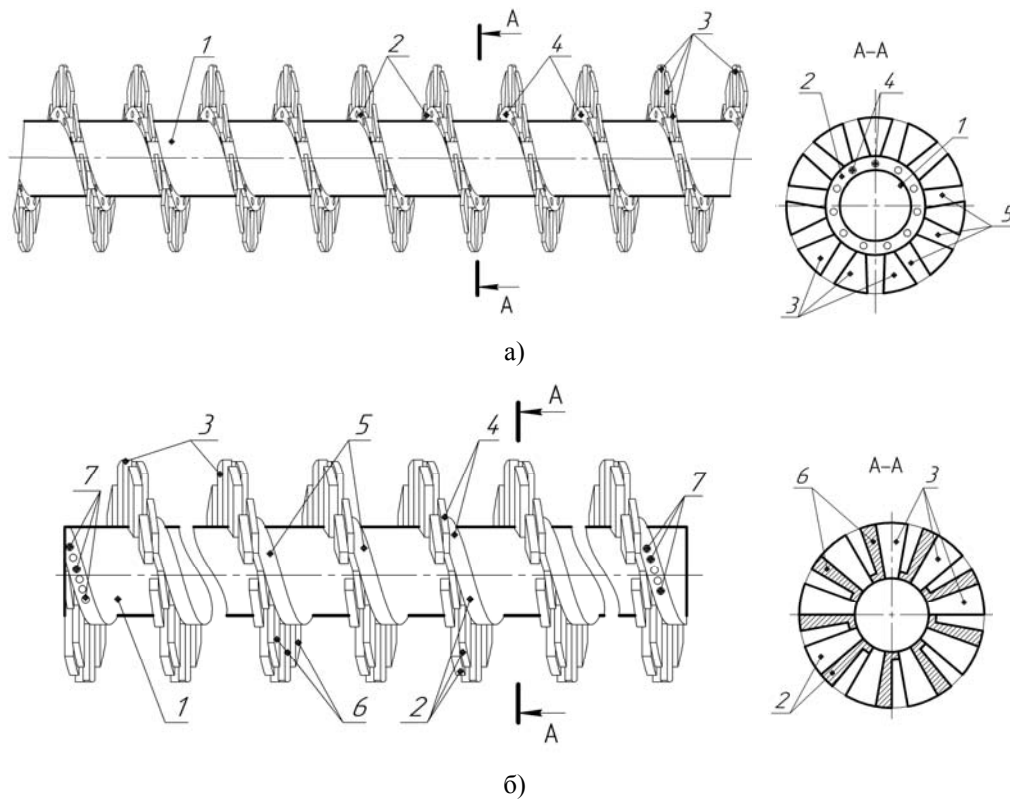


Рисунок 1 – Конструктивні схеми лопатевих гвинтових робочих органів змішувачів
Джерело: розроблено авторами

Проаналізувавши запропоновані конструктивні рішення можна зробити висновок, що лопатеві шнеки можна виготовляти різними способами. Розглянемо найбільш технологічні з них.

Виготовлення робочого органу лопатевого гвинтового змішувача зображеного на (рис. 1 а) передбачає наступну послідовність технологічних операцій:

1. Навивання спіралі 2 відповідного діаметра.
2. Свердління свердлильною головкою отворів 4 на торцевій поверхні навитої щільним пакетом на ребро спіралі 2, яка встановлена в кондуктор (за умови, що в конструкції шнека буде використовуватись механічне з'єднання).
3. Калібрування спіралі 2 на заданий крок.
4. Встановлення (нагвинчування) спіралі 2 на пустотілий вал 1 із витримкою заданого кроку.
5. Закріплення спіралі 2 на пустотілому валу 1 (зварним з'єднанням).
6. Виготовлення лопатевих елементів 3 відповідного профілю (штампуванням, вирізанням).
7. Свердління кріпильних отворів на торцевій поверхні лопатевих елементів 3 (за умови, що в конструкції шнека буде використовуватись механічне з'єднання).
8. Закріплення лопатевих елементів 3 на спіралі 2:
 - варіант 1: в отворах 4 болтовим чи заклепковим з'єднанням;
 - варіант 2: з допомогою зварного з'єднання.

Виготовлення робочого органу лопатевого гвинтового змішувача зображеного на (рис. 1 б) відрізняється від попередньо викладеного і з поміж іншого передбачає виготовлення двох окремих лопатевих спіралей. Зокрема базової лопатевої спіралі 3 та спіралі Г-подібної форми 4 із внутрішньою суцільною циліндричною частиною 5 та зовнішньою спіральною лопатевою частиною 6. Тому окремо розглянемо послідовність технологічних операцій при виготовленні базової лопатевої спіралі 3, спіралі Г-подібної форми 4 і гвинтового робочого органу змішувача, представленого на рис. 1 б.

Виготовлення базової лопатевої спіралі 3, зображеної на рис. 1 б, передбачає наступну послідовність технологічних операцій:

1. Навивання спіралі 3 відповідного діаметра із заготовки прямокутного профілю.
2. Вирубубання (вирізання) сегментних отворів (вилучень) відповідної величини і профілю на торцевій поверхні навитої щільним пакетом на ребро спіралі 3 для формування на ній необхідних лопатевих елементів.
2. Калібрування спіралі 3 на заданий крок.
3. Встановлення (нагвинчування) спіралі 3 на пустотілий вал 1 із витримкою заданого кроку.
4. Закріплення спіралі 3 на пустотілому валу 1 (зварним з'єднанням).

Можна застосовувати менш технологічний спосіб виготовлення, як правило, коли використовується готова спіраль, який передбачає вирізання на торцевій поверхні вже готової спіралі сегментних отворів (вилучень) відповідної величини і профілю.

Виготовлення лопатевої спіралі Г-подібної форми 4, зображеної на рис. 1 б, передбачає наступну послідовність технологічних операцій:

1. Вирубубання (вирізання) сегментних отворів (вилучень) відповідної величини і профілю на торцевій поверхні заготовки Г-подібного профілю для формування на ній необхідних лопатевих елементів (операція може використовуватись і для прямокутної заготовки).
2. Навивання спіралі Г-подібної форми 4 на оправу внутрішньою суцільною циліндричною частиною 5 відповідного діаметра.

3. Калібрування спіралі Г-подібної форми 4 на заданий крок.

4. Свердління кріпильних отворів кінцях 7 на торцевій поверхні циліндричної частини 5 спіралі Г-подібної форми 4.

Подальше виготовлення робочого органу лопатевого гвинтового змішувача зображеного на (рис. 1 б) передбачає формування гвинта 2 на валу 1 шляхом нагвинчування на нього, поряд базової лопатевої спіралі 3, спіралі Г-подібної форми 4 із внутрішньою суцільною циліндричною частиною 5 та зовнішньою спіральною лопатевою частиною 6, з подальшою механічною фіксацією кінців 7 спіралі Г-подібної форми 4 на валу 1.

Також існують конструкції робочих органів лопатевих гвинтових змішувачів із вигнутими пелюстками [14] (рис. 2), що потребують відгинання лопатей на певний кут. Це потребує додаткової операції, які виконують, як правило, з допомогою ручного інструменту.

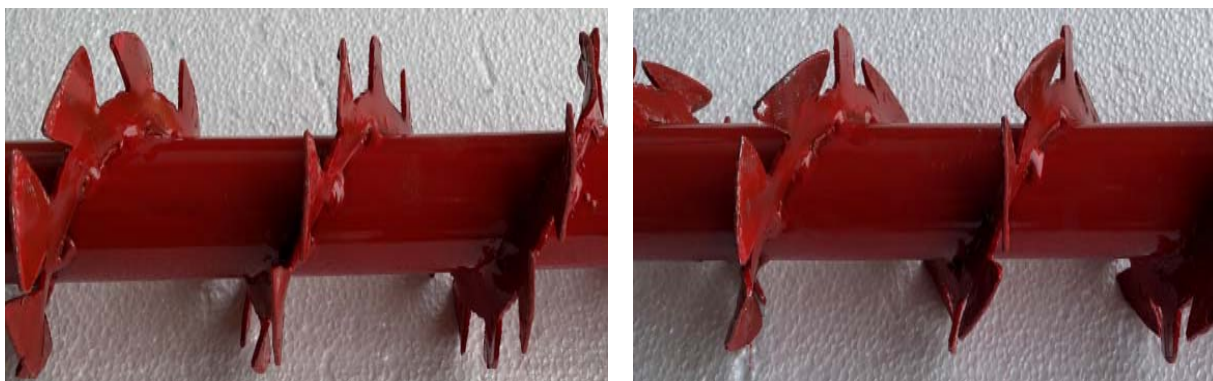


Рисунок 2 – Загальний вигляд лопатевих гвинтових робочих органів змішувачів з відігнутими лопатями (пелюстками)

Джерело: [14]

Основні конструктивно-технологічні параметри способів виготовлення лопатевих гвинтових робочих органів змішувачів навиванням представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні конструктивно-технологічні параметри способів виготовлення лопатевих гвинтових робочих органів змішувачів навиванням

№	Частота обертання, оправи, об/хв.	Повздожня подача формувального ролика, мм/об.	Діаметр оправи, мм	Висота спіралі, мм	Товщина заготовки, мм	Крок спіралі, мм	Площа лопатей до площі спіралі (в %)
1	0,05...0,55	21...132	20...50	5...30	0,8...1,5	21...132	0,1...0,45
2	0,058...0,1	24,5...240	25...100	5...50	0,8...2,0	24,5...240	0,12...0,5
3	0,067...0,15	28...360	30...150	5...75	0,8...3,0	28...360	0,15...0,55
4	0,067...0,2	28...480	30...200	5...100	0,8...3,0	28...480	0,15...0,65
5	0,067...0,25	28...600	30...250	5...125	0,8...3,0	28...600	0,15...0,75

Джерело: розроблено авторами

Головними факторами, які впливають на технологічне проектування робочих органів лопатевих гвинтових змішувачів, є: специфіка призначення і важливість одного

з поєднаних процесів - транспортування чи змішування; тип виробництва і специфіка використовуваних при виготовленні технологічних процесів з можливістю застосування типізації, конструктивної наслідуваності, наявного і можливого до використання обладнання та оснащення; мінімізація собівартості виготовлення з врахуванням відповідності матеріалів і їх використання (безвідходності); вимоги до простоти та безпеки використовуваних процесів і їх можливості забезпечувати відповідні якісні, естетичні та ергономічні характеристики виробів.

На першому етапі проектування лопатевих гвинтових робочих органів змішувачів вибирають матеріали, з яких їх слід виготовляти; на другому уточнюють обсяг виробництва, тип і його характер. Далі розроблять декілька варіантів технологічного процесу виготовлення лопатевих гвинтових робочих органів і вибирають кращий з врахуванням собівартості процесу і часу виготовлення.

Конструкційні матеріали, які найчастіше використовують при виготовленні лопатевих гвинтових робочих органів змішувачів, є сталі 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), 3C, DC01, DC04, DD13, FB8, Fd4, FR8, XC6 (Франція)), а також сталь 20, 30, 45, 09Г2С, 08Х17Т, 12Х17, AISI 304, AISI 316 та інші аналоги.

При навиванні лопатевих гвинтових робочих органів змішувачів зі стрічкового матеріалу доцільно використовувати холоднокатаний прокат стандартної товщини (1, 1,5; 2,5; 3 мм) і ширини (30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 125, 250, 400, 500, 600 мм). При потребі можливе використання відмінних від стандартних розмірів стрічок (нарубаних із листового прокату). При навиванні лопатевих гвинтових робочих органів змішувачів із кутника доцільно використовувати кутники стандартних розмірів 25x25мм; 30x30мм; 35x35мм; 40x40мм; 50x50мм та інші товщиною 2, 2,5; 3 мм, або нестандартних (нарубаних із листового прокату і зігнутих) 20x30мм; 20x40мм; 30x50мм та інші. Для штампування кілець з листового прокату рекомендується його вибір стандартного типорозміру:

- з холоднокатаного листового прокату: 1.0 мм (1.00x2.00); 1.0 мм (1.25x2.50); 1.2 мм (1.00x2.00); 1.2 мм (1.25x2.50); 1.5 мм (1.00x2.00); 1.5 мм (1.25x2.50);

- з гарячекатаного листового прокату: 2.0 мм (1.00x2.00); 2.0 мм (1.25x2.50); 3.0 мм (1.00x2.00); 3.0 мм (1.25x2.50); 3.0 мм (1.50x6.00); 4.0 мм (1.50x6.00).

Для зменшення зусиль при виготовленні лопатевих гвинтових робочих органів змішувачів і усунення недоцільного схоплювання, утворення задирів, заїдання, прилипання деталей, як роздільне технологічне середовище доцільно використовувати різні види мастил. Зокрема індустріальні марок И-20, И-20А, И-40, И-50 чи більш ефективних але дорожчих синтетичних силіконових марок ПМС-20 і ПМС-50 з низькою в'язкістю та кращою проникненістю, які мають вищу текучість, добре прилягають до поверхні і не реагують на низькі і високі температури. Також доцільно використовувати силіконові мастила у вигляді аерозолей, позаяк для їх нанесення на оброблювану поверхню не потрібне використання додаткового устаткування. Проте слід враховувати те, що силіконові мастила мають високу водостійкість, а відтак важко змиваються з поверхонь деталей водою та іншими розчинниками. Тому для подальшого нанесення на лопатеву гвинтову поверхню лакофарбових матеріалів необхідно для видалення силікону використовувати різні спиртові розчини, ацетон тощо.

При розробці процесів виготовлення лопатевих гвинтових робочих органів аналізуються базові показники технологічності та конструктивної складності способів їх виготовлення [13]. Технологія виготовлення лопатевих гвинтових робочих органів

змішувачів суттєво впливає на їх техніко-економічні показники і забезпечується використанням різних способів. Технологічні особливості конструктивних параметрів лопатевих спіралей змішувачів, які виготовлені різними способами з листового прокату, стрічки чи Г-подібного профілю (кутника), представлено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Технологічні особливості конструктивних параметрів лопатевих спіралей змішувачів виготовлених різними способами

№ п/п	Спосіб виготовлення	Коефіцієнт використання матеріалу, K	Питома висота витка, $(b'=B/H, \text{ де } B \text{ і } H - \text{ висота і товщина витка})$
1.	Штапування кілець з лопатевими елементами відповідного профілю з подальшим їх розгинанням на заданий крок та зварюванням (механічним кріпленням) у спіраль	0,2 - 0,5	1 - 50
2.	Прокатування заготовок різної форми у спіралі на прокатних станах з наступним кріпленням до них лопатевих елементів відповідного профілю виготовлених штапуванням чи вирізанням	0,4 - 0,8	≤ 3
3.	Навивання щільним пакетом спіралей по внутрішньому торцевому профілю з прямокутних заготовок з подальшим вирубування (вирізання) сегментних отворів (вилучень) і калібруванням на заданий крок	0,5 – 0,8	3 - 16
4.	Навивання щільним пакетом спіралей по внутрішньому торцевому профілю з прямокутних заготовок з калібруванням на заданий крок і подальшим вирізанням сегментних отворів (вилучень)	0,5 – 0,8	3 - 16
5.	Розрізання торцевої частини заготовки Г-подібного профілю з подальшим навиванням на оправу її внутрішньою суцільною циліндричною частиною та калібруванням (за необхідності) спіралі Г-подібної форми на заданий крок	0,98 – 1,0	2 - 25
6.	Вирубування (вирізання) на торцевій частині заготовки Г-подібного профілю сегментних отворів (вилучень) з подальшим навиванням на оправу її внутрішньою суцільною циліндричною частиною та калібруванням (за необхідності) спіралі Г-подібної форми на заданий крок	0,7 – 0,95	2 – 30

Джерело: розроблено авторами

Проведемо економічний підрахунок окремих способів виготовлення лопатевих спіралей змішувачів з використанням даних таблиці 2. Розрахунок проведемо для лопатевої спіралі товщиною 3 мм, з висотою витка - 30 мм, зовнішнім діаметром - 100 мм, кроком 100 мм, з вирізами по зовнішньому контуру спіралі, які складають 30% її простору, з матеріалу сталь 08кп.

Наведені орієнтовні дані в таблиці 3 можуть змінюватись при виборі іншого

обладнання. Підрахунок відповідних калькуляційних статей проведено за загальновідомою методикою [7]. При цьому слід зазначити, що операція зварювання виконується за участю двох робітників; вартість матеріалів приймалась з прайс-листа ПМП «Рост» на 24.02.2023 р. (лист 1,00×2,00 – 1973,70 грн., смуга 30×3 – 27,16 грн./м/п, кутник 30×30 – 52,84 грн./м/п); годинна тарифна ставка на цей же період робітника 1-го розряду приймалась на рівні 46,75 грн.; тарифні коефіцієнти приймалися наступними: 1,09 для другого розряду, 1,24 для третього розряду, 1,35 для четвертого розряду і 1,54 для п'ятого розряду; вартість електроенергії на цей же період становила 1893,94 грн. за 1 МВт-год., без ПДВ (тариф на розподіл електроенергії «Укренерго» для непобутових споживачів в Тернопільській обл.).

Таблиця 3 – Орієнтовні дані для порівняння способів виготовлення лопатевої спіралі

Номер способу з табл. 2	Спосіб №1 з табл. 2	Спосіб №2 з табл. 2	Спосіб №3 з табл. 2	Спосіб №4 з табл. 2	Спосіб №5 з табл. 2	Спосіб №6 з табл. 2
Відходи матеріалу, %	65	30	30	30	-	15
Витрати електроенергії обладн., год./кВт:						
- 1 операція:	8,3	12	7,5	7,5	1,05	1,05
- 2 операція:	3,2	8,3	8,3	1,05	7,5	7,5
- 3 операція:		3,2				
Тип і марка обладнання:						
- 1 операція:	1. Прес КД 2128 і спеціальний штамп;	1. Спеціальний прокатний стан;	1. Верстат 16E16КП і спеціальне оснащення;	1. Верстат 16E16КП і спеціальне оснащення;	1. Шліф-машина кутова Dnipro-M GL-125S;	1. Шліф-машина кутова Dnipro-M GL-125S;
- 2 операція:	2. Зварний інвенторний апарат Tesla Weld MMA 245.	2. Прес КД 2128 і спеціальний штамп;	2. Прес КД 2128 і спеціальний штамп.	2. Шліф-машина кутова Dnipro-M GL-125S.	2. Верстат 16E16КП і спеціальне оснащення.	2. Верстат 16E16КП і спеціальне оснащення.
- 3 операція:		3. Зварний інвенторний апарат Tesla Weld MMA 245.				
Тривалість операції, м/п/хв.:						
- 1 операція:	5,0	2,5	3,0	3,0	1,0	20,0
- 2 операція:	60,0	5,0	5,0	10,0	3,0	3,0
- 3 операція:		90,0				
Розряд робітника:						
- 1 операція:	2	5	5	5	4	4
- 2 операція:	4 і 2	2	2	4	5	5
- 3 операція:		4 і 2				

Джерело: розроблено авторами

Результати розрахунку виробничої собівартості виготовлення 1 м/п лопатевої спіралі при використанні різних способів виготовлення відображено в таблиці 4. При цьому приймалось, що вартість повернених відходів становитиме 5% від початкової вартості матеріалів, а загальнозаводські витрати приймались у розмірі 200% від заробітної плати виробничих робітників.

Таблиця 4 – Результати розрахунків виробничої собівартості виготовлення 1 м/п лопатевої спіралі за окремими способами

Елементи витрат, грн.	Спосіб №1 з табл. 2	Спосіб №2 з табл. 2	Спосіб №3 з табл. 2	Спосіб №4 з табл. 2	Спосіб №5 з табл. 2	Спосіб №6 з табл. 2
Сировина і основні матеріали (з врахуванням повернення відходів)	95,48	66,88	66,88	66,88	132,1	131,11
Зарплата виробничих робітників	117,56	177,22	7,8	14,03	4,63	24,48
Енергія на технологічні цілі	8,72	10,75	2,39	1,51	1,16	7,9
Загальнозаводські витрати	235,12	354,44	15,6	28,06	9,26	48,96
Разом виробнича собівартість	456,88	609,29	92,67	110,48	147,15	212,45

Джерело: розроблено авторами

Аналізуючи дані таблиці 4 можна зробити висновок, що найбільш ефективним в економічному плані способом виготовлення лопатевих спіралей є навивання щільним пакетом спіралей по внутрішньому торцевому профілю з прямокутних заготовок з подальшим вирубування (вирізання) сегментних отворів (вилучень) і калібруванням на заданий крок, як загалом і інші методи, які використовують навивання (способи № 4 – № 6 з табл. 2). Виготовлення лопатевих спіралей іншими способами з використанням штампування (спосіб № 1 з табл. 2) чи прокатування (спосіб № 2 з табл. 2) є в рази дорожчим.

Висновки. 1. При проведенні технологічного проектування лопатевих гвинтових робочих органів змішувачів проаналізовано типові їхні конструктивні схеми і розроблено найбільш технологічні способи їх виготовлення з використанням процесів штампування, прокатування і навивання. Визначено основні конструктивно-технологічні параметри способів виготовлення лопатевих гвинтових робочих органів змішувачів навиванням і встановлено основні фактори, які впливають на їх технологічне проектування.

2. Визначено технологічні особливості конструктивних параметрів лопатевих спіралей змішувачів, які виготовлені різними способами з листового прокату, стрічки чи Г-подібного профілю (кутника), а також охарактеризовано найбільш вживані конструкційні та супутні матеріали для їх виготовлення.

3. Проведено економічний розрахунок окремих способів виготовлення лопатевих спіралей змішувачів і встановлено, що найбільш ефективним в економічному плані способом їх виготовлення є навивання щільним пакетом спіралей по внутрішньому торцевому профілю з прямокутних заготовок з подальшим вирубування (вирізання) сегментних отворів (вилучень) і калібруванням на заданий крок, як загалом і інші методи, які використовують навивання (способи № 4 – № 6 з табл. 2). Виготовлення лопатевих спіралей іншими способами з використанням штампування (спосіб № 1 з табл. 2) чи прокатування (спосіб № 2 з табл. 2) є в рази дорожчим.

Список літератури

1. Diachun A., Vasylykiv V., Korol O., Myhailiuk V., Golovaty I., Kuras A. Investigation of geometrical parameters in screw surfaces whirling process. *Scientific Journal of TNTU*. 2021. Vol. 101, No. 1. P. 68–78. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.01.068
2. Feng Guang- liang, Bai Yin-shan. Some moulding ways of spiral vane. *Coal Mine Machinery*. 2006 Vol. 27, No. 9. P. 835-849.
3. 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.
4. 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*. 2016. Vol. 49, № 2. P.77-82.
5. 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/753-755.1386>
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*. 2013. 6(19). P. 3584–3587. <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 Agricultrae*. 2017. No. 2. P. 36–41. <https://doi.org/10.1515/ata-2017-0007>
8. Ivan Hevko, Andrii Diachun, Oleg Lyashuk, Yuriy Vovk, Andriy Hupka. Study of Dynamic and Power Parameters of the Screw Workpieces with a Curved Profile Turning. *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange: Book of Abstracts of the 4th International Conference, June 8-11, 2021. Sumy: IATDI, 2021. Vol. 1. P. 385-394.*
9. Vasylykiv V., Pylypets M., Danylchenko L., Radyk D. Investigation of deflections of winded screw flights and auger billets in the processes of their manufacture. *Scientific Journal of TNTU*. 2021. Vol. 104, No. 4. P. 33–43. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.04.033
10. Васильків В. В. Розвиток науково-прикладних основ розроблення технологій виробництва гвинтових і шнекових заготовок з використанням уніфікації: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техніч. наук: спец. 05.02.08. Львів, 2015. 48 с.
11. Васильків В. В., Радик Л. Д., Гевко І. Б.. Технологічні та конструктивні особливості виготовлення гвинтових заготовок з листового прокату. *Наукові нотатки*. 2004. Вип. 14. С. 12–18.
12. Технологічні основи формотворення різнопрофільних гвинтових заготовок / Гевко Б. М., Пилипець М. І., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль: Вид-во ТДТУ ім. І. Пулюя, 2009. 457 с.
13. Гевко Ів., Клендій В. Технологічність конструкцій гвинтових секційних робочих органів. *Вісник ТНТУ*. 2015. № 3, т. 79. С. 148-155.
14. Гудь В.З. Механіко-технологічні основи розробки багатофункціональних секційних шнеків для зернового матеріалу: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техніч. наук: спец. 05.05.11. Тернопіль, 2021. 44 с.
15. Гнучкі гвинтові конвеєри: проектування, технологія виготовлення, експериментальні дослідження / Гевко І. Б. та ін. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 207 с.
16. Ляшук О. Л., Дячун А. Є., Клендій В. М., Третьяков О. Л. Дослідження силових параметрів процесу зміцнення гвинтових поверхонь робочих органів деформуючими пуансонами. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2018. № 1 (66). С. 38-43.
17. Ляшук О. Л., Дячун А. Є., Третьяков О. Л. Дослідження деформації заготовки в процесі нарізання зовнішніх радіусних канавок пристроєм із декількома різцями. *Перспективні технології та прилади*. 2018. Вип. 12. С. 105-110.
18. Пилипець М. І., Васильків В. В., Радик Д. Л., Пилипець О. М. Передумови розроблення комбінованих операцій виготовлення гвинтових і шнекових заготовок методом обробки металів тиском. *Перспективні технології та прилади*. 2021. Вип. 18. С. 112–123.
19. 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.
20. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дячун А.Є. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів : монографія. Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2014. 280 с.
21. Технологічні основи формотворення спеціальних профільних гвинтових деталей / Гевко Б.М. та ін. – Тернопіль: ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008. 367 с.

References

1. Diachun, A., Vasykiv, V., Korol, O., Myhailiuk, V., Golovaty, I. & Kuras, A. (2021). Investigation of geometrical parameters in screw surfaces whirling process. *Scientific Journal of TNTU, Vol. 101, No. 1*, P. 68–78. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.01.068 [in English].
2. Feng, Guang-liang & Bai, Yin-shan (2006). Some moulding ways of spiral vane. *Coal Mine Machinery, Vol. 27, No. 9*, P. 835-849 [in English].
3. Gheorghe Pleșu (2014). Package of calculus, drawing and design of the rolling tools for manufacturing of the helical surfaces. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies, No 1*, P. 65-70 [in English].
4. 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, Vol. 49, №2, P. 77-82* [in English].
5. Li Zheng Feng & Li Qiang Jiang (2013). Design of combined helical blade manufacturing device. *Advanced Materials Research, Vol. 753–755*, 1386–1390. Crossref. Doi: 10.4028/www.scientific.net/amr/753-755.1386. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR> [in English].
6. Quan-Quan Han & Ri-Liang Liu (2013). Mathematical model and tool path calculation for helical groove whirling. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 6 (19)*, 3584–3588 <https://doi.org/10.19026/rjaset.6.3563> [in English].
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 Agricultrae, No. 2*, 36-41. <https://doi.org/10.1515/ata-2017-0007> [in English].
8. Hevko, I., Diachun, A., Lyashuk, O., Vovk, Y. & Hupka, A. (2021). Study of Dynamic and Power Parameters of the Screw Workpieces with a Curved Profile Turning. *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange: Book of Abstracts of the 4th International Conference, June 8-11, 2021. Sumy: IATDI, 2021. Vol. 1. P. 385-394* [in English].
9. Vasykiv, V., Pylypets, M., Danylchenko, L. & Radyk, D. (2021). Investigation of deflections of winded screw flights and auger billets in the processes of their manufacture. *Scientific Journal of TNTU, Vol. 104, No. 4*, P. 33–43. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.04.033 [in English].
10. Vasykiv, V. V. (2015). Rozvytok naukovo-prykladnykh osnov rozroblennia tekhnolohij vyrobnytstva hvyntovykh i shnekovykh zahotovok z vykorystanniam unifikatsii [Development of the scientific and applied foundations of the development of technologies for the production of screw and auger blanks using unification]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. L'viv [in Ukrainian].
11. Vasykiv, V. V., Radyk, L. D. & Hevko, I. B. (2004). Tekhnolohichni ta konstruktyvni osoblyvosti vyhotovlennia hvyntovykh zahotovok z lystovoho prokatu [Technological and constructive features of the production of screw blanks from rolled sheet]. *Naukovi notatky – Scientific notes, 14*, 12–18 [in Ukrainian].
12. Hevko, B.M. et al. (2009). *Tekhnolohichni osnovy formotvorennia riznoprofil'nykh hvyntovykh zahotovok [Technological bases of shaping of various profile screw blanks]*. Ternopil: Publication of TDTU named after I. Pulyuya [in Ukrainian].
13. Hevko, Iv. (2015). Tekhnolohichnist' konstruksij hvyntovykh sektiynnykh robochykh orhaniv [Technological features of designs of helical sectional working bodies]. *Visnyk TNTU – Bulletin of TNTU, 79, 3, 148-155* [in Ukrainian].
14. Hud', V.Z. (2021). Mekhaniko-tekhnolohichni osnovy rozrobky bahatofunktsional'nykh sektiynnykh shnekiv dlia zernovoho materialu [Mechanical and technological basics of the development of multifunctional sectional screws for grain material]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Ternopil' [in Ukrainian].
15. Hevko, I. B. et al. (2019). *Hnuchki hvyntovi konveiyery: proektuvannia, tekhnolohiia vyhotovlennia, eksperymental'ni doslidzhennia [Flexible screw conveyors: design, manufacturing technology, experimental studies]*. Ternopil': FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
16. Liashuk, O. L., Diachun, A. Ye., Klendij, V. M. & Tret'iakov, O. L. (2018). Doslidzhennia sylovykh parametriv protsesu zmitsnennia hvyntovykh poverkhon' robochykh orhaniv deformuiuchymy puansonamy [Study of force parameters of the process of strengthening the helical surfaces of working bodies by deforming punches]. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovysch – Exploration and development of oil and gas deposits, 1 (66)*, 38-43 [in Ukrainian].
17. Liashuk, O. L., Diachun, A. Ye. & Tret'iakov, O. L. (2018). Doslidzhennia deformatsii zahotovky v protsesi narizannia zovnishnikh radiusnykh kanavok prystroiem iz dekil'koma riztsiamy [Study of deformation of the workpiece in the process of cutting external radius grooves with a device with several cutters]. *Perspektyvni tekhnolohii ta prylady – Promising technologies and devices, 12*, 105-110 [in Ukrainian].

18. Pylypets', M. I., Vasyl'kiv, V. V., Radyk, D. L. & Pylypets', O. M. (2021). Peredumovy rozroblennia kombinovanykh operatsij vyhotovlennia hvyntovykh i shnekovykh zahotovok metodom obrobky metaliv tyskom [Prerequisites for the development of combined operations for the production of screw and auger workpieces by the method of pressure metal processing]. *Perspektyvni tekhnolohii ta prylady – Promising technologies and devices*, 18, 112–123 [in Ukrainian].
19. Pylypets', M. I. (2002). Naukovo-tekhnolohichni osnovy vyrobnytstva navyvnykh zahotovok detalej mashyn [Scientific and technological basis of production of winding blanks of machine parts] *Extended abstract of Doctor's thesis*. L'viv [in Ukrainian].
20. Rohatyns'kyj, R.M., Hevko, I.B. & Diachun, A.Ye. (2014). *Naukovo-prykladni osnovy stvorennia hvyntovykh transportno-tekhnolohichnykh mekhanizmiv [Scientific and applied foundations of the creation of screw transport and technological mechanisms]*. Ternopil' : Vyd-vo TNTU imeni Ivana Puliuia [in Ukrainian].
21. Hevko, B.M. et al. (2008). *Tekhnolohichni osnovy formoutvorennia spetsial'nykh profil'nykh hvyntovykh detalej [Technological bases of forming of special profile screw parts]*. Ternopil': TDTU imeni Ivana Puliuia [in Ukrainian].

Ivan Hevko, Prof., DSc., **Roman Leshchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andriy Briksa**, post-graduate, **Oleg Stibailo**, post-graduate, **Serhiy Koval**, post-graduate
Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu, Ternopil, Ukraine

Features of structures and technological design of working bodies of bladed screw mixers

Blade screw mixers are typical tools for mixing building materials, compound feed, various types of products in the food industry, etc. The principle of their operation uses a combination of the operation of moving multicomponent mixtures with the operation of mixing them. Features of bladed screw working bodies of mixers are the arrangement of blades along a helical line along the axis of the shaft, on which they are, as a rule, immovably fixed. However, separate structures of working bodies can be located on the shaft with the possibility of rotation.

The production of the working body of the blade screw mixer in the most technological ways may involve the following sequence of technological operations:

1. Winding a spiral of the appropriate diameter. Drilling holes with a drill head on the end surface of a spiral wound with a dense package on the edge of the spiral, which is installed in the conductor (provided that a mechanical connection will be used in the design of the auger). Calibrating the helix to a given pitch. Installation (screwing) of a spiral on a hollow shaft with a given pitch. Fixation of the spiral on the hollow shaft (welded connection). Production of blade elements of the appropriate profile (stamping, cutting). Drilling of mounting holes on the end surface of the blade elements (provided that a mechanical connection will be used in the design of the auger). Fastening the blade elements on the spiral: option 1: in the holes with a bolt or rivet connection; option 2: using a welded connection.

2. Winding a spiral of the appropriate diameter from a rectangular profile blank. Cutting (cutting) segmental openings (removals) of the appropriate size and profile on the end surface of a dense package wound on the edge of a spiral to form the necessary blade elements on it. Calibrating the helix to a given pitch. Installation (screwing) of a spiral on a hollow shaft with a given pitch. Fixation of the spiral on the hollow shaft (welded connection).

3. The production of an L-shaped bladed spiral involves the cutting (cutting) of segmental holes (removals) of the appropriate size and profile on the end surface of the L-shaped profile workpiece to form the necessary blade elements on it (the operation can also be used for a rectangular workpiece). Winding the L-shaped spiral on the frame with an internal continuous cylindrical part of the corresponding diameter. Calibration of the L-shaped spiral to a given pitch. Drilling of fastening holes at the ends on the end surface of the cylindrical part of the L-shaped spiral.

The manufacturing technology of bladed screw working bodies of mixers significantly affects their technical and economic indicators and is ensured by the use of various methods. Technological features of the design parameters of the blade spirals of the mixers, which are made in various ways from rolled sheet, tape or L-shaped profile (angle). The results of calculating the production cost of manufacturing 1 m/p of a bladed spiral using different manufacturing methods showed that the most economically effective method of manufacturing bladed spirals is winding a dense package of spirals along the inner end profile from rectangular blanks followed by cutting (cutting out) segmental holes (removals) and calibration to a given step, as in general and other methods that use winding. The production of blade spirals by methods using stamping or rolling is many times more expensive.

blades, screw working body, mixer, method, technological design

Одержано (Received) 30.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 30.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621. 793.724

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.35-40](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.35-40)

М.М. Студент, пров. наук. співр., проф., д-р техн. наук
Фізико-механічний інститут ім. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна
e-mail: student.phmi@gmail.com

С.І. Маркович, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: marko60@ukr.net

Х.Р. Задорожна, наук. співр., канд. техн. наук, **В.М. Гвоздецький**, ст. наук. співр., канд. техн. наук
Фізико-механічний інститут ім. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна
e-mail: 880988@ukr.net, gvosdetcki@gmail.com

Залежність структури електродугових покриттів від параметрів напилення деталей транспортної техніки

Досліджено умови плавлення та структуру покриттів, напилених методом електродугового напилення залежно від тиску повітряного струменю. Показано, що збільшення тиску металоповітряного потоку від 0,6 до 1,2 МПа підвищує швидкість струменю від 300 до 600 м/с, при цьому дисперговані краплини досягають швидкості від 120 до 220 м/с. Відповідно це викликає зменшення товщини ламелей електродугового покриття, а також сприяє формуванню підвищеної кількості оксидної фази на поверхні ламелей. Це збільшує мікротвердість покриття із У8 із 350-400 НВ за тиску 0,6 МПа. до 450...500 НВ за тиску 1,2 МПа. Мікротвердість покриттів із 90Х17РЗГС зростає від 600 до 740 НВ.

структура, напилення, сопло Лавалю, швидкість струменю, мікротвердість, деталь, транспортна техніка

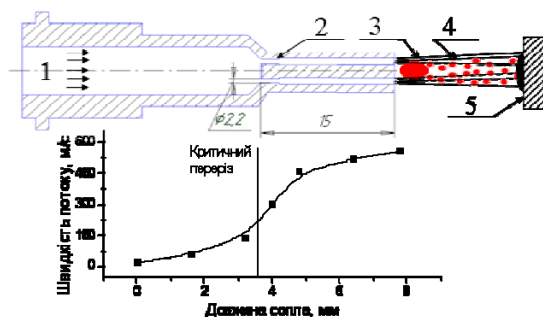
Постановка проблеми. Використання спеціальних порошкових дротів для електродугового напилення дозволяє отримувати покриття із високою зносостійкістю [1,2]. Однак недостатня адгезія та когезія отриманих покриттів не дозволяє застосовувати ці покриття за підвищених робочих навантажень [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Літературні джерела засвідчують, що для підвищення механічних характеристик газотермічних покриттів використовують надзвуковий газовий струмінь, який транспортує розплавлені краплини до напилюваної поверхні, підвищуючи їх кінетичну енергію [4,5]. Використання паливних газів для отримання надзвукового струменю в процесі електродугового напилення покриттів лише частково підвищує фізико-механічні характеристики покриттів, але ускладнює і суттєво здорожує обладнання та процес напилення [6,7,8]. У даній статті для підвищення механічних характеристик електродугових покриттів запропоновано застосовувати надзвуковий повітряний струмінь за використання сопла Лавалю та підвищення тиску повітряного струменю з 0,6 до 1,0...1,2 МПа.

Постановка завдання. Мета дослідження: встановити вплив тиску повітряного струменю на структуру електродугових покриттів.

Виклад основного матеріалу. Електродугові покриття товщиною 1 мм наносили металізатором ФМІ-2 котрий спроектований та виготовлений на виробничих потужностях Фізико-механічного інституту НАН України. В роботі застосовувались електродні дроти суцільного перерізу – У8, та порошкові дроти 90Х17РЗГС. Покриття напиляли за наступних режимів: напруга $U = 32$ В, струм $I = 150$ А, тиск повітряного потоку 0,6, 1,2 МПа з витратою $1,3 \text{ м}^3/\text{хв}$, відстань від дуги до поверхні зразка складала 120 мм. Здійснювалась попередня обробка поверхні корундом. Мікротвердість покриття визначали за допомогою приладу ПМТ-3 при навантаженні 200 г.

Електродугове напилення здійснювали в режимі надзвукової швидкості металоповітряного струменю з числом Маха 2. При цьому використовували сопло Лавалю в котрому застосовувався метод вертикального розташування двох повітряних каналів у соплі, що мали критичний діаметр кожного отвору 2,2 мм. (рис. 1), довжиною надзвукової частини 15 мм.

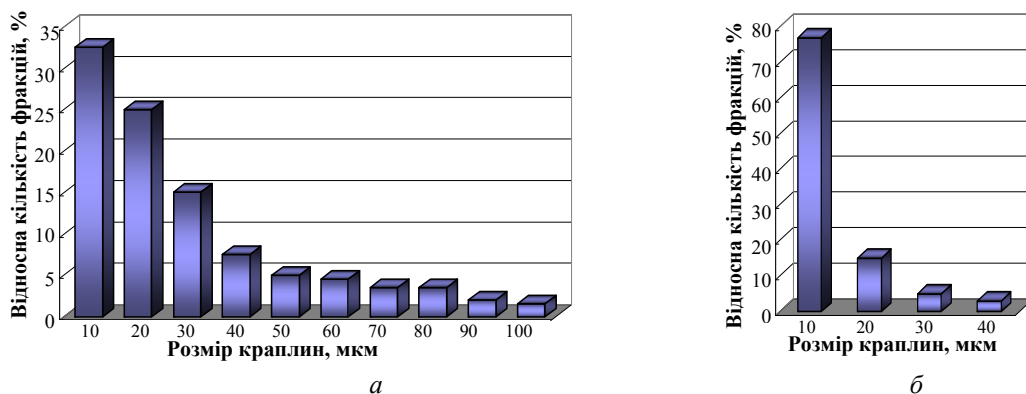


1 – струмінь повітря 2 – критичний переріз сопла, 3 – розплав з електродних дротів,
4 – метало повітряний потік, 5 – дослідний зразок

Рисунок 1 – Схема сопла електродугового розпилювача з ефектом надзвукового потоку
Джерело: розроблено авторами

Визначено, що зростання тиску струменю від 0,6 до 1,2 МПа викликає збільшення швидкості потоку у 2 рази в діапазоні від 300 до 600 м/с (рис. 2). Зростає також швидкість диспергованих часток електродних порошкових дротів від 60 – 90 м/с до 160 – 220 м/с, при цьому їх розмір зменшується.

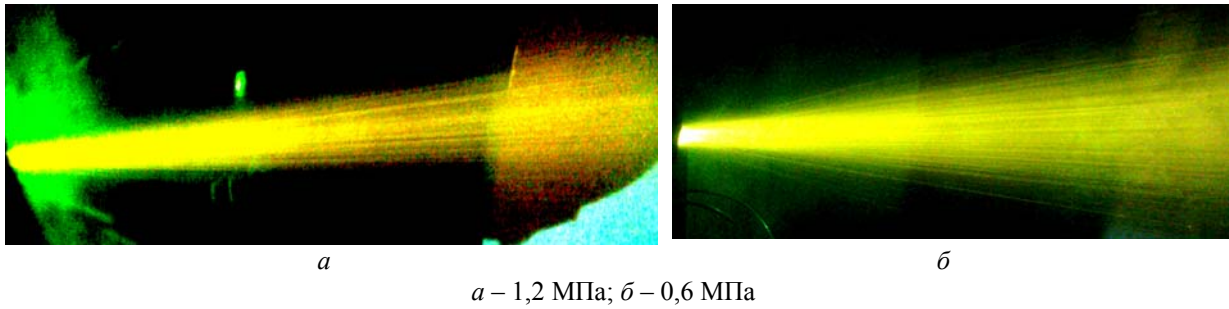
Крім того забезпечується вища температура розплавлених часток при вдарянні об напилювану поверхню за рахунок зменшення часу польоту диспергованих краплин від дуги до напилюваної поверхні. При цьому зменшується кут розширення металоповітряного струменю (рис. 3) із 30° до 15° .



а – 0,6 МПа; б – 1,2 МПа

Рисунок 2 – Фракційний розподіл краплин із ПД 90Х17РЗГС

Джерело: розроблено авторами



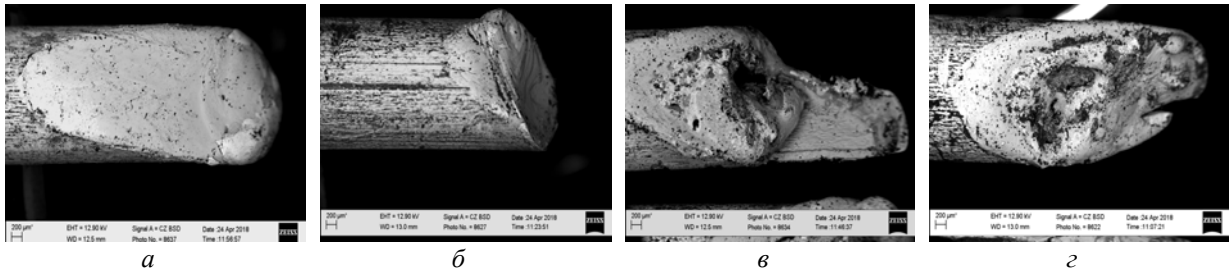
а

б

а – 1,2 МПа; б – 0,6 МПа

Рисунок 3 – Вплив тиску повітряного струменю на кут розширення металоповітряного потоку
Джерело: розроблено авторами

Збільшення тиску повітряного струменю змінює умови евакуації краплин із торців електродних дротів (рис. 4). Зона плавлення дроту суттєво зростає, зменшується густина струму на торцях дроту. Це зменшує температуру розплаву (температура розплаву за тиску 0,6 МПа становить 2000...2200°С) але збільшує час знаходження розплаву між торцями дроту. Це дозволяє повніше розчинити тугоплавкі шихтові матеріали у розплаві сталльної оболонки та підвищує рівень диспергування продуктів розплаву з електродних дротів і забезпечує зменшення розміру краплин при формуванні покриття.

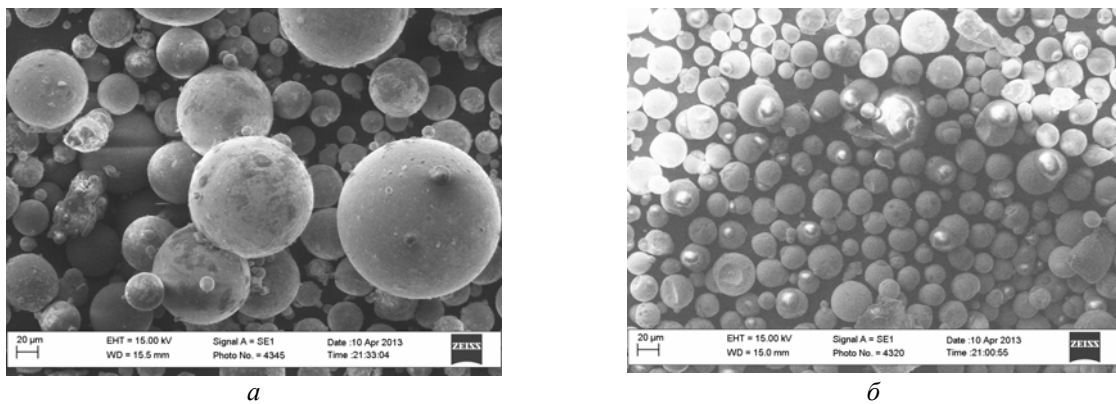


а – У8 (1,2 МПа); б – У8 (0,6 МПа); в – 90Х17Р3ГC (1,2МПа); з – 90Х17Р3ГC (0,6МПа)

Рисунок 4 – Вид торців порошкового дроту У8 та ПД Х18Р3С2 після наплення за різних тисків повітряного струменю

Джерело: розроблено авторами

При застосуванні в процесі розпилення тиску повітря 0,6 МПа розмір диспергованих краплин складає від 30 до 100 мкм, (рис. 5 а), а при тиску повітря 1,2 МПа – 10...30 мкм і менше (рис. 5б). Проведені металографічні дослідження підтверджують результати фракційного розподілу краплин за тиску 1,2 МПа (рис. 2б).



а

б

а – 0,6 МПа; б – 1,2 МПа

Рисунок 5 – Розмір та форма краплин отриманих із ПД 90Х17Р3ГC за різного тиску повітряного струменю

Джерело: розроблено авторами

В процесі формування покриття на поверхні диспергованих краплин розплаву формуються оксидні плівки різного складу. При цьому відбувається часткове або повне їх окиснення через зменшення розмірів краплин, котре забезпечує зростання площі їх контактної взаємодії з повітрям і як наслідок, збільшується кількість оксидів і формування композиційної структури покриття (рис.5).

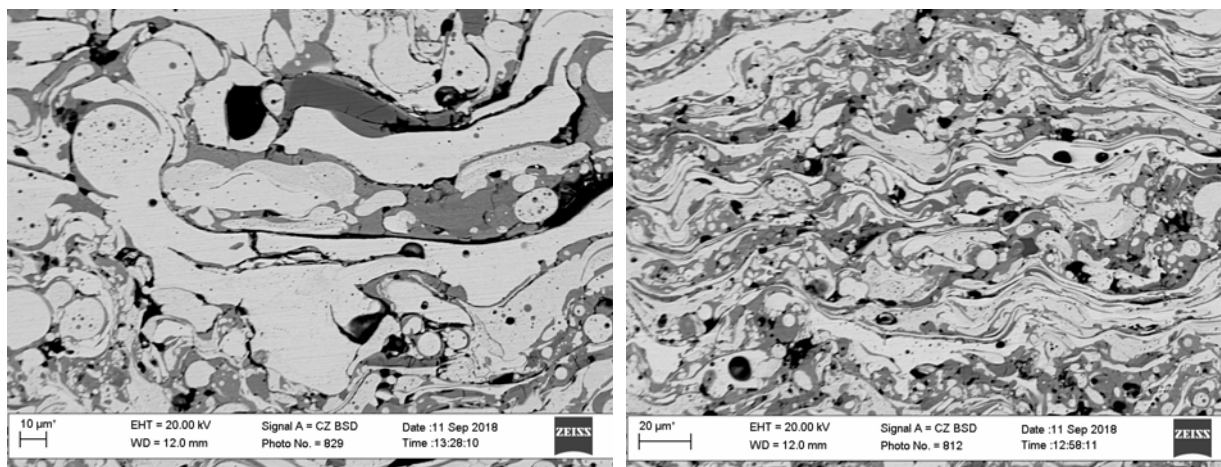
За тиску розпилення 0,6 МПа вміст оксидів у покритті зростає у 1,7 рази. Так вміст кисню у структурі покриття із дроту У8 за тиску 0,6 МПа становить 7 мас.%, а за тиску –1,2 МПа становить 12 мас % (табл. 1). Вміст кисню у покритті із ПД90Х17РЗГС із підвищенням тиску не зростає. Це зумовлено наявністю у покритті кремнію та бору які сильно сповільнюють окиснення розплавлених краплин як за тиску 0,6МПа так із тиску 1,2 МПа.

Таблиця 1 – Вплив тиску повітряного струменю на кількість кисню у покриттях

Електродні дроти	Тиск повітряного струменю, МПа	
	0,6	1,2
	Вміст кисню у покритті, % мас / % ат	
У8	7,2/17,8	12,3/29,6
ПД90Х17РЗГС	4,5/11,5	4,3/10,6

Джерело: розроблено авторами

Як правило оксидна фаза (включення темного кольору) розташовується між ламелями покриття (рис. 6), але іноді покриття формується ламелями в котрих повністю окиснені краплин. У покриттях із 90Х17РЗГС утворюється суттєво менше оксидних фаз (рис. 7).



а

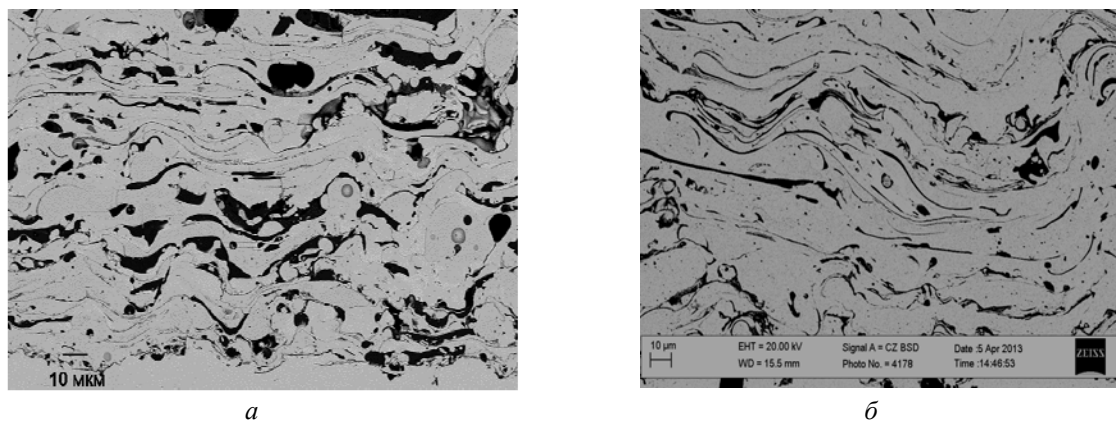
б

а – 0,6 МПа; б – 1,2 МПа

Рисунок. 6 – Структура покриття із У8 напиленого за різного тиску повітряного струменю

Джерело: розроблено авторами

Слід зазначити що при збільшенні тиску повітряного струменю кількість кисню у покриттях незначно зменшується. При цьому товщина оксидних плівок в ламелях покриття при тиску розпилення 1,2 МПа становить 1...3 мкм (рис. 7), при цьому товщина плівок за тиску 0,6 МПа може досягати 20 мкм.



а

б

а – 0,6 МПа; б – 1,2 МПа

Рисунок 7 – Структура покриття із 90X17P3ГС напиленого за різного тиску повітряного струменю
Джерело: розроблено авторами

Разом з тим мікротвердість оксидних включень заліза – вюститу, магнетиту, та гематиту в напиленому покритті з нелегованого сталюого дроту досягає меж 700-800 HV. Це забезпечує мікротвердість напиленого покриття із У8 на рівні 350-400 HV за тиску 0,6 МПа.

Разом з тим при напилення цього ж покриття за тиску 1,2 МПа розмір ламелей та оксидів зменшується, а об'ємний вміст їх зростає, забезпечуючи підвищення мікротвердості на рівні 450...500 HV. При цьому мікротвердість покриттів із 90X17P3ГС зростає від 800 до 910 HV.

Висновки

1. Дослідженням визначено, що збільшення тиску повітряного струменю від 0,6 до 1,2 МПа викликає підвищення швидкості повітряного струменю від 300 до 600 м/с, а швидкість диспергованих часток розплаву зростає від 120 до 220 м/с.

2. Зростання тиску повітряного струменю від 0,6 до 1,2 МПа викликає зменшення товщини ламелей покриття, при цьому спостерігається збільшення оксидної фази у напиленому покритті та зростання твердості покриття.

Список літератури

1. 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.
2. Abrasive Wear Resistance and Tribological Characteristics of Electrometallized Composite Coatings / Student, M.M. et al. *Materials Science*. 2022. 58(1). P. 96–104.
3. Багатофункціональні електродугові покриття : монографія / М. М. Студент та ін. - Львів : Простір-М, 2018. 335 с.
4. 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.
5. Вплив діаметра електродних порошкових дротів на механічні характеристики електродугових покриттів / Студент М.М. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. Вип. 3(34). С. 32-44.
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. Mechanical Properties of Arc Coatings Sprayed with Cored Wires with Different Charge Compositions / Student M. et al. *Coatings*. 2022. №12(7). 925.
8. Абразивна зносостійкість та трибологічні характеристики електрометалізаційних композиційних покриттів / М.М. Студент та ін. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2022. № 1. С. 90-97.

References

1. Wielage, B. et al. Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures (2013). *Surface and coating technology*, No.220, 27–35 [in English].
2. Student, M.M. et al. (2022). Abrasive Wear Resistance and Tribological Characteristics of Electrometallized Composite Coatings. *Materials Science*, 58(1), 96–104 [in English].
3. Student, M. M., Pokhmurska, H. V., Hvozdet's'kyj, V. M. et al. (2018). *Bahatofunktsional'ni elektroduhovi pokryttia [Multifunctional electric arc coatings]*. Lviv : Prostir-M [in Ukrainian].
4. Pokhmurskyi, V.I. et al. (2013). Arc-sprayed iron-based coatings for erosion-corrosion protection of boiler tubes at elevated temperatures. *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol.22, P. 34-41[in English].
5. Student, M.M. et al. (2020). Vplyv diametra elektrodnykh poroshkovykh drotiv na mekhanichni kharakterystyky elektroduhovyykh 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].
6. Stupnyts'kyi, T.R. et al. (2016). 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. *Materials Science*, Vol. 52, No. 2, P. 165–172 [in English].
7. Student, M. et al. (2022). Mechanical Properties of Arc Coatings Sprayed with Cored Wires with Different Charge Compositions. *Coatings*, 12(7), 925 [in English].
8. Student, M.M. et al. (2022). Abrazyvna znosostykist' ta trybolohichni kharakterystyky elektrometalizatsijnykh kompozytsijnykh pokryttiv [Abrasive wear resistance and tribological characteristics of electrometallization composite coatings]. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv – Physicochemical Mechanics of Materials*, 1, 90-97 [in Ukrainian].

Mykhajlo Student, Prof, Leading Researcher

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

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

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Khrystyna Zadopozna, PhD tech. sci., Research,

Volodymyr Hvozdet's'kii, PhD tech. sci., Senior Research

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

Dependence of the structure of electric arc coatings on the parameters of sputtering of parts of transport equipment

The use of special flux-cored wires for electric arc spraying allows for coatings with high wear resistance. However, the insufficient adhesion and cohesion of the resulting coatings does not allow these coatings to be used under increased operating loads. To improve the mechanical characteristics of gas-thermal coatings, a supersonic gas jet is used to transport molten droplets to the sprayed surface, increasing their kinetic energy. It is proposed to apply a supersonic air jet using a Laval nozzle and increasing the air jet pressure from 0.6 to 1.0...1.2 MPa. The aim of the study is to determine the effect of air jet pressure on the structure of electric arc coatings.

It has been determined that an increase in the air jet pressure from 0.6 to 1.2 MPa causes a 2-fold increase in the air flow velocity from 300 to 600 m/s. At the same time, the velocity of droplets dispersed by the air jet during the spraying of electrode cored wires increases from 60-90 m/s to 160-220 m/s, and their size decreases.

Reducing the flight time of the dispersed droplets from the arc to the sprayed surface ensures their higher temperature when they hit the sprayed surface. Increasing the air jet pressure also reduces the expansion angle of the metal-air jet from 30° to 15°.

The microhardness of iron oxide inclusions - magnetite, wustite and hematite - in the coating of unalloyed steel wire sputtered is in the range of 700-800 HV. This ensures a microhardness of the U8 coating of 350-400 HV at a pressure of 0.6 MPa.

Sputtering the same coating at a pressure of 1.2 MPa reduces the size of the lamellae and oxides, and their volume content increases, which increases the microhardness to 450...500 HV. The microhardness of coatings made of 90X17R3GS increases from 800 to 910 HV.

It was found that an increase in air jet pressure from 0.6 to 1.2 MPa provides an increase in air jet velocity from 300 to 600 m/s, and the velocity of dispersed droplets from 120 to 220 m/s.

structure, sputtering, Laval nozzle, jet speed, microhardness, detail, transport equipment

Одержано (Received) 02.11.2023

Прорецензовано (Reviewed) 28.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 621. 432

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.41-47](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.41-47)**А.В. Рутковський**, ст. наук. співр., канд. техн. наук*Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України, м. Київ, Україна**e-mail: coating@ipp.kiev.ua***С.І. Маркович**, доц., канд. техн. наук, **С.О. Магопець**, доц.канд. техн. наук,**В.С. Маркович**, здобувачка третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: marko60@ukr.net, e-mail: magserg@ukr.net, e-mail: markovich241082@gmail.com*

Зносостійкість титанового сплаву ВТ1-0 з модифікованою поверхнею в умовах абразивного впливу

В роботі проведено дослідження зносостійкості титанового сплаву ВТ1-0 з модифікованою поверхнею в умовах абразивного впливу. Для проведення вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі і формування дифузійних шарів на поверхні використовувалася універсальна установка «ВПА-1» Технологічні параметри вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі: температура – 550°C, тиск – 25-150 Па, час обробки – 10 годин, співвідношення реакційних газів – 80% Ar + 20% N₂. Дослідження зносостійкості проводили по схемі зношування вільним абразивом (метод Брінеля) відповідно до ГОСТ 23.208-79 та американського стандарту ASTM C 6568. Експеримент проводили при швидкості ковзання 0,158 м/с, навантаженні 20 кг (при плечі 272 мм) та шляху тертя 50 м. В якості еталону використовувалась сталь 45, загартована до твердості 480-500 НВ. Тілом для зношування служив диск із титанового сплаву ВТ1-0 діаметром 100 мм і товщиною 3,5 мм. В результаті дослідження встановлено що максимальна інтенсивність зношування титанового сплаву ВТ1-0 без зміцнення; вплив термоциклічного азотування підвищує зносостійкість сплаву ВТ1-0: у піску – 3 рази; у воді + пісок – 3,5 рази; у солі + пісок – 2,5 рази; вплив ізотермічного азотування підвищує зносостійкість сплаву ВТ1-0: у піску – 4 рази; у воді + пісок – 3,5 рази; у солі + пісок – 2,5 рази.

іонне азотування, імпульсний режим, титановий сплав, зносостійкість, вільний абразив

Постановка проблеми. Витрати відновлення деталей машин у результаті зносу величезні і щорічно збільшуються. На симпозіумі, проведеному США щодо зниження зносу у техніці, загальна думка звелася до того, що управління зношуванням є центральною ланкою у вирішенні таких національних проблем, як економія енергії, скорочення витрат матеріалів, забезпечення надійності та безпеки механічних систем [1]. Проблема зносостійкості є актуальною і для України, і насамперед у зв'язку зі значним зносом обладнання та техніки, відсутністю коштів на його відновлення та реконструкцію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Азотування значно підвищує зносостійкість металів і сплавів [2-3]. Основними споживачами технології вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі є автомобільні, тракторні, авіаційні, суднобудівні та судноремонтні, машино- та верстатобудівні заводи, заводи з виробництва сільськогосподарської техніки, насосного та компресорного обладнання, шестерень, підшипників, алюмінієвих профілів, енергетичних установок та ін. [3]. Наявність азоту в поверхневому шарі підвищує антифрикційні властивості пари тертя і перешкоджає схоплюванню при терті [4,5]. Застосування комбінованих методів азотування для формування зносостійких покриттів на титанових сплавах [6] збільшує

зону внутрішнього азотування і не дозволяє значно збільшити товщину нітридної зони і як наслідок, значно збільшити зносостійкість пари тертя, зокрема зносостійкість в абразивному середовищі та при сухому терті. В середовищі мастила висока твердість не є критерієм високої зносостійкості пари тертя. В цих умовах тертя необхідне оптимальне співставлення між твердістю і пластичністю азотованого шару.

Найважливішою метою азотування являється підвищення зносостійкості деталей [6-8]. Азотування забезпечує високу зносостійкість при абразивному зношуванні титанових сплавів. Зносостійкість зони внутрішнього азотування є значно меншою в порівнянні з нітридною зоною [7].

При дифузійному насиченні поверхні титанових сплавів азотом у тліючому розряді утворюються тверді розчини втілення, адже атомний радіус азоту складає 0,071 нм, що є приблизно у два рази менше, ніж у атомів титану [8]. Особливістю зміцнення при утворенні розчинів втілення є висока рухливість міжвузловин при порівняно низьких температурах. Взаємодія пружних полів, пов'язана з між вузловими атомами, дислокаціями, іншими дефектами кристалічної будови, призводить до направленої міграції міжвузловин та захвату домішок дефектами будови. Це сприяє гальмуванню дислокацій та зміцненню матеріалу. [9]

Як відомо, найбільшу небезпеку з точки зору забезпечення високого рівня зносостійкості титанових сплавів являють собою залишкові напруження розтягу. Вони сприяють розвитку при поверхневих тріщин, проникненню молекул зовнішнього середовища у витоки мікротріщин та прискорюють дифузію атомів домішків. У випадку дифузійного насичення поверхні азотом у тліючому розряді, упроваджений у матрицю атом азоту розсуває сусідні атоми, створюючи залишкові напруження стиску [7-9]. Ці напруження ефективно зберігають поверхню від руйнування напруженнями розтягу, які виникають при терті у задній області плям фактичного контакту та порівнюються за рівнем із характеристиками міцності матеріалів.

Обробка вакуумним іонним азотуванням в імпульсному режимі значно впливає на хімічні та адгезійні властивості поверхні зміцнених титанових сплавів. Утворення хімічних сполук у титанових сплавах за рахунок впровадження азоту або підвищення межі його концентрації змінює швидкість хімічних реакцій та кінетику зростання оксидних плівок, підвищує їх зчеплення з основою. Це призводить до зменшення інтенсивності утворення адгезійних вузлів схоплювання та сприяє покращенню трибологічних характеристик титанових сплавів [8-10].

Постановка завдання. Провести дослідження титанового сплаву зі зміцненим азотованим шаром для отримання експериментальних результатів щодо визначення закономірності впливу параметрів дифузійного насичення на зносостійкість в умовах абразивного впливу.

Виклад основного матеріалу. Для проведення вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі і формування дифузійних шарів на поверхні використовувалася універсальна установка «ВІПА-1» (рис. 1), розроблена в Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України. Технологічне обладнання виконано в класичному для іонного азотування двокамерному варіанті. Розміри деталей, що обробляють, до Ø 500 при висоті до 1400 мм.

Обробка в циклічному тліючому розряді відбувалась у вакуумній камері без додаткових нагріваючих пристроїв. Вакуумне іонне азотування в імпульсному режимі проводилось у режимі циклічної зміни температури, яка здійснюється періодичним включенням-вимиканням тліючого розряду у вакуумній камері.

Технологічні параметри вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі: температура – 550°C, тиск – 25-150 Па, час обробки – 10 годин, співвідношення

реакційних газів – 80% Ar + 20% N₂. Для експериментальних досліджень використовували зразки із титаного сплаву VT1-0 з розмірами 30x30 мм та товщиною 5 мм. Зміцнення поверхонь зразків відбувалося рівномірно по всьому периметру, що забезпечує рівномірну товщину дифузійного шару.



Рисунок 1 – Загальний вид установки ВПА-1

Джерело: Розроблено авторами

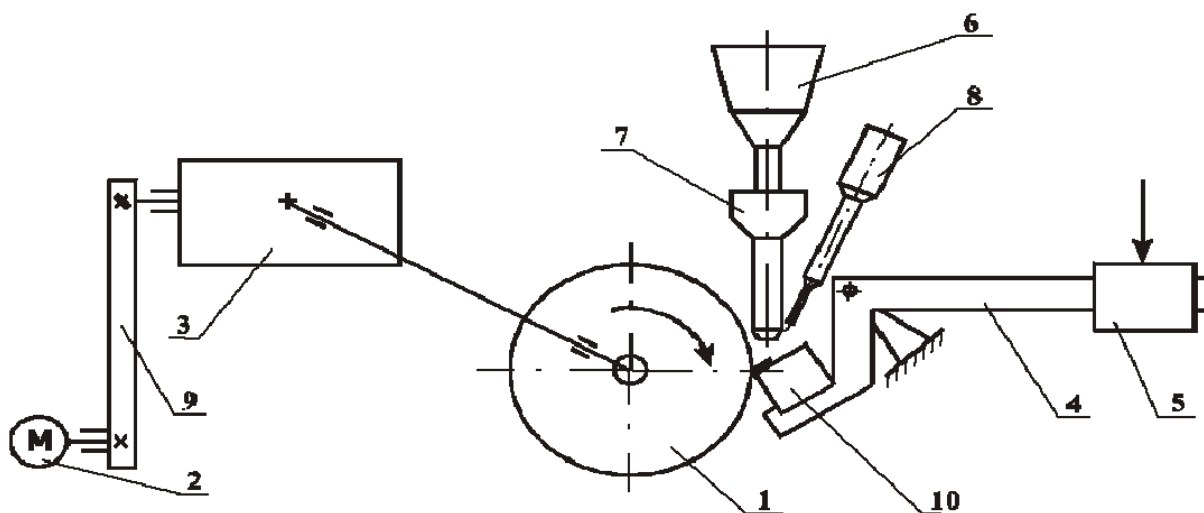
Дослідження зносостійкості зміцнених поверхневих шарів проводяться в три етапи: лабораторні, стендові і натурні (експлуатаційні дослідження) декілька методами з метою отримання достовірних результатів.

Аналіз умов експлуатації тертьових поверхонь більшості елементів конструкцій дозволив використовувати для стендових досліджень установку по схемі зношування вільним абразивом (метод Брінеля). Випробування на зношування проводили на експериментальній установці відповідно до ГОСТ 23.208-79 (рис. 2). Процес тертя моделювався у присутності вільного не жорстко закріпленого абразиву, що збігається з американським стандартом ASTM C 6568.

Експеримент проводили при швидкості ковзання 0,158 м/с, навантаженні 20 кг (при плечі 272 мм) та шляху тертя 50 м. В якості еталону використовувалась сталь 45, загартована до твердості 480-500 НВ. Тілом для зношування служив диск із титанового сплаву VT1-0 діаметром 100 мм і товщиною 3,5 мм. Після кожного циклу іспитів проводилась заміна диска. Для кожного зразка виконувались 3-кратні іспити.

В якості абразива використовувався кварцевий пісок (SiO₂) зернистістю 200...250 мкм. Перед випробуванням абразив просували (вологість не перевищувала 0,16%). Навантаження на зразок складало 150 Н, час одного іспиту 300 с. Витрати абразиву – $15-17 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$.

В установці частки абразиву, захоплювані диском який обертається, витирають лунку на кожній кромці зразка, який притискається з певним зусиллям до циліндричної поверхні диска (рис. 2).



1 – диск; 2 – електродвигун; 3 – редуктор; 4 – важіль; 5 – тягар; 6 – бункер; 7 – лійка;
8 – посудина; 9 – пасова передача; 10 – зразок

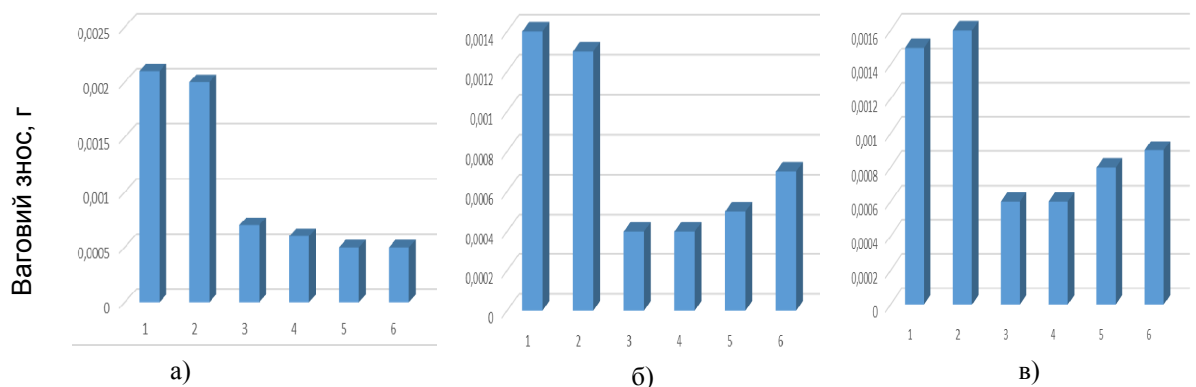
Рисунок 2 – Схема установки для стендових досліджень зміцнених зразків із титанових сплавів
Джерело: Розроблено авторами

Диск (1) встановлений на горизонтальній вісі і приводиться в обертання від електродвигуна (2) через редуктор (3). Редуктор (3) з'єднаний з електродвигуном (2) при допомозі пасової передачі (9). Диск виготовлений із титанового сплаву VT1-0. Швидкість обертання диску ($0,37 \text{ сек}^{-1}$) вибиралась із умови усунення підвищеного нагрівання при терті. Зразок (10) кріпиться на площадці Г-подібного важеля (4) і притискається до диска (1) з зусиллям, яке створюється тягарем (5), який може переміщатися по важелю (4). Абразив поступає із бункера (6) в лійку (7), а звідти до поверхні тертя.

Для всіх модельних систем спільним являється те, що зношування визначається через визначений час шляхом зважування. В результаті визначається швидкість зношування, яка є типовою для вибраної пари при заданих умовах. Зношування заміряли ваговим методом на аналітичних вагах АДВ - 200 з точністю до $0,0001 \text{ р}$. До і після випробувань зразки промивали в етиловому спирті, просушували і зважували.

Для порівняння на зносостійкість використовувалися зразки з титанового сплаву VT1-0 до і після азотування. Як середовище використовували: 1 - кварцовий пісок, 2 - вода + пісок, 3 - волога сіль + пісок. Додатково дослідження проводилися в середовищі: вода + кварцовий пісок, волога сіль + кварцовий пісок. Зернистість кварцового піску та умови проведення експериментальних досліджень відповідали попереднім.

Розмір ΔV (кг) визначалася як різниця в масі зразка до і після випробувань. Результати експериментальних досліджень представлені на рис. 3.



а) пісок; б) вода + пісок; в) сіль + пісок:

1 – без зміцнення; 2 – термоциклічний режим азотування; 3 – ізотермічний режим азотування

Рисунок 3 – Вагове зношування зразків у середовищі

Джерело: Розроблено авторами

Таким чином, вакуумне іонне азотування в імпульсному режимі забезпечує високу зносостійкість при абразивному зношуванні титанових сплавів, при цьому високу зносостійкість мають шари оброблені термоциклічним режимом азотування, а найбільшу інтенсивність зношування у титанового сплаву без азотування.

На підставі проведених експериментальних досліджень встановлено, що основними механізмами підвищення зносостійкості титанових сплавів внаслідок застосування процесу дифузійного насичення поверхні азотом при вакуумним іонним азотуванням в імпульсному режимі є: зміцнення поверхневих шарів; створення сприятливої схеми залишкових напружень; зміна закономірностей деформування поверхневих шарів; зміна хімічних та адгезійних властивостей поверхні; перенесення дифундуючих атомів азоту у глибину матриці під час тертя внаслідок ефекту “трибодиффузії”.

Відносно невелика глибина проникнення іонів азоту не може розглядатися як фактор, що обмежує можливості цього різновиду обробки щодо підвищення зносостійкості, адже реалізація таких перспективних режимів тертя, як вибіркоче перенесення або ефект аномально низького тертя, пов'язана із модифікуванням поверхневих шарів субмікронної товщини. До того ж, експериментально встановлено, що підвищену зносостійкість можуть мати шари, товщина яких у декілька разів перевищує іонноазотовану область.

Зміцнення поверхневих шарів титанових сплавів відбувається за наступними можливими механізмами, вклад яких залежить від різних факторів (температури титанового сплаву, параметрів процесу вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі, тощо):

- деформаційне зміцнення при пластичній зміні форми іонноазотованого шару;
- зміцнення за рахунок утворення твердих розчинів, які утворюють енергетичний бар'єр та утруднюють переміщення дислокацій;
- утворення структур зі зміцнюючими фазами (нітридів, карбонітридів, тощо), що викликають дисперсійне твердіння;
- блокування дислокацій за рахунок спотворення кристалічної ґратки, обумовлене об'ємною невідповідністю впроваджених атомів та появою виділень та пор;
- гальмування дислокацій упровадженими елементами (атомами, комплексами) та радіаційними ефектами;
- зменшення розмірів зерен, що призводить до збільшення площі міжзеренних границь та перешкоджає руху дислокацій.

Висновки. 1. Максимальна інтенсивність зношування титанового сплаву VT1-0 без зміцнення.

2. Вплив термоциклічного азотування підвищує зносостійкість сплаву VT1-0: у піску – 3 рази; у воді + пісок – 3,5 рази; у солі + пісок – 2,5 рази.

3. Вплив ізотермічного азотування підвищує зносостійкість сплаву VT1-0: у піску – 4 рази; у воді + пісок – 3,5 рази; у солі + пісок – 2,5 рази.

Список літератури

1. Nazmy M., Staubli M. Alloy modification of γ TiAl for improved mechanical properties. *Scr. met. Et mater.* 1994. Vol. 31, №7. P. 829-833.

2. Гогаєв К.О., Радченко О.К. Деформування титанових сплавів прокатуванням. *Металознавство та обробка металів*. 2001. №4. С. 25–29.
3. Федорак Р.М. Дифузійне залізнення та цементация титану. *Металознавство та обробка металів*. 1998. №4. С. 52–55.
4. Шалапко Ю.І., Гончаров В.В. Підвищення антифрикційних властивостей титанового сплаву ОТ4 при лазерному опромінюванні поверхні. *Вісник Технологічного університету Поділля*. 1999. № 6. С. 177–178.
5. Gurrappa I. Effect of aluminizing on the oxidation of the titanium alloy, IMI 834. *Oxidation of Metals*. 2001. 56, №1-2. P. 73-87.
6. Yue T.M., Cheung T.M., Man H.C. The effects of laser surface treatment on the corrosion properties of Ti-6Al-4V alloy in Hank's solution. *Journal Materials Science Letters*. 2000. Vol. 19, №3. P. 205–208.
7. Федірко В., Яськів О., Пригула А. Азотування і борування титанових сплавів - перспективи комбінованого оброблення. *Машинознавство*. 2003. №4. С. 23–26.
8. Ляшенко Б.А., С.І. Маркович, Михайлюта С.С. Розробка технологічного процесу вакуумного азотування поршнів двигунів в пульсуючому пучку плазми. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2017. Вип. 47, ч. 1. С. 158-166.
9. Рутковський А. В., Маркович С.І., Михайлюта С.С. Аналіз напружено-деформованого стану іонноазотованих зразків із покриттям в умовах ізотермічної та термоциклічної повзучості. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 6(37), ч. 1. С. 3-9.
10. Рутковський А.В., Маркович С.І., Михайлюта С.С. Теплостійкість іонноазотованих алюмінієвих сплавів при ізотермічному та термоциклічному впливі. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. Вип. 3(34). С. 72-81.

References

1. Nazmy, M. & Staubli, M. (1994). Alloy modification of γ TiAl for improved mechanical properties. *Scr. met. Et mater, Vol.31, №7*, P. 829-833 [in English].
2. Hohaiev, K.O. & Radchenko, O.K. (2001). Deformuvannya tytanovykh splaviv prokatuvanniam [Deformation of titanium alloys by rolling]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv - Metallurgy and metal processing, 4*, 25–29 [in Ukrainian].
3. Fedorak, R.M. (1998). Dyfuzijne zaliznennia ta tsementatsiia tytanu [Diffusion fertilization and cementation of titanium]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv - Metallurgy and metal processing, 4*, 52–55 [in Ukrainian].
4. Shalapko, Yu.I. & Honcharov, V.V. (1999). Pidvyschennia antyfraktsijnykh vlastyvostej tytanovoho splavu OT4 pry lazernomu oprominiuvanni poverkhni [Increasing the antifriction properties of the OT4 titanium alloy during laser irradiation of the surface]. *Visnyk Tekhnolohichnoho universytetu Podillia - Bulletin of the Technological University of Podillia, 6*, 177–178 [in Ukrainian].
5. Gurrappa, I. (2001). Effect of aluminizing on the oxidation of the titanium alloy, IMI 834. *Oxidation of Metals, 56, 1-2*, 73-87 [in English].
6. Yue, T.M., Cheung, T.M. & Man, H.C. (2000). The effects of laser surface treatment on the corrosion properties of Ti-6Al-4V alloy in Hank's solution. *Journal Materials Science Letters, Vol.19, No.3*, P.205–208 [in English].
7. Fedirko, V., Yas'kiv, O. & Prytula, A. (2003). Azotuvannia i boruvannia tytanovykh splaviv - perspektyvy kombinovanoho obroblennia [Nitriding and boronizing of titanium alloys - prospects for combined processing]. *Mashynoznavstvo - Mechanical science, 4*, 23–26 [in Ukrainian].
8. Liashenko, B.A., Markovych, S.I. & Mykhajliuta, S.S. (2017). Rozrobka tekhnolohichnoho protsesu vakuumnoho azotuvannia porshniv dvyhunyv v pul'suiuchomu puchku plazmy [Development of a technological process of vacuum nitriding of engine pistons in a pulsating plasma beam]. *Zahal'noderzhavnyj mizhvidomchyj nauково-tekhnichnyj zbirnyk. Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil's'kohospodars'kykh mashyn. All-state interdepartmental scientific and technical collection. Design, production and operation of agricultural machines, 47, 1*, 158-166 [in Ukrainian].
9. Rutkovs'kyj, A. V., Markovych, S.I. & Mykhajliuta, S.S. (2022). Analiz napruzhenno-deformovanoho stanu ionnoazotovanykh zrazkiv iz pokryttiam v umovakh izotermichnoi ta termotsyklichnoi povzuchosti [Analysis of the stress-strain state of ion-nitrogenized coated samples under isothermal and thermocyclic creep conditions]. *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky - Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences, 6(37), 1*, 3-9 [in Ukrainian].
10. Rutkovs'kyj, A. V., Markovych, S.I. & Mykhajliuta, S.S. (2020). Teplostyjkist' ionnoazotovanykh aliuminiievnykh splaviv pry izotermichnomu ta termotsyklichnomu vplyvi [Heat resistance of ion-nitrogenized aluminum alloys under isothermal and thermocyclic exposure]. *Tsentral'noukrains'kyj*

naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky - Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences, 3(34), 72-81 [in Ukrainian].

Anatoly Rutkovskiy, PhD tech. sci, Senior Researcher

National Academy of sciences of Ukraine G.S. Pisarenko institute for problems of strength, Ukraine

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

Viktor Markovych, Holder of the third (educational and scientific)

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Wear resistance of titanium alloy VT1-0 with a modified surface under abrasive action

The cost of rebuilding machine parts as a result of wear is enormous and rising every year. At a US symposium on reducing wear in machinery, the general consensus was that wear management is central to solving national problems such as energy conservation, material reduction, and ensuring the reliability and safety of mechanical systems. Nitriding significantly increases the wear resistance of metals and alloys. The formation of chemical compounds in titanium alloys by introducing nitrogen or increasing its concentration limit changes the rate of chemical reactions and the kinetics of oxide film growth, and increases their adhesion to the substrate. This leads to a decrease in the intensity of adhesive node formation and improves the tribological characteristics of titanium alloys. Therefore, it is necessary to study a titanium alloy with a hardened nitrided layer to obtain experimental results to determine the regularity of the influence of diffusion saturation parameters on wear resistance under abrasive conditions.

The universal installation "VIPA-1" was used for vacuum ion nitriding in the pulse mode and the formation of diffusion layers on the surface. Technological parameters of vacuum ion nitriding in the pulse mode: temperature - 550°C, pressure - 25-150 Pa, processing time - 10 hours, ratio of reaction gases - 80% Ag + 20% N₂. For experimental studies, samples of VT1-0 titanium alloy with dimensions of 30x30 mm and a thickness of 5 mm were used. The surface hardening of the samples was carried out uniformly around the entire perimeter, which ensures a uniform thickness of the diffusion layer.

The analysis of the operating conditions of the friction surfaces of most structural elements made it possible to use the installation for bench tests according to the scheme of wear with a free abrasive (Brinell method). Wear tests were carried out on an experimental setup in accordance with GOST 23.208-79 (Fig. 2). The friction process was modelled in the presence of a free, not rigidly fixed abrasive, which coincides with the American standard ASTM C 6568.

The experiment was carried out at a sliding speed of 0.158 m/s, a load of 20 kg (with a shoulder of 272 mm) and a friction path of 50 m. Steel 45, hardened to a hardness of 480-500 HB, was used as a reference. The wear body was a disc made of VT1-0 titanium alloy with a diameter of 100 mm and a thickness of 3.5 mm.

On the basis of experimental studies, it has been established that the main mechanisms for increasing the wear resistance of titanium alloys as a result of the process of diffusion saturation of the surface with nitrogen during vacuum ion nitriding in the pulse mode are strengthening of the surface layers; creation of a favourable residual stress pattern; change in the patterns of deformation of the surface layers; change in the chemical and adhesive properties of the surface; transfer of diffusing nitrogen atoms into the depth of the matrix during friction due to the tribodiffusion effect.

Conclusions. 1. Maximum wear rate of titanium alloy VT1-0 without hardening.

2. The effect of thermocyclic nitriding increases the wear resistance of VT1-0 alloy: in sand - 3 times; in water + sand - 3.5 times; in salt + sand - 2.5 times.

3. The effect of isothermal nitriding increases the wear resistance of VT1-0 alloy: in sand - 4 times; in water + sand - 3.5 times; in salt + sand - 2.5 times.

ion nitriding, pulse mode, titanium alloy, wear resistance, free abrasive

Одержано (Received) 06.11.2023

Прорецензовано (Reviewed) 11.12.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 621. 316

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.48-57](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.48-57)

П.Г. Плешков, проф., канд. техн. наук, В.В. Зінзура, доц., канд. техн. наук,
С.П. Плешков, доц., канд. техн. наук, В.П. Солдатенко, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: vasiliyzinzura@gmail.com

Визначення оптимальної точки приєднання сонячної електростанції до електричної мережі методом комп'ютерного імітаційного моделювання

Метою даного дослідження є мінімізація негативного впливу сонячної електростанції на значення усталеного відхилення напруги та рівень втрат електроенергії шляхом визначення оптимального місця її приєднання до розподільної електричної мережі. В роботі для вирішення задачі оптимального розміщення відновлюваних джерел електроенергії в електричних мережах пропонується застосовувати метод комп'ютерного імітаційного моделювання. Розроблені комп'ютерні імітаційні моделі розподільної електричної мережі з сонячною електростанцією, які дали змогу визначити оптимальне місце приєднання сонячної електростанції виходячи із значень величини втрат потужності в елементах електричної мережі на рівень усталеного відхилення напруги. Результати комп'ютерного моделювання електричної мережі з сонячною електростанцією підтвердили необхідність врахування не лише значень усталеного відхилення напруги, але і величини втрат електричної енергії в елементах мережі в процесі вибору місця встановлення сонячної електростанції.

сонячна електростанція, комп'ютерне імітаційне моделювання, розподільна електрична мережа

Постановка проблеми. Сучасні електричні мережі України характеризуються наявністю в своєму складі значної частки відновлюваних джерел енергії. Зважаючи на кліматичні умови території нашої держави, найбільшого розповсюдження у вітчизняних електричних мережах набули сонячні електростанції (СЕС). В залежності від величини встановленої потужності СЕС відрізняються їх способи приєднання до електричної мережі. Так, СЕС великої потужності (вище 1 МВт) приєднуються до електричної мережі напругою 35 кВ, середньої потужності – переважно до розподільної мережі напругою 0,4 кВ або 10 кВ, а СЕС малої потужності приєднують на напругу 0,4 кВ. Це пов'язано з тим, що більша встановлена потужність генерації електроенергії вимагає більшої пропускної здатності електричних мереж, до яких вони приєднуються. Невиконання цих вимог призводить до ряду негативних наслідків експлуатації електричних мереж, а саме до збільшення втрат електроенергії та до понаднормативного збільшення значень усталеного відхилення напруги в точці приєднання СЕС до електричної мережі. Особливо гостро ця проблема стосується СЕС середньої потужності. Такі СЕС, як правило, встановлюють в розподільних електричних мережах підприємств з метою часткового покриття потреби в електроенергії. В такому випадку місце приєднання СЕС та електроспоживачів до мережі співпадають, і тому питання негативного впливу СЕС на рівень усталеного відхилення напруги на затискачах електроспоживачів є особливо актуальним.

© П.Г. Плешков, В.В. Зінзура, С.П. Плешков, В.П. Солдатенко, 2023

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [1] наведено результати досліджень з оптимального розміщення відновлюваних джерел енергії (в тому числі і СЕС) в розподільних електричних мережах з метою підвищення надійності їх роботи. Для вирішення даної задачі авторами запропоновано як аналітичні методики, так і методика, що базується на використанні методу Монте-Карло. Проте в даній роботі не розглядалось питання впливу встановлення СЕС в розподільних електричних мережах на якість електроенергії та на рівень втрат потужності в елементах мережі.

В роботі [2] авторами пропонується для вирішення задачі оптимального розміщення розосереджених джерел енергії в електричних мережах застосовувати оптимізаційний метод DBO. Результати моделювання, що викладені в даній роботі, показують, що при застосуванні запропонованої авторами методики спостерігається одночасне зниження втрат потужності та нормалізація режиму напруги. Проте, описаний авторами підхід до вирішення задачі є досить складним, і його доцільно застосовувати лише у випадку необхідності розміщення значної кількості відновлюваних джерел енергії в електричній мережі.

В роботі [3] авторами запропоновано гібридний підхід для оптимального розміщення відновлюваних джерел енергії в електричних мережах. Цей підхід полягає в суміщенні аналітичного методу та евристичного пошуку розміщення декількох відновлюваних джерел енергії в електричних мережах з метою зниження втрат потужності в її елементах. Проте, запропонований метод не враховує вплив встановлення відновлюваних джерел енергії на рівень напруги у вузлах електричної мережі.

В статті [4] для оптимального розміщення інтелектуальних фотоелектричних інверторів авторами пропонується застосовувати 2-х етапну стохастичну оптимізацію. Метою такої оптимізації є мінімізація витрат на модернізацію електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії та забезпечення нормально допустимих значень відхилення напруги в них. Проте, в даній роботі не розглядався вплив встановлення сонячних електростанцій на рівень втрат потужності в електричній мережі.

В роботі [5] для вирішення задачі оптимізації розміщення відновлюваних джерел енергії пропонується застосовувати метод оптимізації рою частинок (PSO). Такий підхід дозволяє мінімізувати втрати активної потужності в елементах мережі та підвищити надійність її роботи. Недоліком такого підходу є його складність та неврахування впливу відновлюваних джерел енергії на рівні напруги в мережі.

В роботах [6, 7] пропонується досягти нормалізації режиму напруги в розподільних електричних мережах за рахунок удосконалення системи автоматичного керування сонячного інвертора. Недоліком такого підходу є неврахування впливу відновлюваних джерел енергії на рівень втрат потужності в мережі.

Постановка завдання. Метою роботи є мінімізація негативного впливу сонячної електростанції на значення усталеного відхилення напруги та рівень втрат електроенергії шляхом визначення оптимального місця її приєднання до розподільної електричної мережі.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 наведена схема системи електропостачання промислового підприємства, яка містить СЕС встановленою потужністю 200 кВт.

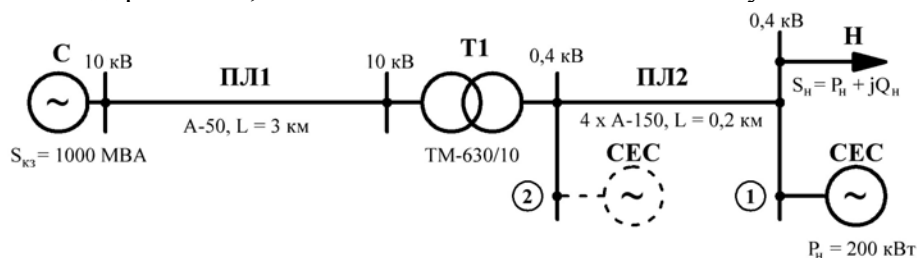


Рисунок 1 – Схема системи електропостачання підприємства з СЕС

Джерело: розроблено авторами

Як можна побачити з рис. 1, система електропостачання підприємства містить повітряну лінію ПЛ1 напругою 10 кВ, знижувальний силовий трансформатор 10/0,4 кВ марки ТМ-630/10, та повітряну лінію напругою 0,4 кВ, що відходить від шин низької напруги трансформаторної підстанції та живить навантаження Н.

Для даної мережі доцільно розглядати два варіанта приєднання СЕС:

- до точки приєднання електричного навантаження Н (точка 1 на рис. 1);
- до шин низької напруги трансформаторної підстанції (точка 2 на рис. 1).

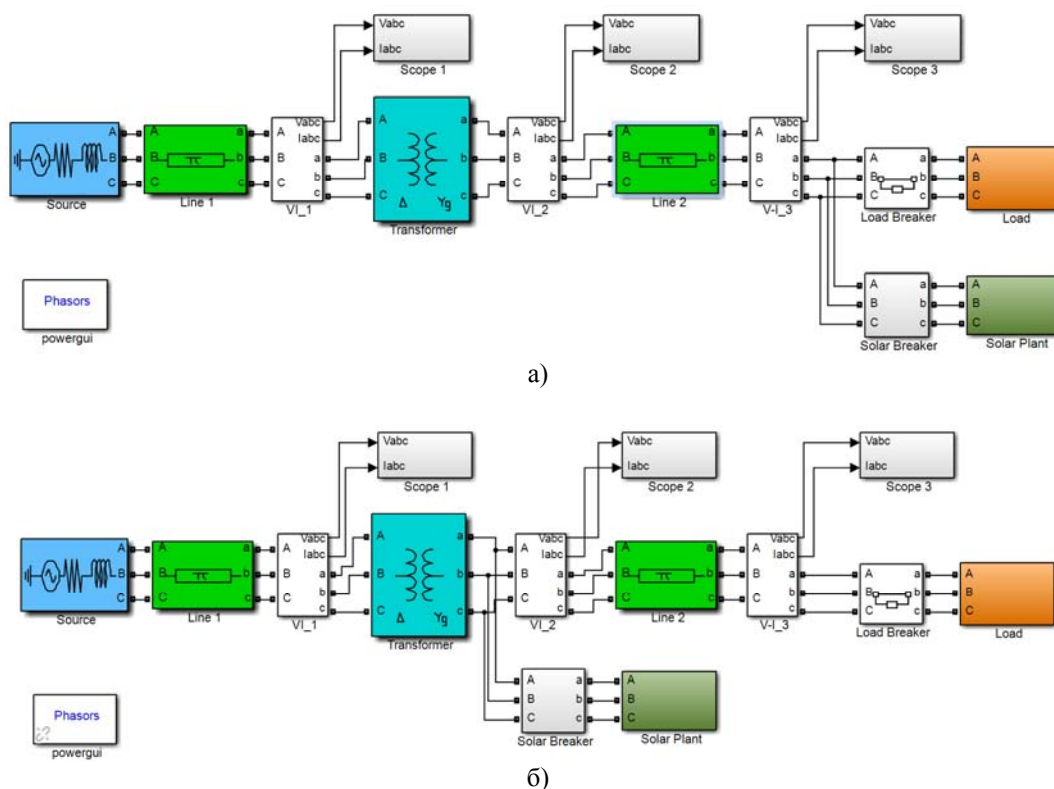
Слід зазначити, що варіант приєднання СЕС до т. 2 можливий лише за умови знаходження повітряної лінії ПЛ2 на балансі підприємства.

Для визначення оптимального місця приєднання СЕС до електричної мережі необхідно провести розрахунки параметрів режиму мережі для обох цих варіантів з метою визначення рівнів усталеного відхилення напруги та втрат активної потужності в елементах мережі. Ці розрахунки необхідно проводити з урахуванням добових графіків споживання електроенергії та графіків генерації електроенергії від СЕС. Зважаючи на це найбільш доцільним способом визначення зазначених параметрів режиму електричної мережі є комп'ютерне імітаційне моделювання.

Існує досить велика кількість програмних продуктів, які дозволяють здійснювати аналіз параметрів режиму електричної мережі з відновлюваними джерелами енергії: DIgSILENT PowerFactory [8], NEPLAN [9] та ін.

В даній роботі комп'ютерне імітаційне моделювання електричної мережі з СЕС здійснювалось в середовищі Matlab/Simulink із використанням пакету розширення SimPowerSystems [10].

На рис. 2 наведена узагальнена схема моделі Matlab/Simulink електричної мережі підприємства з СЕС.



а) підключення СЕС до т. 1; б) підключення СЕС до т. 2

Рисунок 2 – узагальнена схема моделі Matlab/Simulink електричної мережі підприємства з СЕС
Джерело: розроблено авторами

На рис. 2:

Source – модель електричної мережі;

Line1, Line2 – моделі повітряних ліній ПЛ1, ПЛ2 відповідно;

Transformer – модель силового трансформатора марки ТМ-630/10;

Load Breaker, Solar Breaker – моделі трифазних вимикачів, що комутують струм навантаження та струм СЕС відповідно;

Load – блок моделювання графіка електричного навантаження;

Solar Plant – модель СЕС;

VI_1, VI_2 і *VI_3* – моделі трифазних вимірювачів напруги і струму;

Scope 1, Scope 2 і *Scope 3* – блоки віртуальних осцилографів.

Схема блоку моделювання графіка електричного навантаження *Load* приведена на рис. 3.

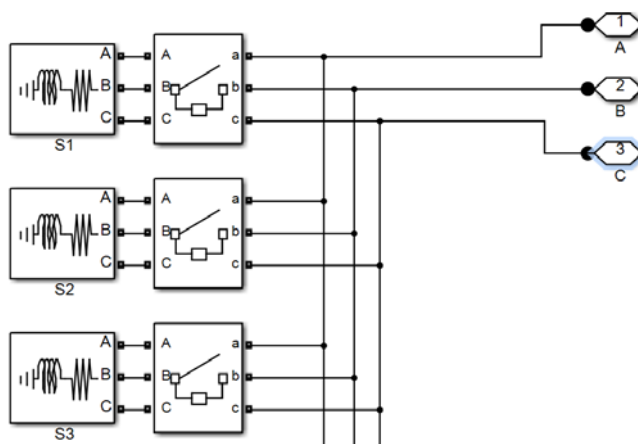


Рисунок 3 – Схема блоку моделювання графіка електричного навантаження Load

Джерело: розроблено авторами

Внутрішня структура блоку *Solar Plant* приведена на рис. 4.

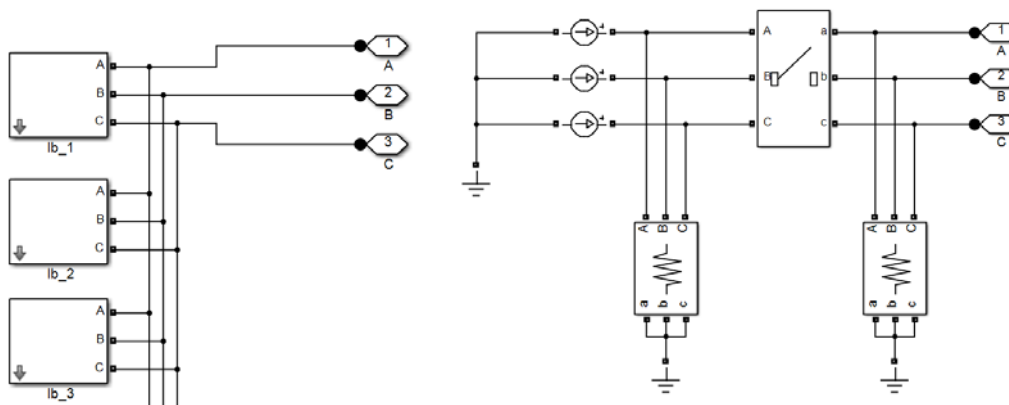


Рисунок 4 – Внутрішня структура блоку Solar Plant

Джерело: розроблено авторами

Слід відмітити, що наведені на рис. 3 і рис. 4 моделі мають таку структуру через відсутність в бібліотеці SimPowerSystems стандартних моделей електричного навантаження та генерації, що змінюється з часом. Зміна величини навантаження та генерації електроенергії моделювалась індивідуальним блоком навантаження та генерації для кожного з інтервалів усереднення, рівних 1 год.

Внутрішня структура блоків *Scope 1, Scope 2* і *Scope 3* показана на рис. 5.

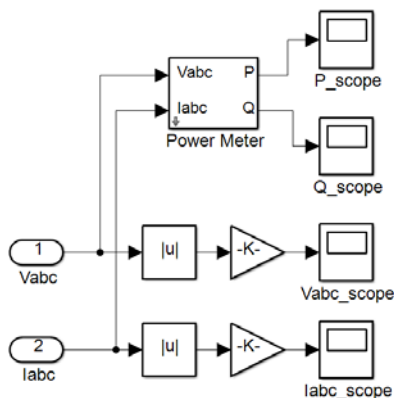


Рисунок 5 – Внутрішня структура блоків Score 1, Score 2 і Score 3
 Джерело: розроблено авторами

Описана вище комп’ютерна модель дає змогу здійснювати аналіз параметрів режиму електричної мережі з СЕС.

Задачі аналізу режимів електричної мережі для визначення оптимального місця приєднання СЕС полягали в наступному:

- визначити вплив генерації СЕС на величини напруг для випадків приєднання СЕС до т. 1 та т. 2 мережі;
- провести аналіз величини втрат активної потужності в елементах електричної мережі для випадків приєднання СЕС до т. 1 та т. 2 мережі.

Результати комп’ютерного моделювання параметрів режиму електричної мережі з СЕС показані на рис. 6 – 10.

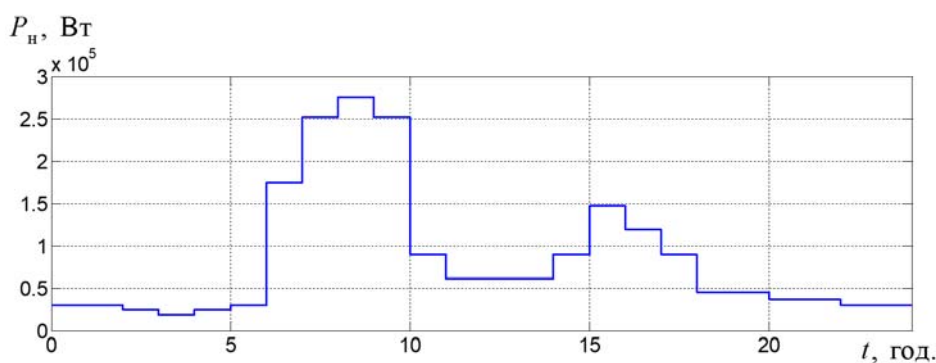


Рисунок 6 – Добовий графік активного навантаження
 Джерело: розроблено авторами

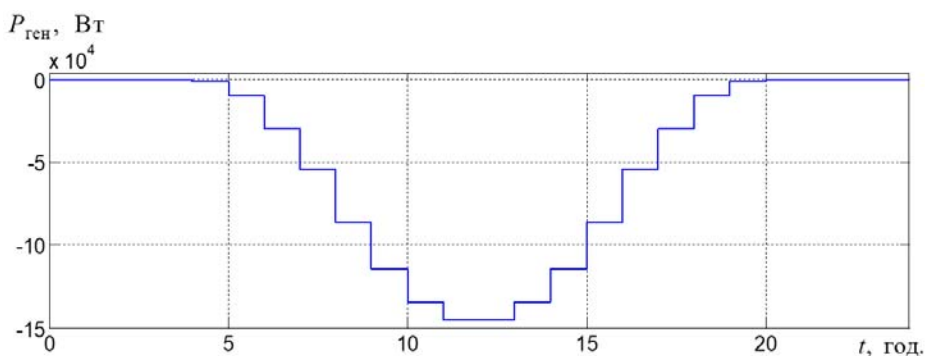
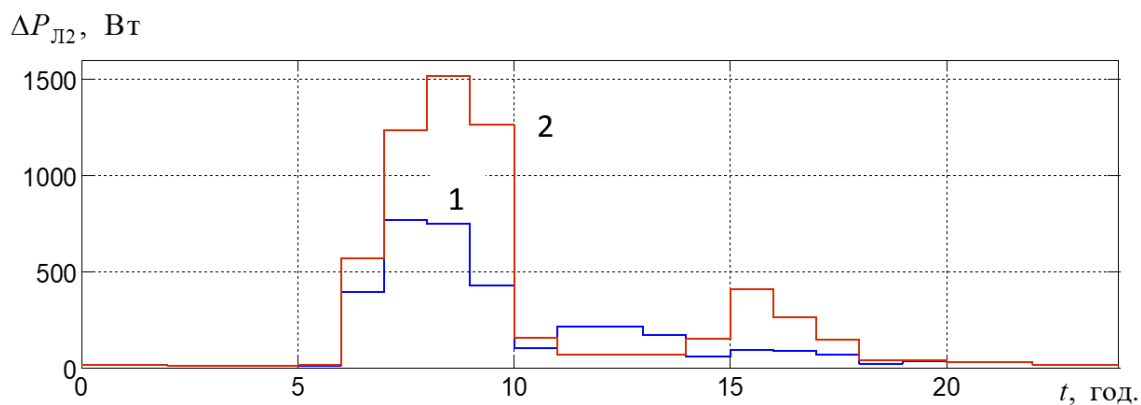


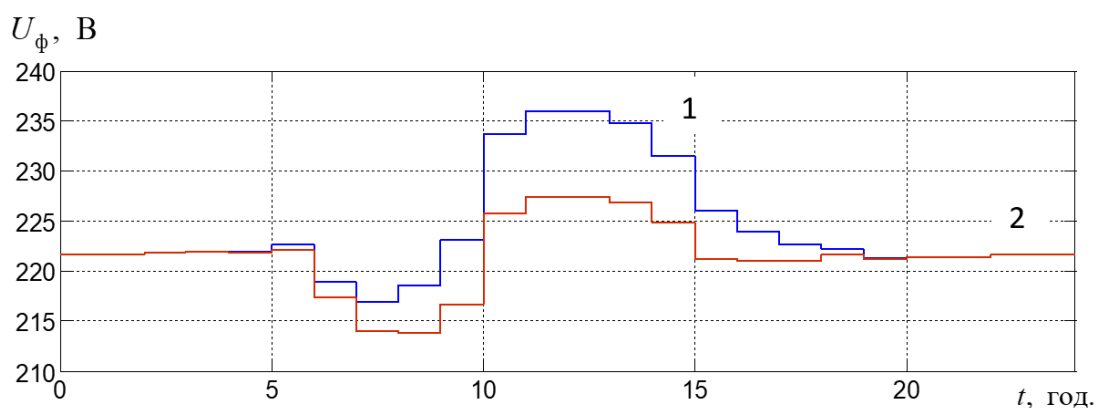
Рисунок 7 – Добовий графік генерації потужності СЕС
 Джерело: розроблено авторами



1 – випадок приєднання СЕС до т. 1; 2 – випадок приєднання СЕС до т. 2

Рисунок 8 – Добовий графік зміни втрат активної потужності $\Delta P_{Л2}$ в лінії ПЛ2

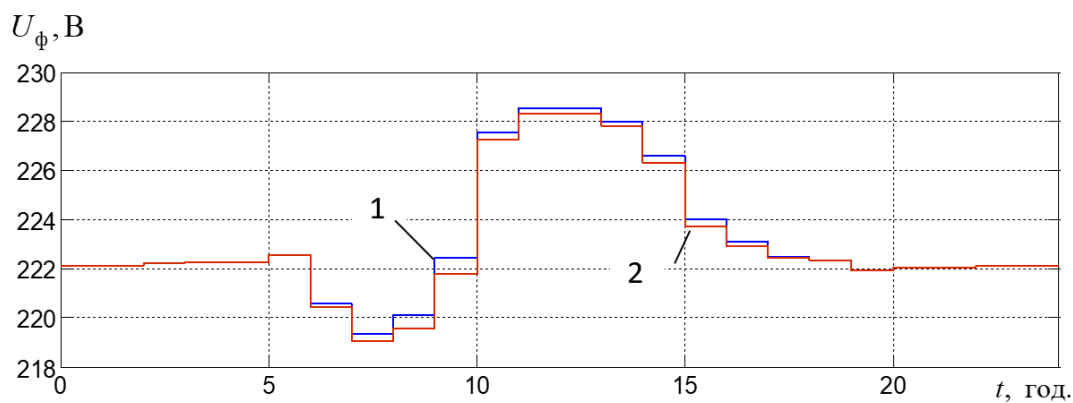
Джерело: розроблено авторами



1 – випадок приєднання СЕС до т. 1; 2 – випадок приєднання СЕС до т. 2

Рисунок 9 – Добовий графік зміни величини фазної напруги U_{ϕ} в т. 1 мережі

Джерело: розроблено авторами



1 – випадок приєднання СЕС до т. 1; 2 – випадок приєднання СЕС до т. 2

Рисунок 10 – Добовий графік зміни величини фазної напруги U_{ϕ} в т. 2 мережі:

Джерело: розроблено авторами

Результати обробки значень напруг в т. 1 і т. 2 мережі для варіантів приєднання СЕС до зазначених точок показані в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати обробки значень напруг в т. 1 і т. 2 мережі для варіантів приєднання СЕС до зазначених точок

Год.	Приєднання СЕС в т. 1				Приєднання СЕС в т. 2			
	$U_{\phi,1}$, В	ΔU_1 , %	$U_{\phi,2}$, В	ΔU_2 , %	$U_{\phi,1}$, В	ΔU_1 , %	$U_{\phi,2}$, В	ΔU_2 , %
1	221,65	0,749	222,1	0,957	221,63	0,741	222,12	0,963
2	221,7	0,771	222,11	0,958	221,63	0,743	222,14	0,971
3	221,85	0,839	222,28	1,034	221,84	0,835	222,26	1,026
4	222,09	0,951	222,31	1,05	222,03	0,925	222,36	1,07
5	222,06	0,936	222,35	1,067	221,91	0,867	222,3	1,047
6	222,78	1,266	222,66	1,21	222,2	0,999	222,66	1,208
7	218,97	-0,469	220,68	0,307	217,34	-1,211	220,48	0,217
8	216,96	-1,383	219,4	-0,271	214,08	-2,692	219,03	-0,441
9	218,52	-0,674	220,13	0,06	213,89	-2,776	219,64	-0,164
10	223,15	1,43	222,41	1,097	216,78	-1,466	221,86	0,843
11	233,78	6,264	227,51	3,416	225,86	2,666	227,37	3,351
12	236,08	7,31	228,57	3,893	227,32	3,329	228,4	3,817
13	236,07	7,305	228,54	3,882	227,35	3,342	228,34	3,792
14	234,84	6,745	228,01	3,639	226,88	3,126	227,88	3,583
15	231,6	5,271	226,61	3,006	224,83	2,197	226,32	2,872
16	226,07	2,758	224,02	1,827	221,11	0,502	223,71	1,686
17	223,97	1,804	223,16	1,437	220,99	0,451	222,97	1,351
18	222,65	1,205	222,59	1,177	221,07	0,486	222,47	1,125
19	222,3	1,043	222,35	1,068	221,61	0,732	222,35	1,067
20	221,31	0,597	221,98	0,901	221,22	0,552	222	0,909
21	221,52	0,689	222,06	0,935	221,55	0,703	222,09	0,949
22	221,5	0,682	222,1	0,955	221,56	0,708	222,01	0,914
23	221,6	0,729	222,1	0,956	221,62	0,735	222,11	0,96
24	221,67	0,761	222,15	0,978	221,62	0,738	222,13	0,969
M	224,33	1,968	223,3	1,5	221,58	0,717	223,2	1,454
P_i , %		0,793		1,0		1,0		1,0

Джерело: розроблено авторами

Результати обробки величин втрат потужності $\Delta P_{Л2}$ в повітряній лінії ПЛ2 для варіантів приєднання СЕС в т. 1 і т. 2 показані в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати обробки величин втрат потужності $\Delta P_{Л2}$ в повітряній лінії ПЛ2 для варіантів приєднання СЕС в т. 1 і т. 2

Год.	Приєднання СЕС в т. 1			Приєднання СЕС в т. 2		
	$P_{т1}$, Вт	$P_{т2}$, Вт	$\Delta P_{ПЛ2}$, Вт	$P_{т1}$, Вт	$P_{т2}$, Вт	$\Delta P_{ПЛ2}$, Вт
1	2	3	4	5	6	7
1	30611,89	30628,01	16,12	30611,83	30628,68	16,85
2	30611,36	30628,58	17,22	30611,17	30628,13	16,96
3	24531,52	24542,76	11,24	24531,69	24542,80	11,12
4	18430,52	18436,22	5,70	18430,97	18436,24	5,27
5	23119,97	23129,88	9,92	24545,29	24556,21	10,92
6	20744,30	20751,51	7,21	30736,18	30752,28	16,10
7	147958,84	148347,09	388,25	176136,02	176701,12	565,10
8	206351,38	207121,11	769,74	255928,42	257160,05	1231,63
9	205567,22	206318,59	751,38	283765,80	285281,21	1515,41

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5	6	7
10	157207,56	157634,75	427,20	262335,42	263597,75	1262,33
11	-36639,09	-36537,25	101,84	95194,58	95347,49	152,91
12	-78869,02	-78658,91	210,11	64376,39	64445,06	68,68
13	-78869,61	-78658,65	210,96	64376,53	64445,45	68,92
14	-68754,76	-68584,31	170,45	64097,26	64165,41	68,15
15	-17651,97	-17593,66	58,32	94406,43	94558,36	151,93
16	69100,21	69192,74	92,54	152090,15	152497,40	407,25
17	69027,60	69110,58	82,98	121482,32	121742,85	260,53
18	62170,53	62236,44	65,91	91190,35	91337,52	147,17
19	35943,63	35965,26	21,63	45899,06	45936,18	37,12
20	44321,72	44355,71	33,99	45740,18	45777,10	36,92
21	36669,17	36693,55	24,39	36669,32	36693,10	23,77
22	36669,55	36693,06	23,50	36669,60	36693,54	23,93
23	30611,84	30628,94	17,10	30611,41	30628,72	17,31
24	30611,26	30628,44	17,19	30611,98	30628,32	16,34
Σ	999475,61	1003010,46	3534,86	2111048,36	2117180,97	6132,60

Джерело: розроблено авторами

Як показали результати моделювання (табл. 1), для випадку приєднання СЕС до т. 1 мережі в деякий період часу мають місце понаднормові значення усталеного відхилення напруги. В результаті якість електроенергії щодо усталеного відхилення напруги виявляється незадовільною ($P_i(\Delta U_{\phi}) = 0,793 < 0,95$). А для випадку приєднання СЕС до т. 2 величина відхилення напруги задовольняє нормативним вимогам.

Але, як показали результати розрахунку втрат активної потужності (табл. 2), для випадку приєднання СЕС до т. 2 мережі величина втрат електроенергії в ПЛ2 виявилась більшою на 42 %.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що оптимальним місцем підключення СЕС є т. 1 мережі, але за умови вжиття заходів з нормалізації значень усталеного відхилення напруги в мережі.

Висновки. В результаті проведених наукових досліджень можливо зробити наступні висновки:

1. Розроблена комп'ютерна імітаційна модель розподільної електричної мережі з сонячною електростанцією дозволяє проводити дослідження параметрів режиму мережі, в тому числі дозволяє визначати рівень втрат активної потужності в елементах мережі та рівні усталеного відхилення напруги.

2. Результати комп'ютерного моделювання електричної мережі підтвердили необхідність врахування не лише значень усталеного відхилення напруги, але і величини втрат електричної енергії в елементах мережі в процесі вибору місця встановлення сонячної електростанції.

Список літератури

1. Aderibigbe M., Adoghe A., Agbetuyi F., Airoman A. (2021). A Review on Optimal Placement of Distributed Generators for Reliability Improvement on Distribution Network. IEEE PES/IAS PowerAfrica, Nairobi, Kenya, pp. 1-5. DOI: 10.1109/PowerAfrica52236.2021.9543266.
2. Khasanov, M., Kamel, S., Jurado, F., Kurbanov, A., and Jalilov, U. (2023) Photovoltaic-based Distributed Generation Allocation in Distribution Network for Energy Loss Minimization. *E3S Web of Conferences*. Vol. 434. DOI:10.1051/e3sconf/202343401015

3. Kansal S., Kumar V., Tyagi B. Hybrid approach for optimal placement of multiple DGs of multiple types in distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2016. Vol. 75. P. 226-235 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.09.002>.
4. Chen M., Ma S., Soltani Z., Ayyanar R., Vittal V., Khorsand M. Optimal Placement of PV Smart Inverters With Volt-VAr Control in Electric Distribution Systems. *IEEE Systems Journal*. 2023. Vol. 17, No. 3. P. 3436-3446. DOI: 10.1109/JSYST.2023.3256121.
5. Salam I.U., Yousif M., Numan M., Zeb K., Billah M. Optimizing Distributed Generation Placement and Sizing in Distribution Systems: A Multi-Objective Analysis of Power Losses, Reliability, and Operational Constraints. *Energies*. 2023. Vol.16 (16). P. 5907. DOI: 10.3390/en16165907
6. Пleshkov П.Г., Гарасьова Н.Ю., Солдатенко В.П. Оптимальне керування режимом роботи комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2018. №32 (1308). С. 64-70.
7. Plieshkov P., Soldatenko V., Zinzura V., Plieshkov S. Determining weight coefficients for an optimal system of control over electric energy generation in a combined electric power system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 103, No 1/2020. P. 77 – 82. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.193362>.
8. Power systems analysis software DIgSILENT PowerFactory. – Режим доступу: http://www.digsilent.de/Software/DIGSILENT_PowerFactory/PFv14_Software.pdf.
9. Akintunde A., Owoicho O., Shomefun T., Olowoleni O., Ignatius O., Abdulkareem A. Power Quality Considerations for Distributed Generation Integration in the Nigerian Distribution Network Using NEPLAN Software. *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2021. No. 11. P. 331-342. DOI:10.32479/ijee.11145
10. Perelmuter, V. *Advanced Simulation of Alternative Energy (1st ed.)*. CRC Press. 2020. 314 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429324055>

References

1. Aderibigbe M., Adoghe A., Agbetuyi F., Airoboman A. (2021). A Review on Optimal Placement of Distributed Generators for Reliability Improvement on Distribution Network. IEEE PES/IAS PowerAfrica, Nairobi, Kenya, pp. 1-5. DOI: 10.1109/PowerAfrica52236.2021.9543266 [in English].
2. Khasanov, M., Kamel, S., Jurado, F., Kurbanov, A., and Jalilov, U. (2023) Photovoltaic-based Distributed Generation Allocation in Distribution Network for Energy Loss Minimization. *E3S Web of Conferences, Vol. 434*. DOI:10.1051/e3sconf/202343401015 [in English].
3. Kansal, S., Kumar, V. & Tyagi B. (2016). Hybrid approach for optimal placement of multiple DGs of multiple types in distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 75*, P. 226-235 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.09.002> [in English].
4. Chen, M., Ma, S., Soltani, Z., Ayyanar, R., Vittal, V. & Khorsand M. (2023). Optimal Placement of PV Smart Inverters With Volt-VAr Control in Electric Distribution Systems. *IEEE Systems Journal, Vol. 17, No.3*, P. 3436-3446. DOI: 10.1109/JSYST.2023.3256121 [in English].
5. Salam I.U., Yousif M., Numan M., Zeb K., Billah M. (2023) Optimizing Distributed Generation Placement and Sizing in Distribution Systems: A Multi-Objective Analysis of Power Losses, Reliability, and Operational Constraints. *Energies*, vol.16 (16), 5907; DOI: 10.3390/en16165907 [in English].
6. Plieshkov, P.H., Haras'ova, N.Yu. & Soldatenko, V.P. (2018). Optymal'ne keruvannia rezhymom roboty kombinovanoi elektroenerhetychnoi systemy z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii [Optimal Control of the Work of the Hybrid Electric Energy System With Renevable Sources of Energy]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Problemy udoskonaliuvannia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka - Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of scientific works. Series: Problems of Improvement of Electric Machines and Apparatus, 32(1308)*, 64–70. DOI: 10.20998/2079-3944.2018.32 [in Ukrainian].
7. Plieshkov, P., Soldatenko, V., Zinzura, V. & Plieshkov S. (2020). Determining weight coefficients for an optimal system of control over electric energy generation in a combined electric power system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 103, No 1/2020*, P. 77 – 82. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.193362> [in English].
8. Power systems analysis software DIgSILENT PowerFactory. Retrieved from: http://www.digsilent.de/Software/DIGSILENT_PowerFactory/PFv14_Software.pdf.
9. Akintunde, A. et al. (2021). Power Quality Considerations for Distributed Generation Integration in the Nigerian Distribution Network Using NEPLAN Software. *International Journal of Energy Economics and Policy, No. 11*, P. 331-342. DOI:10.32479/ijee.11145 [in English].

10. Perelmuter, V. (2020). *Advanced Simulation of Alternative Energy* (1st ed.). CRC Press. 314 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429324055> [in English].

Petro Plieshkov, Prof., PhD tech. sci., **Vasyl Zinzura**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhii Plieshkov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Valentyn Soldatenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Determination of the optimal point of connection of the solar power plant to the electrical network by computer simulation

The purpose of this study is to minimize the negative impact of the solar power plant on the value of the steady voltage deviation and the level of electricity losses by determining the optimal place for its connection to the distribution network.

Currently, quite a large number of methods of optimal placement of renewable sources of electricity in electrical networks have been developed. However, most of them either do not fully take into account the multifunctional influence of renewable energy sources on the parameters of the electric network regime, or are quite difficult to use. In order to solve the problem of optimal placement of renewable sources of electricity in electric networks, it is proposed to use the method of computer simulation modeling. The essence of this method is to determine the optimal place for connecting a renewable energy source to the electrical network based on the analysis of the results of computer simulation modeling of network mode parameters. This approach is the most acceptable in the case of connecting a solar power plant of average power to the electrical network of an industrial enterprise. The developed computer simulation model of a distribution electric network with a solar power plant allows for the research of network mode parameters, including the determination of the level of active power loss in network elements and the level of steady voltage deviation. The specified computer simulation models of the distribution electric network with a solar power plant made it possible to determine the optimal place for connecting the solar power plant based on the values of power losses in the elements of the electric network at the level of the established voltage deviation.

The results of computer modeling of an electrical network with a solar power plant confirmed the need to take into account not only the values of the established voltage deviation, but also the amount of electrical energy losses in the network elements in the process of choosing a place to install a solar power plant.

The results of the research can be used in solving the problems of determining the place of connection of a medium-power solar power plant to the electrical network of an industrial enterprise.

solar power plant, computer modeling, distribution network

Одержано (Received) 23.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 27.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 621. 31:658.26

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.57-64](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.57-64)

В.В. Третяк, здобувач вищої освіти, **В.В. Яцун**, доц., канд. техн. наук, **К.Г. Петрова**, доц., канд. техн. наук, **І.В. Савеленко**, доц., канд. техн. наук, **А.І. Котиш**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: kateflash27@gmail.com

Побудова моделі електроспоживання компресорної станції підприємства з виробництва молочної продукції

Робота присвячена створенню моделі електроспоживання компресорної станції підприємства з виробництва молочної продукції задля оцінювання фактичного рівня її енергоефективності. Розглянуті підходи до моделювання та аналізу електроспоживання на основі математичного моделювання та статистичних методів підтверджують актуальність й потенційну ефективність таких стратегій. Результати аналізу електричного балансу та використання методів статистичного аналізу, зокрема

© В.В. Третяк, В.В. Яцун, К.Г. Петрова, І.В. Савеленко, А.І. Котиш, 2023

регресійного підходу, підтверджують, що продуктивність є основним чинником, який визначає рівень електроспоживання. Графічне порівняння фактичних та розрахункових показників підтверджує точність моделі та можливість її використання для оптимізації енергоефективності компресорної станції підприємства.

модель електроспоживання, компресорна станція, промисловий об'єкт, регресійний аналіз

Постановка проблеми. Енергетичні ресурси є надзвичайно важливою складовою забезпечення життєвого функціонування промислових об'єктів та інфраструктури. Ця проблема набуває особливої актуальності для України, як країни, яка перебуває у складних воєнних подіях та майже щодня зіштовхується із викликами, пов'язаними з енергетичною безпекою та необхідністю ефективного управління електроспоживанням. У той же час, промислові об'єкти є ключовими складовими економіки країни та є основною ланкою забезпечення енергетичних потреб. А отже, прогнозування необхідного рівня витрат електричної енергії (ЕЕ) на продукцію промислових об'єктів стає важливою стратегічною задачею, що має на меті забезпечення стабільності виробництва та функціонування промисловості, навіть у найкризовіший період.

Потреба в прогнозуванні електроспоживання промислових об'єктів на рівні країни вимагає розроблення ефективних моделей з врахуванням специфіки виробничих процесів, технологічні інновації та зміни в споживчих попитах. Недостатня точність існуючих підходів може призвести до надмірного використання ЕЕ, непродуктивних витрат та нестабільності системи електропостачання. Тому створення фактичних моделей електроспоживання є ключовим етапом у розвитку ефективних стратегій управління енергоефективністю промислових об'єктів на рівні країни.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Однією із складових процесу управління енергоефективністю є здатність фактичного контролю рівня ефективності енергоспоживання. Це обумовлює необхідність дослідження взаємозв'язків між обсягом енергоспоживання та технологічними параметрами об'єкта, тобто створення моделі його базового рівня електроспоживання [1]. На разі, одним із найпростіших та зручних підходів до створення таких моделей є застосування методів статистичного моделювання.

Так, робота [2] присвячена обґрунтуванню доцільності застосування методів математичного моделювання з використанням фактичних технологічних змінних режиму водопостачання та натурних вимірювань, а також створення моделі електроспоживання насосної станції. У [3] подана методика встановлення "стандартів" енергоспоживання в системах оперативного контролю ефективності використання палива й енергії підприємств з використанням методів математичного моделювання обсягу витрат енергоресурсів, у [4] – стохастичного оцінювання факторів впливу на енергоспоживання з подальшим їх обробленням з використанням штучного інтелекту. У той же час, особливої цікавості набувають моделі планування енергоспоживання за галузями промисловості, наприклад у [5, 6] наведені для металургійної, а у [7] – для харчової; окремих підприємств: у [8] розглянуто підземні залізородні; окремих установок, зокрема у [9] – досліджені питання оптимізації енергоспоживання процесу буріння на прикладі гідроциклонної установки; або ж, навіть, окремих будівель, наприклад у роботі [5] розроблено модель базового рівня енергоспоживання будівлі дошкільного навчального закладу, на основі якої здійснено прогнозування попиту на енергетичні ресурси для будівель бюджетних установ.

У той же час, кожному специфічному об'єкту та технологічному процесу притаманні свої особливості, які найбільш характерно можна дослідити під час створення подібних моделей електроспоживання.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є побудова моделі електроспоживання компресорної станції підприємства з виробництва молочної продукції задля оцінювання фактичного рівня його енергоефективності.

Виклад основного матеріалу. Побудова моделі електроспоживання підприємства передбачає визначення його загального споживання та виявлення найбільш енергоємних процесів. Загальне споживання ЕЕ визначаємо відповідно до виразу:

$$W_i = n \cdot P_{Bi} \cdot k_{Bi} \cdot T_{Pi}, \quad (1)$$

де n – загальна кількість обладнання, шт.;

P_{Bi} – значення встановленої потужності обладнання, кВт;

k_{Bi} – коефіцієнт використання;

T_{Pi} – річна тривалість роботи обладнання.

На рис.1 наведено електричний баланс цеху виготовлення сирів підприємства з вироблення молочної продукції відповідно до (1).

Вочевидь, якщо лівову частку споживання ЕЕ цеху становить компресорне обладнання (70,8%), у той же час на другому місці – холодильне (10,2 %), далі – насосне (9,2 %), то й доцільним є подальше дослідження найбільш енергоємного споживача – компресорного устаткування.

Для побудови моделі було виконано натурні вимірювання технологічних параметрів компресорної станції (табл. 1). За результатами місячного спостереження (обсяг вибірки - 30 спостережень) отримано масив значень вхідних параметрів: продуктивності (X_1), температури (X_2) та тиску (X_3), а також відповідного їм значення електроспоживання - вихідної змінної (Y).

Для аналізу наявності зв'язку між параметрами застосовано кореляційно-регресійний підхід із використанням можливостей програмного пакету MS Excel "Аналіз даних". Результати моделювання наведені у табл. 2-4.

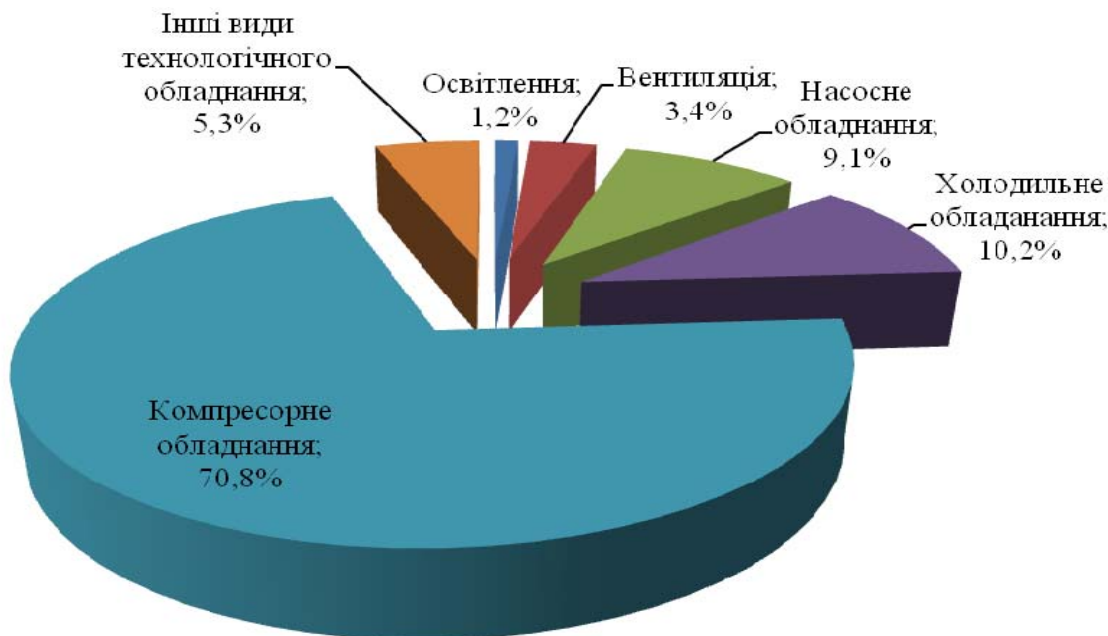


Рисунок 1 – Баланс споживання ЕЕ обладнанням цеху

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 1 – Технологічні параметри компресорної станції (грудень 2022 року)

Дата вимірювань	Продуктивність, м ³ /добу	Температура, °С	Тиск, бар	Споживання ЕЕ, кВт·год
01.12.2022	245879,8	28	4	8950,669253
02.12.2022	256675	30	6,3	9259,618691
03.12.2022	239341,5	30	6,3	10179,0079
...
...
29.12.2022	153465,55	13	2,6	6226,121869
30.12.2022	147377,5	13	2,6	6086,69411
31.12.2022	173686,12	13	3,6	6484,516121

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 – Звіт підсумків регресійної статистики

Регресійна статистика	
Коефіцієнт множинної кореляції R	0,991550909
R - квадрат	0,983173204
Нормований R - квадрат	0,981303561
Стандартна помилка	358,5111476
Кількість спостережень	31

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3 – Результати регресійного аналізування

Найменування параметра	Коефіцієнти	Стандартна помилка	t - статистика	P -Значення
Y - перетин	526,0258437	317,2602664	1,658026231	0,108887215
X_1	0,033413892	0,00149383	22,36793958	5,86411E-19
X_2	-14,12001567	12,96396629	-1,08917405	0,285703474
X_3	164,3611034	92,83162815	1,770529147	0,087930579

Джерело: розроблено авторами

Відповідно до результатів, наведених в табл.3 P -Значення чиннику « X_2 » становить 0,2857, що перевищує допустиме значення 0,05, а отже доцільно прибрати його із подальшого розгляду.

Результати регресійний аналізу без « X_2 » наведено у табл.4.

Таблиця 4 – Результати регресійного аналізу з врахуванням X_1 та X_3

Найменування параметра	Коефіцієнти	Стандартна помилка	t - статистика	P -Значення
Y - перетин	280,9732875	224,425434	1,251967224	0,220939533
X_1	0,034301832	0,00125592	27,31212553	1,00036E-21
X_3	109,2826312	78,10767287	1,399127989	0,172755348

Джерело: розроблено авторами

Відповідно до результатів, наведених в табл.4 P -Значення чиннику « X_3 » становить 0,172, що також перевищує допустиме значення, тобто для подальшого розгляду залишаємо лише X_1 .

Отже, найвпливовішим чинником, що формує рівень електроспоживання є продуктивність. Відповідно до результатів регресійного аналізу було визначено коефіцієнти рівняння лінійної регресії $a_1 = -0,0355$, $a_0 = 448,492$ та отримано математичну модель виду:

$$Y = 448,492 + 0,0355 \cdot X_1, \quad (1)$$

де Y – споживання ЕЕ, кВт·год;

X_1 – продуктивність, м³/добу.

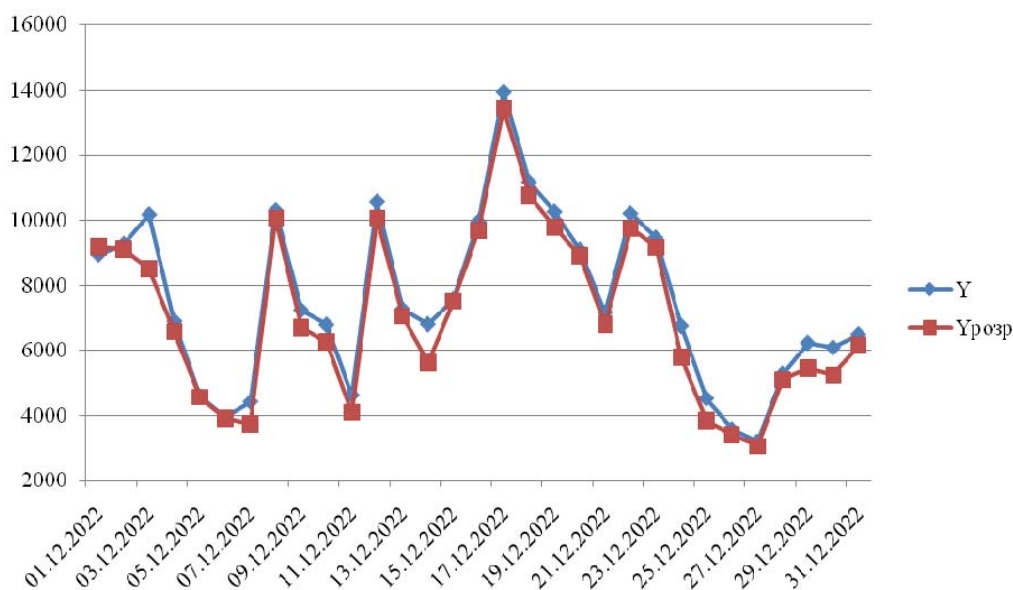


Рисунок 2 – Порівняння фактичного електроспоживання (Y) та визначеного за математичною моделлю ($Y_{\text{Розр}}$)

Джерело: розроблено авторами

На рис. 2 наведено графік фактичного споживання ЕЕ компресорним обладнанням цеху виготовлення сирів підприємства з вироблення молочної продукції за грудень 2022 року, а також побудованої базової лінії електроспоживання, отриманої з використанням математичних моделей регресійного аналізу. Незначні відхилення у фактичних та розрахункових показниках підтверджують адекватність та можливість використання запропонованого підходу.

Висновки. 1. Потреба в прогнозуванні електроспоживання промислових об'єктів у контексті складних умов, зокрема енергетичної нестабільності, підкреслює важливість розвитку ефективних моделей управління енергоефективністю. Аналіз існуючих досліджень показує, що використання математичного моделювання та методів статистичного аналізу дозволяє створювати точні та адаптивні моделі для різноманітних промислових об'єктів. Задokumentовані підходи до прогнозування електроспоживання в різних галузях і на різних рівнях (від окремих установок до галузей загалом) підтверджують значимість цієї проблеми для підприємств різного профілю.

2. У результаті дослідження було побудовано модель електроспоживання компресорної станції на підприємстві з виробництва молочної продукції. Аналізуючи електричний баланс цеху, виявлено, що компресорне обладнання є найбільш енергоємним. Здійснено натурні вимірювання технологічних параметрів та електроспоживання, які були підґрунтям для побудови регресійної моделі.

Результати моделювання показали, що найважливішим фактором, що впливає на рівень електроспоживання, є продуктивність. Отримана математична модель дозволяє прогнозувати споживання електроенергії на основі продуктивності обладнання. Графічне порівняння фактичних та розрахункових показників підтверджує адекватність моделі. Таким чином, запропонований підхід до моделювання електроспоживання є ефективним і може бути використаний для оптимізації енергоефективності на підприємстві.

Список літератури

1. ДСТУ ISO 50001:2020 Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанови щодо застосовування (ISO 50001: 2018, IDT). [Чинний від 2020-09-15]. Київ, 2020. 33 с. (Державний стандарт України).
2. Давиденко Л., Давиденко Н. Моделювання електроспоживання насосної станції водо подачі. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2019. Вип. 1 (114). С. 20-26.
3. Находов В.Ф., Бориченко О.В., Іванько Д.О. Вибір математичної моделі для встановлення "стандартів" енергоспоживання виробничих об'єктів на основі багатокритеріального підходу. *Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут"*. 2014. Вип. 1. С. 20-28.
4. Богданов О.М., Плескач Б.М. Інформаційна технологія моніторингу ефективності енергоспоживання технологічних систем. *Штучний інтелект*. 2019. Вип. 1. С. 34-42.
5. Кійко С.Г., Дружинін Є.А., Прохоров О. В. Модель планування енергоспоживання металургійного підприємства. *Системи управління навігації та зв'язку*. 2020. Вип.1(59). С. 27-32.
6. Yujuan R., Bao H. Modeling and Simulation of Metallurgical Process Based on Hybrid Petri Net. Second International Conference on Mechanical Engineering and Automation Science: IOP Conf. Series, Materials Science and Engineering, 19 nov. 2016 p. : IOP Publishing, 2016. P. 157-161.
7. Онищенко Я.Д., Замулко А.І. Системний підхід в енергетичному менеджменті як аналітичний засіб для оцінювання енергоємних процесів на підприємствах харчової промисловості України. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2020. Вип. 26, № 2. С. 131-139.
8. Сінчук І. О., Купін А. І., Барановський В. Д. До тактики розбудови архітектури узагальненого алгоритму енергоорієнтованого керування електроспоживанням підземних залізрудних підприємств. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2021. Вип. № 1(53). С.51-63.
9. Крижанівський Є. І., Лях М. М., Бурда, Ю. М. Оптимізація енергоспоживання в бурінні на прикладі гідроциклонної установки. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, 2013. Вип. 4(49). С. 98–108.
10. Прокопенко В.В., Чорний А.О. Створення базового рівня енергоспоживання для прогнозування попиту на енергоресурси дошкільного навчального закладу. Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'22: зб. мат. конф. VIII Міжн. наук.-практ. та навч.-метод. конф., 15-17 лист. 2022 р. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. С. 44-45.

References

1. DSTU ISO 50001:2020 Systemy enerhetychnoho menezhmentu. Vymohy ta nastanovy schodo zastosovuvannia (ISO 50001: 2018, IDT) (2020). [Energy management systems. Application requirements and guidelines]. *DSTU ISO 50001:2020 from 15 th September 2020*. Kyiv: Minregion Ukrainy [in Ukrainian].
2. Davydenko, L. & Davydenko, N. (2019). Modeliuvannia elektrospozhyvannia nasosnoi stantsii vodo podachi [Modeling of power consumption of water supply pumping station]. *Visnyk KrNU imeni Mykhajla Ostrohrads'koho - Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University, 1 (114)*, 20-26 [in Ukrainian].
3. Nakhodov, V.F. Borychenko, O.V. & Ivan'ko, D.O. (2014). Vybir matematychnoi modeli dlia vstanovlennia "standartiv" enerhospozhyvannia vyrobnychych ob'ektiv na osnovi bahatokryterial'noho pidkhdodu [Selection of a mathematical model for establishing "standards" of energy consumption of

- production facilities based on a multi-criteria approach]. *Naukovi visti Natsional'noho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivs'kyj politekhnichnyj instytut"* – *Scientific news of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*, 1, 20-28 [in Ukrainian].
4. Bohdanov, O.M. & Pleskach, B.M. (2019). Informatsijna tekhnolohiia monitorynhu efektyvnosti enerhospozhyvannia tekhnolohichnykh system [Information technology for monitoring the efficiency of energy consumption of technological systems]. *Shtuchnyj intelekt – Artificial Intelligence*, 1, 34-42 [in Ukrainian].
 5. Kijko, S.H., Druzhynin, Ye.A. & Prokhorov, O. V. (2020). Model' planuvannia enerhospozhyvannia metalurhijnoho pidpriemstva [Model of energy consumption planning of a metallurgical enterprise]. *Systemy upravlinnia navihatsii ta zv'iazku - Navigation and communication control systems*, 1(59), 27-32 [in Ukrainian].
 6. Yujian, R. & Bao, H. (2016). Modeling and Simulation of Metallurgical Process Based on Hybrid Petri Net. Second International Conference on Mechanical Engineering and Automation Science: *IOP Conf. Series, Materials Science and Engineering*, 19 nov. 2016 p. (pp. 157-161) [in English].
 7. Onyschenko, Ya.D. & Zamulko, A.I. (2020) Systemnyj pidkhid v enerhetychnomu menedzhmenti iak analitychnyj zasib dlia otsiniuvannia enerhoiemnykh protsesiv na pidpriemstvakh kharchovoi promyslovosti Ukrainy [A systematic approach in energy management as an analytical tool for evaluating energy-intensive processes at Ukrainian food industry enterprises]. *Naukovi pratsi Natsional'noho universytetu kharchovykh tekhnolohii – Scientific works of the National University of Food Technologies*, 26, 2, 131-139. [in Ukrainian].
 8. Sinchuk, I. O., Kupin, A. I. & Baranovs'kyj, V. D. (2021). Do taktyky rozbudovy arkhitektury uzahal'nenoho alhorytmu enerhoorientovanoho keruvannia elektrospozhyvanniam pidzemnykh zalizorudnykh pidpriemstv [To the tactics of building the architecture of the generalized algorithm of energy-oriented control of electricity consumption of underground iron ore enterprises]. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy – Electromechanical and energy-saving systems*, 1(53), 51-63 [in Ukrainian].
 9. Kryzhanivs'kyj, Ye. I., Liakh, M. M. & Burda, Yu. M. (2013). Optyimizatsiia enerhospozhyvannia v burinni na prykladi hidrotsyklonnoi ustanovky [Optimization of energy consumption in drilling using the example of a hydrocyclone installation]. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, 4(49), 98-108 [in Ukrainian].
 10. Prokopenko, V.V. & Chornyj, A.O. (2022). Stvorennia bazovoho rivnia enerhospozhyvannia dlia prohnozuvannia popytu na enerhoresursy doshkil'noho navchal'noho zakladu [Creation of a basic level of energy consumption for forecasting the demand for energy resources of a preschool educational institution]. Energy management: status and development prospects PEMS'22: *VIII Mizhnarodna naukovo-praktychna ta navchal'no-metodychna konferentsiia (15-17 lystopada 2022 r.)- International scientific-practical and educational-methodological conference* (pp.44-45). Kyiv: KPI im. Ihoria Sikors'koho [in Ukrainian].

Vladyslav Tretiak, higher education recipient, **Volodymyr Yatsun**, Assoc. Prof., PhD tech. sci. **Kateryna Petrova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ivan Savelenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Kotysh**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Construction of the electricity consumption model of the compressor station of the enterprise for the production of dairy products

Maintaining a stable power supply for industrial facilities in modern conditions, especially in the context of war and energy instability, is critically important. Highlighting the need to forecast electricity consumption and develop effective models to manage energy efficiency at the country level is a key step in solving this problem.

One of the control components of energy efficiency management processes is the ability of the actual level of energy efficiency. The purpose of this study is to build a model of the power consumption of the compressor station of the enterprise for the production of dairy products in order to assess the actual level of its energy efficiency

The considered approaches to modeling and analysis of electricity consumption based on mathematical modeling and statistical methods confirm the relevance and potential effectiveness of such strategies. The approach used in the study to analyze electricity consumption at industrial facilities, in particular the application of regression analysis, is promising for forecasting and optimizing energy efficiency at enterprises of various profiles.

The constructed model of power consumption of the compressor station at the enterprise for the production of dairy products is an important basis for ensuring the appropriate level of energy efficiency of the

industry. The results of the analysis of the electrical balance and the use of statistical analysis methods, in particular the regression approach, confirm that productivity is the main factor that determines the level of electricity consumption.

The proposed mathematical model makes it possible to effectively forecast electricity consumption based on equipment parameters. Graphical comparison of actual and calculated indicators confirms the accuracy of the model and its possible use for optimizing energy efficiency at industrial facilities.

electricity consumption model, compressor station, industrial facility, regression analysis

Одержано (Received) 26.10.2023

Процеженовано (Reviewed) 02.12.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 621.311.1; 621.315.62

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.64-69](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.64-69)

А.І. Котиш, доц., канд. техн. наук, **В.В. Зінзура**, доц., канд. техн. наук,

Н.Ю. Гарасьова, доц., канд. техн. наук, **І.В. Савеленко**, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

О.Ф. Котиш, здобувачка третього рівня вищої освіти

Льотна академія національного авіаційного університету, м. Кропивницький, Україна

e-mail: akotysh@gmail.com

Вплив роботи трансформаторів напруги підстанцій 35/10 кВ на похибки системи обліку електроспоживання

Роботу присвячено питанню оптимального функціонування систем обліку електроспоживання в умовах ринкових відносин та пов'язаною з цим проблемою надійного й раціонального використання режимів роботи трансформаторів напруги. Досліджено вплив параметрів силових трансформаторів на роботу системи комерційного обліку електричної енергії при встановленні трансформаторів струму і напруги на різних рівнях напруги. Визначено, що завантаження силового трансформатора та схема включення його обмоток впливає на величину похибки вимірювальних каналів в автоматизованих системах контролю і обліку електроенергії. Проаналізовано можливість організації системи обліку електроспоживання при відсутності трансформаторів напруги на високій стороні підстанції та розраховано можливий недооблік електроенергії у цьому випадку.

система електроспоживання, трансформатор напруги, активна, реактивна електроенергія

Постановка проблеми. В теперішній час надзвичайно важливим стає точний облік електроенергії на всіх етапах її виробництва, передачі та споживання. Існуючі системи обліку електроенергії далеко не завжди відповідають вимогам точності, необхідним у сучасних ринкових умовах. Більшість з них були розроблені десятки років тому, коли електроенергія не розглядалася як товар і точність її обліку приділялася меншою увагою. Нажаль, експлуатаційний персонал суб'єктів оптового і роздрібного ринків електроенергії дотепер не приділяють належної уваги стану електричних ланцюгів струму і напруги, що використовується при вимірюваннях з метою комерційного і технічного обліку. Підтвердженням цьому служать численні спроби пристосувати наявні системи обліку до вимог оптового ринку і збільшити точність вимірювань тільки шляхом установки лічильників підвищеного класу точності, ігноруючи

необхідність проведення ревізії і реконструкції електричних ланцюгів в цілому, включаючи трансформатори струму та напруги.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На теперішній час широко використовуються сучасні автоматизовані системи контролю та обліку електроспоживання (АСКОЕ). Установка АСКОЕ є обов'язковою вимогою відповідно до Закону України "Про ринок електричної енергії" та Кодексу комерційного обліку електричної енергії. Такі системи використовуються для моніторингу, контролю, а також для збору інформації щодо споживання електроенергії в реальному часі [1-3]. У [4] наведені методи вимірювання та інтерпретації результатів моніторингу параметрів АСКОЕ в електроенергетичних системах. В своєму дослідженні автори [5] пропонують застосування штучного інтелекту для стохастичного оцінювання похибки вимірювань в системах електроспоживання.

В роботах [2, 6] для підвищення точності вимірювальних каналів в системах обліку електроенергії запропоновано використання, коректуючих похибок. Подана методика прогнозування помилок в умовах максимальних навантажень в системі енергоспоживання.

Однак в реальних умовах роботи метрологічні характеристики вимірювальних каналів в системах обліку часто перевищують нормативні значення розрахункової похибки, на які автори статті звертають увагу.

Постановка завдання. Метою дослідження є підвищення точності вимірювань систем обліку електроенергії.

Виклад основного матеріалу. Згідно [7] облік активної електроенергії має забезпечувати визначення кількості енергії:

- переданої та отриманої іншими країнами та електроенергетичними системами;
- виробленої генераторами електростанцій;
- спожитої на власні та господарські (окремо) потреби електростанцій та підстанцій;
- відпущеної споживачам по лініях, які відходять від шин електростанцій безпосередньо до споживачів;
- переданої іншим електропередавальним організаціям або отриманої від них;
- відпущеної споживачам з електричної мережі;
- відпущеної електростанціями в мережі електропередавальних організацій;
- спожитої споживачами екологічної броні;
- яка надійшла до електричних мереж електропередавальної організації з електричних мереж споживача.

Крім того, облік активної електроенергії в електропередавальній організації має забезпечувати можливість:

- визначення надходження електроенергії до електричних мереж різних класів напруги;
- складання балансів електроенергії;
- визначення втрат електричної енергії в елементах електричної мережі;
- здійснення контролю за дотриманням споживачами заданих ним режимів споживання електроенергії.

Побудова систем обліку в даний час здійснюється, як правило, на межі балансової приналежності електричних мереж підприємств та організацій. Вони можуть реалізовуватись на двох рівнях - "верхньому" та "нижньому". Енергокомпанії при цьому, у ряді випадків, мають можливість списувати свої втрати на споживача, так само як і споживачі на енергопостачальні організації.

У зв'язку з цим специфіка ринку електроенергії висуває на передній план питання забезпечення оперативного контролю за енергоспоживанням, як електропостачальними організаціями, так і споживачами. При цьому сучасний стан розвитку Internet технологій дозволяє зараз говорити про існування потужного швидкісного середовища обміну інформацією, що охопила вже більшу частину різних підприємств та організацій. Останнім вигідно розраховуватися за спожиту електроенергію за "верхнім" рівнем, тобто встановлювати систему обліку на високій стороні підстанцій 35-150/10 кВ, оскільки в цій розрахунковій точці тариф приблизно на 25-30 % нижче [8].

Організація обліку в цьому випадку найчастіше виглядає таким чином (рис. 1). Тобто реально система обліку встановлена на високій стороні понижувальної підстанції, а живлення лічильників, як правило, здійснюється від трансформаторів напруги (ТН) низької сторони 6-10 кВ.

За такої схеми обліку та контролю електроспоживання виникають розбіжності між споживачами та електропостачальними організаціями. З одної сторони організація обліку задовольняє обидві сторони, а з іншого боку внутрішні директиви та інструкції обленерго не дозволяють реалізацію систем обліку електроспоживання подібним чином, вимагаючи здійснювати живлення лічильників від ТН встановлених на високій стороні підстанції.

Однак у цьому випадку для споживача виникає необхідність у придбанні, монтажі та експлуатації досить дорогого обладнання. Природньо, що при цьому виникають суперечки між організаціями, що доходять до вирішення питання у судових інстанціях.

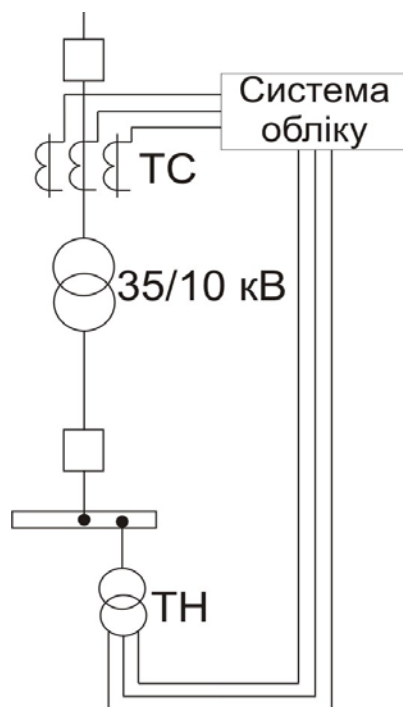


Рисунок 1 – Організація системи обліку на підстанції

Джерело: розроблено авторами

Якщо навіть припустити, що трансформатори струму та напруги в системі обліку ідеальні, тоді для аналізу мережі (рис. 1) доречно використовувати наступну схему заміщення (рис. 2) [9, 10].

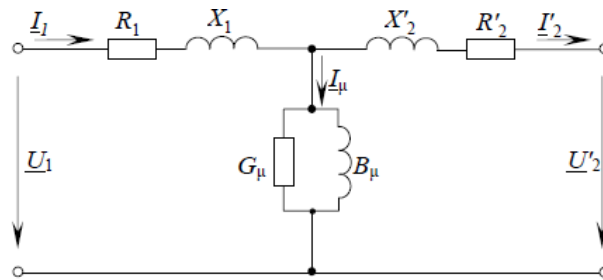


Рисунок 2 – Схема заміщення силового трансформатора

Джерело: розроблено авторами

В даному випадку потужність, що проходить відповідно по високій стороні силового трансформатора та потужність, що вимірюється системою обліку можна записати наступним чином:

$$\underline{S}_1 = \sqrt{3} \underline{U}_1 \cdot I_1^* \quad (1)$$

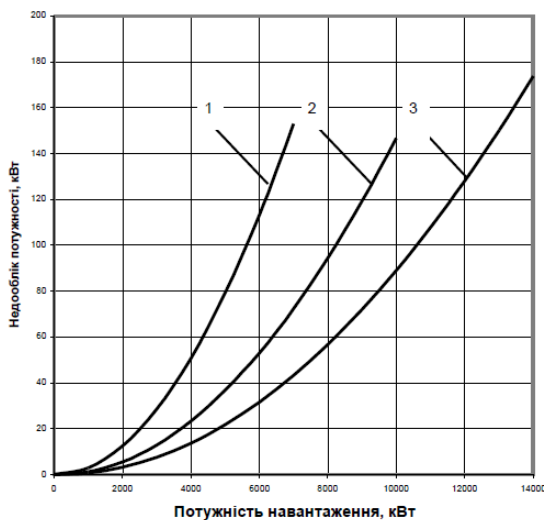
$$\underline{S}_2 = \sqrt{3} \underline{U}_2' \cdot I_1^* \quad (2)$$

Тоді недооблік потужності знаходимо за виразом:

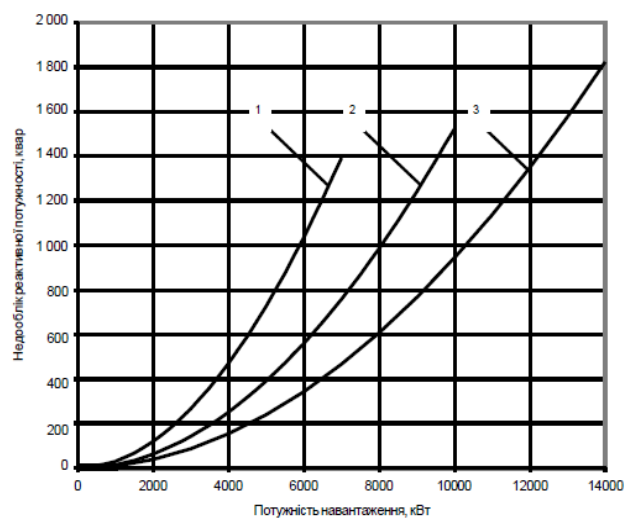
$$\Delta \underline{S} = \underline{S}_1 - \underline{S}_2 = \sqrt{3} (\underline{U}_1 - \underline{U}_2') \cdot I_1^* = \sqrt{3} \Delta \underline{U} \cdot I_1^* \quad (3)$$

Як бачимо з (3) недооблік пропорційний падінню напруги в трансформаторі, яке залежить від потужності навантаження. Крім того, на якість обліку електроенергії впливає схема з'єднання обмоток силового трансформатора, внаслідок зміни кута між струмом та напругою у первинній та вторинній обмотках.

На рис. 3 (а, б) побудовано графіки залежності недообліку активної та реактивної потужності залежно від потужності навантаження. Розрахунок виконаний для найпоширеніших трансформаторів: 1-ТМН-4000/35, 2-ТМН-6300/35 та 3-ТДН-10000/35. Навантаження приймалося чисто активне ($\cos\varphi=1$).



а)



б)

Рисунок 3 – Графіки залежності недообліку активної (а) та реактивної (б) потужності в залежності від навантаження

Джерело: розроблено авторами

З наведених залежностей видно, що недооблік зростає пропорційно до потужності навантаження. Причому для реактивної потужності приблизно на порядок більше, ніж для активної.

Висновок. Таким чином формування системи обліку на надстанціях за схемою (рис. 1) неприпустимо, через недооблік активної та реактивної електроенергії. Для оптимального функціонування систем комерційного обліку на “верхньому” рівні необхідна установка ТН на високій стороні підстанції.

Список літератури

1. Концепція побудови автоматизованих систем обліку електроенергії в умовах енергоринку / А.В. Праховник та ін. *Інформаційний бюлетень НКРЕ*. 2002. № 11. С. 230-261.
2. Піщак Ю., Габльовська Н., Кононенко М. Аналіз методів та заходів із забезпечення точності при проведенні вимірювань та обліку автоматизованою системою комерційного обліку (АСКОЕ) в умовах енергоринку України. *Scientific Collection «InterConf»: Theory and Practice of Science: key aspects*. 2021. № 58. С. 235-249.
3. Заєць А. А., Касаткіна І. В. Сучасні пристрої обліку електричної енергії. *Молодь: наука та інновації* : матеріали 10-ої всеукр. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів і молодих учених, 23–25 листопада 2022 р. Дніпро : НТУ ДП, 2022. С. 310-311.
4. Liubčuk, V.; Radziukynas, V.; Kairaitis, G.; Naujokaitis, D. Power Quality Monitors Displacement Based on Voltage Sags Propagation Mechanism and Grid Reliability Indexes. *Applied Sciences*. 2023. №13(21). P. 11778. <https://doi.org/10.3390/app132111778>
5. Богданов О.М., Плескач Б.М. Інформаційна технологія моніторингу ефективності енергоспоживання технологічних систем. *Штучний інтелект*. 2019. Вип. 1-2. С. 34-42.
6. Похибки каналів вимірювання в системах обліку електроенергії / Калінчик В. та ін. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2021. № 1 (5). С. 58-60.
7. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України. Х. : Видавництво «Форт», 2017. 760 с.
8. Тарифи на електроенергію для підприємств. URL:<https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/electric/prom/>.
9. Загірняк М.В., Невзлін Б. І. Електричні машини: підручник. Київ : Знання, 2009. 399 с.
10. Андрієнко В.М., Куєвда В.П. Електричні машини: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навч. за напрямом підгот. «Електротехніка та електротехнології». К. : НУХТ, 2010. 366 с.

References

1. Prakhovnyk, A.V. et al. (2002) Kontseptsiia pobudovy avtomatyzovanykh system obliku elektroenerhii v umovakh enerhorynku [Concept of building an automated energy metering system in the market conditions]. *Informatsiyni biuleten NKRE – Information Bulletin of NERC, 11*, 230-261 [in Ukrainian].
2. Pischak, Y., Hablovska, N. & Kononenko, M. (2021) Analiz metodiv ta zakhodiv iz zabezpechennia tochnosti pry provedenni vymiriuvan ta obliku avtomatyzovanoiu systemoiu komertsiihoho obliku (ASKOE) v umovakh enerhorynku Ukrainy [Analysis of methods and measures to ensure accuracy in measurements and accounting by the automated commercial accounting system (ASCOE) in the conditions of the energy market of Ukraine]. *Scientific Collection «InterConf»: Theory and Practice of Science: key aspects, 58*, 235-249 [in Ukrainian].
3. Zaiets', A. A. & Kasatkina, I. V. (2022). Suchasni prystroi obliku elektrychnoi enerhii [Modern electrical energy metering devices]. Youth: science and innovation: 10-a Vseukrains'ka naukovo-tekhnichna konferentsiia studentiv, aspirantiv i molodykh uchenykh (23–25 lystopada 2022 r.) – 10th All-Ukrainian scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists (pp. 310-311). Dnipro : NTU DP [in Ukrainian].
4. Liubčuk, V., Radziukynas, V., Kairaitis, G. & Naujokaitis, D. (2023) Power Quality Monitors Displacement Based on Voltage Sags Propagation Mechanism and Grid Reliability Indexes. *Applied Sciences, No.13(21)*, P. 11778. <https://doi.org/10.3390/app132111778> [in English].
5. Bohdanov, O.M. & Pleskach, B.M. (2019). Informatsiina tekhnolohiia monitorynhu efektyvnosti enerhospozhyvannia tekhnolohichnykh system [Information technology for monitoring the efficiency of energy consumption of technological systems]. *Shtuchnyi intelekt – Artificial Intelligence, Vol. 1-2*, 34-42 [in Ukrainian].

6. Kalinchyk, V. et al. (2021). Pokhybky kanaliv vymiriuvannia v systemakh obliku elektroenerhii [Use of Statistical Analysis Methods in Processing Population Survey Data] *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Problemy udoskonaliuvannia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka – Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of improvement of electric machines and devices. Theory and practice, 1 (5), 58–60* [in Ukrainian].
7. *Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok [Rules for arranging electrical installations]* (2017). X. : Vydavnytstvo «Fort» [in Ukrainian].
8. Taryfy na elektroenerhiu dlia pidpriemstv [Electricity tariff for enterprises]. (n.d). *index.minfin.com.ua*. Retrived from <https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/electric/prom/> [in Ukrainian].
9. Zahirniak, M.V. & Nevzlin, B. I. (2009). *Elektrychni mashyny [Electric machines]*. Kyiv : Znannia [in Ukrainian].
10. Andriienko, V.M. & Kuievda, V.P. (2010). *Elektrychni mashyny [Electric machines]*. K. : NUKhT [in Ukrainian].

Andrii Kotysh, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vasyl Zinzura**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Nataliia Harasova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ivan Savelenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Olena Kotysh, Holder of the third (educational and scientific)
Flight Academy of the National Aviation University, Kropyvnytskyi, Ukraine

The influence of the operation of voltage transformers of 35/10 kV substations on the errors of the electricity consumption accounting system

The work is devoted to the issue of the optimal functioning of electricity consumption accounting systems in the conditions of market relations and the related problem of reliable and rational use of the operating modes of voltage transformers. The possibility of organizing the electricity consumption accounting system in the absence of voltage transformers on the high side of the substation was analyzed and the possible under-accounting of electricity in this case was calculated.

The influence of the parameters of power transformers on the operation of the commercial electricity accounting system when current and voltage transformers are installed at different voltage levels is studied. It was determined that the loading of the power transformer and the switching scheme of its windings affects the error value of the measuring channels in the automated systems of control and accounting of electricity.

If you use the classic T-shaped transformer replacement scheme, you can get the equation for its full power. After making some mathematical transformations, we get a formula that calculates the underaccounting of electrical energy. As we can see, the shortfall is proportional to the voltage drop in the transformer, which depends on the load power.

According to the constructed dependences of electric energy underaccounting on the load for several types of power transformers (ТМН-4000/35, ТМН-6300/35, ТДН-10000/35), it was found that the underaccounting of electricity increases in proportion to the load. For reactive power, it is about an order of magnitude more than for active power.

Thus, the formation of the accounting system at substations according to the scheme (Fig. 1) is unacceptable, due to the underaccounting of active and reactive electricity. For the optimal functioning of the accounting systems at the "upper" level, it is necessary to install a voltage transformer on the high side of the substation.

power consumption system, voltage transformer, active and reactive electricity

Одержано (Received) 30.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 28.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 624.078.7

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.70-76](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.70-76)**Д.Б. Романенко**, викл. техн. дисциплін*ВСП «Рубіжанський фаховий коледж» ДЗ «Луганський національний університет імені Тараса Шевченка», м. Рубіжне, Україна
e-mail: alpintel@ukr.net*

Чисельне дослідження міцності бібетонних армованих балок, що працюють на згин

Одним з методів відновлення експлуатаційних якостей залізобетонних згинаних елементів є підсилення їх стиснутої зони. Це підсилення виконується шляхом влаштування надбетонки, зазвичай, із бетону іншого класу, ніж існуючий елемент. У роботі виконано чисельно-теоретичне дослідження положення нульової лінії у залізобетонних балках, виготовлених із бетонів різних класів у розтягнутій та стиснутій частинах поперечного перерізу.

бібетонні армовані балки, згин, чисельне дослідження

Постановка проблеми. Останнім часом в Україні значно підвищився обсяг монолітного будівництва, різноманітних об'єктів з використанням залізобетону, тому тема дослідження є актуальною [3]. Скороченням витрати цементу при цьому можливе за рахунок застосування в розтягнутій зоні елементів, що згинаються, бетону нижчого класу. Цей показник буде ще вищим при виконанні великопролітних монолітних балок зі значною висотою поперечного перерізу.

На даний час багато робіт присвячено вивченню комбінованого комплексного підсилення балок [4]. Але у той же час питання нових комбінованих (бібетонних) залізобетонних конструкцій розкрито не в достатній мірі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток номенклатури будівельних конструкцій передбачає як пошук принципово нових типів елементів з одного матеріалу чи у поєднанні декількох матеріалів для сумісної взаємовигідної їх роботи, так і вдосконалення існуючих будівельних виробів, а саме зменшення їх ваги при забезпеченні тієї ж несучої здатності, підвищення технологічності виготовлення тощо [11]. Це питання ще більш гостро стоїть у залізобетонних конструкціях, що працюють на згин, так як розтягнутий бетон не враховується у розрахунку загальної несучої здатності конструкції, а тільки підвищує її вагу, а отже і затрати на виготовлення. Саме тому заміна розтягнутого бетону у таких конструкціях на більш дешевий матеріал, наприклад, бетон меншого класу по міцності чи із пористими заповнювачами, є актуальною проблемою.

Свої роботи дослідженню підсилення залізобетонних конструкцій присвятили Л.В. Афанасьєва, А.Я. Барашиков [1-2], С.В. Бондаренко, Б.А. Боярчук, А.Б. Голишев [4], О.Ю. Єрьоменко [8], І.В. Задорожнікова, Д.Н. Лазовский, Д.В. Кочкар'юв [9], А.І. Мальганов, Мохамед Х.К. [10], Л.А. Мурашко, Н.М. Онуфрієв, Е.Р. Хіло [11], В.В. Душин і багато інших.

В існуючих публікаціях досліджень розглядалися підсилення залізобетонних конструкцій різними матеріалами. Виконано порівняння підсилення експериментально випробуваних різних балок: непідсилення, підсилені шаром сталевібробетону, полімер-

бетоном, армованим полімербетоном, дрібнозернистим бетоном і арматурою та інші. У порівнянні з непідсиленими зразками, усі способи підсилення значно збільшили несучу здатність. Для балок, підсилених шаром армованого сталевібробетону та полімербетону, несуча здатність збільшилася приблизно в 1,4 рази [1; 2; 10]. А в балках підсилених шаром армованого дрібнозернистого бетону показник збільшення несучої здатності дещо менше – близько 1,18 [8]. Підсилувати залізобетонні елементи можливо не лише збільшенням поперечного перерізу при обетонуванні, а і влаштуванням попереднього напруження у зоні розтягнутого бетону [12,13].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Недостатньо вирішеною частиною залишилось питання визначення впливу висоти розтягнутого бетону меншого класу на загальну несучу здатність залізобетонної конструкції, що працює на згин.

Метою даної роботи є чисельно-теоретичне визначення положення нульової лінії у однопролітних залізобетонних балках прямокутного поперечного перерізу із застосуванням різних бетонів у розтягнутій та стиснутій зонах; причому необхідно дослідити різне процентне співвідношення цих бетонів по висоті поперечного перерізу.

Виклад основного матеріалу. Як було зазначено, зменшення вартості залізобетонних конструкцій, що працюють на згин, за рахунок застосування у розтягнутій зоні бетонів меншого класу, завжди є актуальною задачею. З огляду на розходження міцності бетону при роботі на розтяг і стиск, а так само характер тріщиноутворення по нормальних перетинах елементів, що згинаються, потрібно поставити задачу дослідження міцності балок виготовлених з бетонів різних класів. Для цього змодельовані балки, розрахункова схематична схема яких показана на рис. 1.

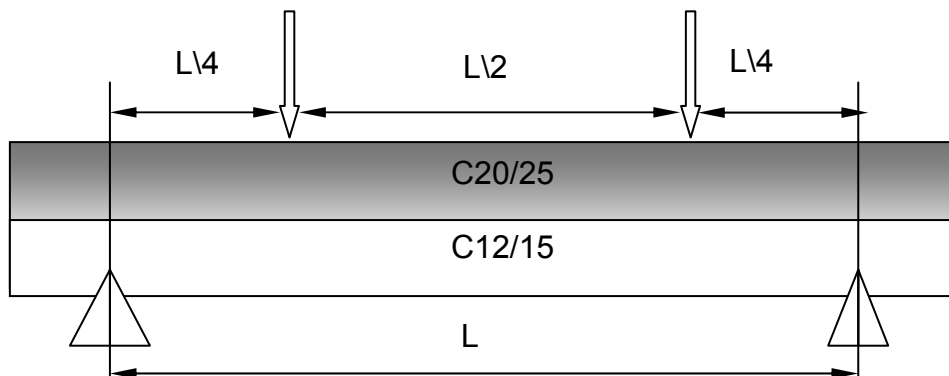


Рисунок 1 – Розрахункова схематична схема досліджуваних бібетонних армованих балок
Джерело: розроблено автором

Згідно поставленій задачі, а саме оптимізації геометричних параметрів розташування бетонів різних класів по висоті перерізів згинаних залізобетонних конструкцій, було змодельовані та проаналізовані результати розрахунку напружено-деформованого стану залізобетонних однопролітних балок прямокутного поперечного перерізу розміром $b \times h = 100 \times 150$ мм. Довжина балок складала 1200 мм. Верхня стиснута частина балок моделювалася із бетону класу C20/25, а нижня розтягнута частина – із бетону класу C12/15 (див. рис. 1). Армвання балки виконувалось двома арматурними стержнями $\varnothing 12$ мм періодичного профілю класу A400C у розтягнутій зоні. Конструктивна арматура каркасу балки під час моделювання не враховувалась.

Завантажувалися балки двома силами рівновіддаленими від опор, таким чином, щоб посередині балки виникала ділянка із чистим згином. На кінцях балки прикладались шарнірні опори для яких змодельовані наступні граничні умови:

заборона переміщень у вертикальній площині XZ і дозволені переміщення по горизонтальній поздовжній осі Y.

Для матеріалів (бетонів двох класів та арматури) задавалися модулі пружності E та G , коефіцієнта Пуассона ν . Для врахування повних діаграм деформування матеріалів, задавалися функціональні залежності згідно ДБН В.2.6-98:2009 «Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування» [5]. Для проведених паралельно із теоретичними експериментальними дослідженнями, склад бетонів та визначення їх міцності за контрольними зразками визначалися згідно ДСТУ Б В.2.7-215:2009 «Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу» [7] та ДСТУ Б В.2.7-214:2009 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками» [6].

У програмному комплексі LIRA була змодельована балка таким чином, що 156 елементів були задані жорсткістю бетону класу C20/25 (у стиснутій зоні), а 78 елементів задані жорсткістю бетону класу C12/15 (у розтягнутій зоні). Тобто створена модель балки з різних класів бетону (див. рис. 2). Отримані результати розрахунку досліджуваних бібетонних балок у програмному комплексі LIRA приведені на рис. 3.

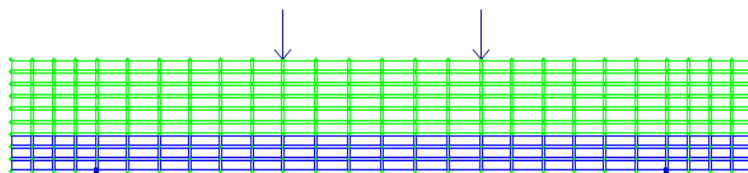


Рисунок 2 – Схема змодельованої бібетонної балки у програмному комплексі Lira з бетонів класу C20/25 і C12/15 зі співвідношенням висот $h_{ст.} / h_{розт.} = 2$

Джерело: розроблено автором

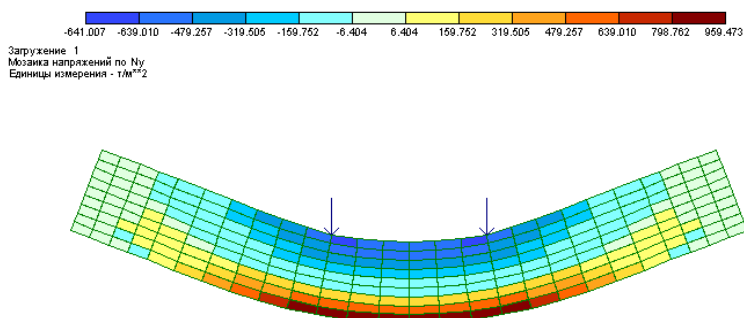


Рисунок 3 – Результати розрахунку змодельованої бібетонної балки у програмному комплексі LIRA з бетонів класу C20/25 і C12/15

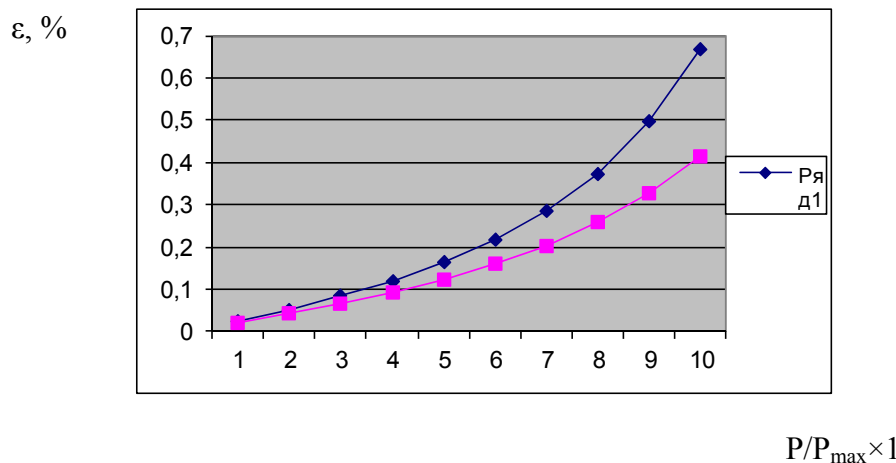
Джерело: розроблено автором

Також була змодельована балка з однорідного бетону класу C12/15, з такими ж геометричними характеристиками, як і вище описана. З отриманих результатів моделювання знайдені максимальні відносні деформації елементу 135 (цей вузол знаходиться посередині балки у розтягнутій зоні і є одним із найбільш «слабких» елементів в досліджуваних балках). Відносні деформації цього елементу на кожній із ступеня навантаження занесені до таблиці 1. Графічно зміна відносних деформацій вказаного елементу комбінованої бібетонної та бетонної балок показано на рис. 4.

Таблиця 1 – Відносні деформації (%) найбільш напруженого елемента посередині прольоту балки

Балка, Елемент 135	Навантаження P/P_{max}									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Бетонна балка	0.02425	0.05164	0.08301	0.11957	0.16308	0.21631	0.28384	0.37345	0.49699	0.66657
Бібетонна балка	0.01963	0.04128	0.0654	0.0926	0.12374	0.16008	0.20349	0.25692	0.3251	0.41556

Джерело: розроблено автором



Ряд 1 – бібетонна, ряд 2 – бетонна балки

Рисунок 4 – Графічне зображення отриманих результатів дослідження – зміни відносних деформацій найбільш напруженого скінченного елемента посередині балки

Джерело: розроблено автором

Для порівняння скінченно-елементний аналіз моделей бібетонних балок із врахуванням фізичної нелінійності бетону, геометричної нелінійності роботи композитного залізобетонного стержня та реологічних властивостей бетону виконано в системі NASTRAN (NAsa STRuctural ANalysis) Femap 10.1.1 SC 32bit / 64 bit. Були змодельовані, розраховані та виконані аналізи розрахунків балок із різним процентним співвідношенням бетонів класів C12/15 та C20/25. На рис. 5 показано три типи балок із різним типом співвідношення бетонів різних класів.

При виборі типу та розмірів скінченних елементів (СЕ), на які розбивалась створена модель, враховано час створення об'ємної скінченно-елементної сітки, необхідний дисковий простір для проведення програмним комплексом NASTRAN розрахунку, збіжність отриманих результатів при розрахунку моделей, розбитих різними СЕ. Під час порівняння збіжності отриманих результатів вирішено розбивати модель на тетраедри із стороною рівною 1-2% від загальної довжини окремого елемента зразка. Такі розміри СЕ забезпечують середньоквадратичне відхилення всіх розрахунків до 0,5%. При дослідженні моделей зразків об'ємні моделі стали та бетону створювалися окремо, а потім виконувалося об'єднання співпадаючих вузлів елементів.

У результаті даних розрахунків отримано графіки положення нульової лінії (зони розтягнутого бетону) по довжині балок. Найбільш інформативні результати розрахунку показані на графічному рис. 6. Слід відмітити, що деякі явні неточності у припорних зонах обумовлені задаванням граничних умов тільки на нижній частині

балок. Тому на бокових гранях балок відсутні напруження, а отже і нульова лінія прямує до нижніх змодельованих опорних частин.

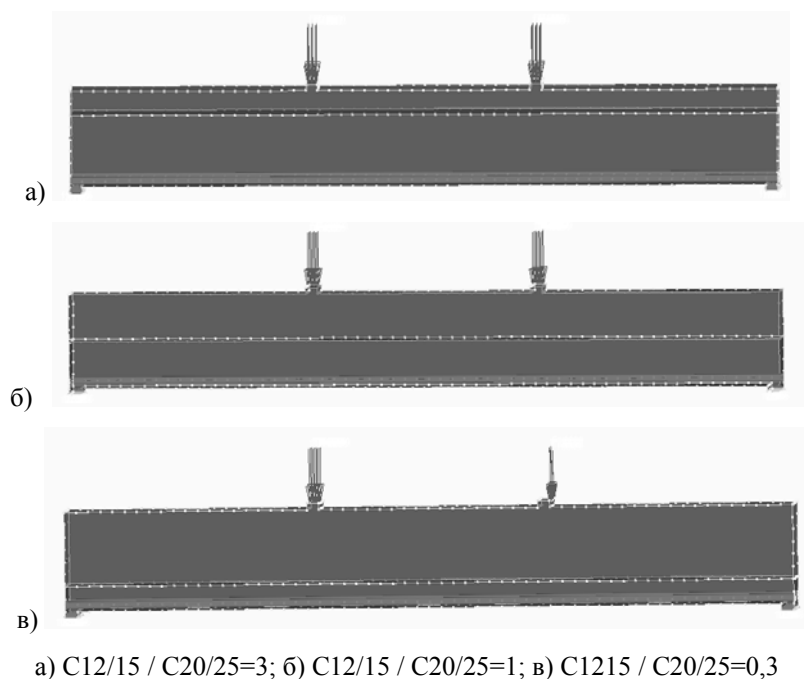


Рисунок 5 – Моделі аналізованих бібетонних балок із співвідношенням класів розтягнутого до стиснутого бетонів

Джерело: розроблено автором

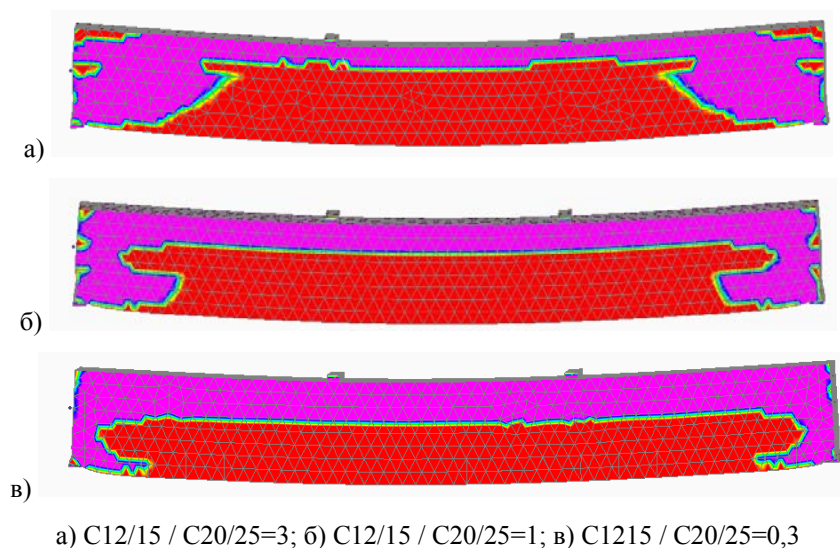


Рисунок 6 – Положення нульової лінії у бібетонних балках із співвідношенням класів розтягнутого до стиснутого бетонів

Джерело: розроблено автором

Висновки. З отриманих досліджень видно, що бібетонні балки в порівнянні з бетонними балками, витримують більше навантаження. Отже зменшується переріз залізобетонної балки і зменшується її кошторисна вартість. Різне співвідношення розтягнутого та стиснутого бетонів по висоті поперечного перерізу бібетонних балок, по різному впливає на загальну несучу здатність балок. У перспективі подальших

розробок за даним напрямком потрібно отримати оптимальні співвідношення міцності бетону розтягнутої і стиснутої зон при різних відношеннях їх товщини.

Список літератури

1. Барашиков А.Я., Блалі ель Мустафа. Вплив способу підсилення на міцність, тріщиностійкість та прогини залізобетонних балок. *Зб. наук. пр. НУВГП: Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2003. Вип. 9. С. 416-424.
2. Барашиков А.Я., Сунак О.П., Боярчук Б.Я. Експериментальні дослідження згинальних залізобетонних елементів, підсилені різними способами. *Зб. наук. пр. НУВГП: Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2000. Вип. 5. С. 294-297.
3. Гарькава О.В., Гасенко А.В. Визначення міцності залізобетонних колон при косому стиску. *Наука та будівництво*. 2017. Вип.4 (14). С. 29-35.
4. Голишев А.Б., Ткаченко Й.Н. Підсилення несучих залізобетонних конструкцій виробничих будівель та просядочних основ. К: Логос, 2004. 219 с.
5. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування. Київ: М-во регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2009.
6. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. [Чинний від 2010-09-01]. Київ: Мінрегіонбуд України.
7. ДСТУ Б В.2.7-215:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу. [Чинний від 2010-09-01]. Київ: Мінрегіонбуд України.
8. Єрьоменко О.Ю. Ефективність варіантів підсилення у стиснутій зоні залізобетонних елементів, що працюють на згин: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук: 05.23.01. Київ, 2006. 20 с.
9. Кочкар'юв Д.В. Інженерні методи розрахунку залізобетонних статично невизначених стержневих систем. *Зб. наук. пр. УкрДУЗТ*. 2017. Вип. 170. С. 98-104.
10. Мохамед Х.К., Барашиков А.Я., Мурашко Л.А. Міцність залізобетонних нерозрізних балок після їх підсилення. К: Вища школа, 1995. 591 с.
11. Хіло Е.Р., Попович Б.С. Підсилення залізобетонних конструкцій із зміною їх розрахункового напруженого стану. Львів: Вища школа, 2005. 38 с.
12. Pavlikov A.M., Harkava O.V., Hasenko A.V. & Andriets K.I. Comparative analysis of numerical simulation results of work of biaxially bended reinforced concrete beams with experimental data. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2019. Vol. 77. P. 84-92. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2019-77-84-92>
13. Wang C., Shen Y., Yang R. & Wen Z. Ductility and Ultimate Capacity of Prestressed Steel Reinforced Concrete Beams. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*. 2017. Vol. 6, 1467940. <https://doi.org/10.1155/2017/1467940>

References

1. Barashykov, A.Ia. & Blali el Mustafa (2003). Vplyv sposobu pidsylenня na mitsnist', trishchynostyjkist' ta prohyny zalizobetonnykh balok [The influence of the method of reinforcement on the strength, crack resistance and deflection of reinforced concrete beams]. *Zb. nauk. pr. NUVHP: Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy – Coll. of science Ave. NUVHP: Resource-saving materials, constructions, buildings and structures*, 9, 416-424 [in Ukrainian].
2. Barashykov, A.Ia., Sunak, O.P. & Boiarchuk, B.Ia. (2000). Eksperymental'ni doslidzhennia zghynal'nykh zalizobetonnykh elementiv, pidsylenykh riznymy sposobamy [Experimental studies of bending reinforced concrete elements reinforced by various methods]. *Zb. nauk. pr. NUVHP: Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy – Coll. of science Ave. NUVHP: Resource-saving materials, constructions, buildings and structures*, 5, 294-297 [in Ukrainian].
3. Har'kava, O.V. & Hasenko, A.V. (2017). Vyznachennia mitsnosti zalizobetonnykh kolon pry kosomu stysku [Determination of the strength of reinforced concrete columns under oblique compression]. *Nauka ta budivnytstvo – Science and construction*, 4 (14), 29-35 [in Ukrainian].
4. Holyshev, A.B. & Tkachenko, Y.N. (2004). Pidsylenня nesuchykh zalizobetonnykh konstruksij vyrobnychykh budivel' ta prosadochnykh osnov [Reinforcement of load-bearing reinforced concrete structures of industrial buildings and subsidence foundations] Logos [in Ukrainian].
5. Betonni ta zalizobetonni konstruksii. Osnovni polozhennia proektuvannia [Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions of design]. (2009). *DBN V.2.6-98:2009*. Kyiv: Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy [in Ukrainian].

6. Budivel'ni materialy. Betony. Metody vyznachennia mitsnosti za kontrol'nyimi zrazkamy [Building materials. Concretes. Methods of determination of strength according to control samples]. (2010). *DSTU B V.2.7-214:2009 from September 1, 2010*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy [in Ukrainian].
7. Budivel'ni materialy. Betony. Pravyla pidboru skladu [Building materials. Concretes. Rules of composition selection]. (2010). *DSTU B V.2.7-215:2009 from September 1, 2010*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy [in Ukrainian].
8. Yer'omenko, O.Yu. (2006). Efektyvnist' variantiv pidsylennia u stysnutij zoni zalizobetonnykh elementiv, scho pratsiuut' na zghyn [Effectiveness of reinforcement options in the compressed zone of reinforced concrete elements operating in bending]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
9. Kochkar'ov, D. V. (2017). Inzhenerni metody rozrakhunku zalizobetonnykh statychno nevyznachnykh sterzhnevnykh system [Engineering methods of calculating reinforced concrete statically indeterminate rod systems]. *Zb. nauk. pr. UkrDUZT – Coll. of science UkrDUZT Ave, 170*, 98-104 [in Ukrainian].
10. Mokhamed, Kh.K., Barashykov, A.Ia. & Murashko, L.A. (1995). Mitsnist' zalizobetonnykh nerozriznykh balok pislia ikh pidsylennia [Strength of reinforced concrete uncut beams after their reinforcement]. Kyiv :Vyscha shkola [in Ukrainian].
11. Khilo, E.R. & Popovych, B.S. (2005). Pidsylennia zalizobetonnykh konstruksij iz zminoiu ikh rozrakhunkovoho napruzhenoho stanu [Strengthening of reinforced concrete structures with a change in their estimated stress state]. Lviv: Vyshcha shkola [in Ukrainian].
12. Pavlikov, A.M., Harkava, O.V., Hasenko, A.V. & Andriiets, K.I. (2019). Comparative analysis of numerical simulation results of work of biaxially bended reinforced concrete beams with experimental data. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Vol. 77*, P. 84-92 <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2019-77-84-92> [in English].
13. Wang, C., Shen, Y., Yang, R. & Wen, Z. (2017). Ductility and Ultimate Capacity of Prestressed Steel Reinforced Concrete Beams. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering, Vol. 6*, 1467940 <https://doi.org/10.1155/2017/1467940> [in English].

Dmytrii Romanenko, Lecturer of technical disciplines

VSP «Rubizhan Vocational College» DZ «Luhansk National University named after Taras Shevchenko», Rubizhne, Ukraine

Numerical study of the strength of bi-concrete reinforced bent beams

One of the methods of restoring the operational qualities of reinforced concrete bent elements is to strengthen their compressed zone. This reinforcement is performed by placing a concrete overlay, usually of a different grade of concrete than the existing element. In existing research publications, reinforcement of reinforced concrete structures with various materials was considered. A comparison of the reinforcement of experimentally tested different beams was made: unreinforced, reinforced with a layer of steel fiber concrete, polymer concrete, reinforced polymer concrete, fine-grained concrete and reinforcement, and others. Compared to unreinforced samples, all reinforcement methods significantly increased the load-bearing capacity. For beams reinforced with a layer of reinforced steel fiber concrete and polymer concrete, the bearing capacity increased by approximately 1.4 times. And in beams reinforced with a layer of reinforced fine-grained concrete, the indicator of the increase in bearing capacity is slightly less - about 1.18.

In the work, a numerical and theoretical study of the position of the zero line in reinforced concrete beams made of concrete of different classes in the stretched and compressed parts of the cross section is performed. According to the task, namely the optimization of the geometric parameters of the location of concrete of different classes according to the height of the sections of bent reinforced concrete structures, the results of the calculation of the stress-strain state of reinforced concrete single-span beams with a rectangular cross-section of size $b \times h = 100 \times 150$ mm were simulated and analyzed. The length of the beams was 1200 mm. The upper compressed part of the beams was modeled from C20/25 class concrete, and the lower stretched part - from C12/15 class concrete. The beam was reinforced with two reinforcing rods $\varnothing 12$ mm of periodic profile class A400C in the stretched zone. Structural reinforcement of the beam frame was not taken into account during modeling.

From the obtained studies, it can be seen that bi-concrete beams, in comparison with concrete beams, withstand more load. Therefore, the cross-section of the reinforced concrete beam decreases and its estimated cost decreases. The different ratio of stretched and compressed concrete to the height of the cross-section of bi-concrete beams has different effects on the overall load-bearing capacity of the beams. In the perspective of further developments in this direction, it is necessary to obtain optimal ratios of the concrete strength of the stretched and compressed zones at different ratios of their thickness.

Bi-concrete reinforced beams, bending, numerical study

Одержано (Received) 18.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 22.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 624.016:624.044.3

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.77-83](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.77-83)**А.В. Гасенко**, доц., д-р техн. наук*Навчально-науковий інститут Архітектури, будівництва та землеустрою
Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»,
м. Полтава, Україна**e-mail: gasentk@gmail.com***В.В. Дарієнко**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,
Україна**e-mail: vvdarienko@gmail.com***М.В. Бібік**, доц., канд. техн. наук*Директор ТОВ «СОЛІД ПОЛТАВА», м. Полтава, Україна**e-mail: nbibik@gmail.com***Д.В. Бібік**, канд. техн. наук*ТОВ «ПБ «ІНТЕРСТАЛЬ», м. Полтава, Україна**e-mail: dmytro.bibik@gmail.com***В.В. Слонь**, доц., канд. техн. наук*Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон, Україна**e-mail: viktor.ukrain2015@gmail.com*

Огляд впливу повзучості бетону на роботу попередньо-напружених сталезалізобетонних конструкцій споруд цивільного захисту

Реологічні властивості бетону в основному визначаються його властивостями повзучості. У випадку попереднього напруження сталезалізобетонної конструкції відбувається перерозподіл зусиль в її перерізі між сильно навантаженими і малонавантаженими елементами, а саме між сталевим армуванням і бетоном. У роботі проаналізовано загальні відомості про повзучість бетону та її вплив на втрати під час попереднього напруження, в тому числі із застосуванням сучасних програм скінченно-елементного моделювання, що дозволяють задавати фізичну нелінійність бетону і його реологічні властивості.

сталезалізобетонні конструкції, попереднє напруження, повзучість бетону

Постановка проблеми. Сталезалізобетонні конструкції є одними із ефективних типів комплексних конструктивних елементів. Саме такі конструкції створюються як під час нового проектування, так і під час підсилення залізобетонних конструкцій сталевим прокатом, а сталевих – обетонуванням [9]. У кожному із зазначених випадків створення сталезалізобетонних конструкцій актуальним питанням є сумісна робота складових конструкції (прокатного і стрижневого армування з бетоном). З іншої сторони, саме за рахунок забезпечення сумісної роботи бетонної та сталеві частин, можливо створювати в них попередні напруження (зусилля), які будуть протилежні тим, що виникатимуть в робочому стані конструкції. Ця перевага сталезалізобетону дозволяє регулювати напружено-деформований стан її складових, підвищити загальну несучу здатність й жорсткість конструкції та, як результат, зекономити матеріали під час виготовлення [4]. За рахунок високого ступеня живучості, сталезалізобетон ефективно використовують для зведення споруд цивільного захисту.

Реологічні властивості бетону в основному визначаються його властивостями

повзучості, які впливають на напружено-деформований стан конструкції в часі. При попередньому напруженні сталезалізобетонної конструкції відбувається перерозподіл зусиль в її перерізі між високонавантаженими та малонавантаженими елементами, а саме між сталевим прокатним чи стержневим армуванням та бетоном. Слід зазначити, що несучий каркас будівель і споруд (крім надійності, безпечної експлуатації та економічної доцільності) повинен гарантувати функціональну придатність. Визначити функціональну придатність конструкції неможливо без правильного прогнозу перерозподілу напружень у часі між бетоном і арматурою, що виникає в результаті повзучості бетону [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перерозподіл зусиль у попередньо напружених сталезалізобетонних конструкціях, що виникає на етапах їх виготовлення, монтажу й експлуатації, дозволяє регулювати згідно ресурсощадних проектних рішень внутрішні зусилля у перерізах цих конструкцій, в тому числі під час дії техногенних навантажень на споруди цивільного захисту. У роботі [7] виконано узагальнення конструктивних особливостей й принципів створення попереднього напруження компонентів згинаних сталезалізобетонних конструкцій суцільного поперечного перерізу, а також виокремлено серед них ефективних методів створення попередніх самоупругень – попередніх внутрішніх напружень, протилежних тим, що виникають у процесі експлуатації за допомогою конструктивних заходів чи технології будівництва без застосування енерговитратних методів процесу напруження.

Як зазначено у [7], попередні напруження у сталезалізобетонних конструкціях можливо створити шляхом влаштування додаткових попередньо напружених арматурних стержнів (затяжок) у розтягнутій зоні перерізу. Проте такі заходи одночасно із підвищенням несучої здатності й жорсткості згинаних елементів, вимагають додаткових витрат на матеріали і саме влаштування цих стержнів [6]. З іншого боку ресурсощадні попередні самоупругення в елементах згинаних сталезалізобетонних конструкцій можливо створити за рахунок вдало підібраної конструкції вузлів і розробки технології виготовлення чи попередньої укрупнювальної збірки під час монтажу конструкцій [4]. Наприклад, самонатяг встановленої ззовні затяжки під час навантаження можливо виконати за допомогою системи поперечних стержнів, важільно-стрижневої чи важільно-коткової систем. Також, конструктивно забезпечивши нерозрізну схему роботи декількох сталезалізобетонних конструкцій у суміжних прольотах, можливо досягти раціонального перерозподілу зусиль в їх перерізах шляхом постадійної схеми бетонування верхньої монолітної залізобетонної полицки та відповідним включенням розтягнутої сталеві частини перерізу в роботу.

Під час експлуатації попередньо напружених сталезалізобетонних конструкцій при тривалій дії навантаження основною причиною збільшення прогинів буде повзучість бетону стиснутої зони перерізу. У процесі повзучості, напруження в бетоні зменшуються, а в арматурі, навпаки, зростають [2]. Внаслідок перерозподілу напружень, зусилля, що виникають у стрижневій арматурі можуть досягати критичних значень. У [1] експериментально встановлено, що між кількісною оцінкою тривалих деформацій у стиснутій зоні бетону та деформаціями бетонних призм при однаковому рівні навантаження існує суттєва відмінність. Цю відмінність слід враховувати шляхом множення характеристики повзучості бетону при осьовому стиску на коефіцієнт повноти епюри напружень у стиснутій зоні бетону. Кривизну згинальних залізобетонних елементів слід визначати по нормативній методиці розрахунку прогинів із врахуванням уточнюючих коефіцієнтів врахування повзучості бетону, що залежать від віку бетону в момент навантаження, модуля пружності відкритої поверхні бетону та відносної вологості середовища експлуатації конструкції.

Для коректного врахування функції повзучості бетону із врахуванням зміни температури оточуючого середовища під час скінченно-елементних розрахунків залізобетонних конструкцій, у програмному комплексі «ЛІРА-САПР» реалізовано декілька спеціальних скінченних елементів [3].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Із аналізу існуючих результатів досліджень та публікацій встановлено, що детальному вивченню реологічних властивостей бетону у попередньо напруженому залізобетоні присвячено досить велика кількість теоретичних та експериментальних досліджень, що безумовно доводить актуальність даного питання. Проте вивченню впливу повзучості бетону у згинаних сталезалізобетонних конструкціях, що у порівнянні із типовими попередньо напруженими залізобетонними конструкціями мають значно вищий коефіцієнт армування поперечного перерізу, приділено досить незначний обсяг уваги.

Завданнями проведених авторами досліджень є:

1) охарактеризувати повзучість бетону як складової втрат попередньо-напружених комбінованих сталезалізобетонних конструкцій; виконати аналіз зміни коефіцієнта повзучості бетону в часі в залежності від температури та рівня навантаження;

2) розглянути алгоритм врахування повзучості бетону під час створення розрахункових моделей попередньо напружених сталезалізобетонних конструкцій в програмах скінченно-елементного моделювання.

Виклад основного матеріалу. *Будова бетону.* Макроскопічний розгляд бетону показує, що він має неоднорідну будову. Вона утворена зернами дрібного й крупного заповнювачів, що зв'язані між собою затверділим цементним каменем у одне монолітне тіло (див. схему на рис. 1). Бетон має велику кількість мікропор й капілярів. Цементний камінь складається з пружних затверділих кристалічних зростків, а також із пластичної пористої маси, що прийнято називати гелем. Така досить складна структура бетону утворюється під час приготування бетонної суміші та у процесі його твердіння. Досить тривалі процеси кристалізації й зменшення об'єму гелю суттєво впливають на міцність та деформативність бетону. Саме наявність у структурі бетону пластичного гелю спричинює його повзучість в часі. Саме через неоднорідну структуру бетону, під час навантаженні у ньому виникає складний напружено-деформований стан. У стиснутому бетонному елементі напруження концентруються на більш жорстких частинках крупного заповнювача, які мають більш високий модуль пружності. Унаслідок цього на площинах з'єднання цих частинок виникають зусилля, які намагаються порушити зв'язок між ними. Одночасно у місцях послаблення тріщинами та пустотами концентруються стискальні й розтягувальні напруження. Довільне розташування зерен крупного заповнювача у затверділому бетоні і пор у цементному камені призводить до істотних розбіжностей показників міцності зразків, які виготовлені з одного бетону. Тому оцінка міцності бетону базується на випробуваннях спеціальних зразків (кубів та призм) і визначенні їх головних характеристик, саме які приймають для розрахунку комбінованих сталезалізобетонних конструкцій.

Види деформацій бетону. У бетоні розрізняють деформації двох основних видів (див. схему на рис. 2): об'ємні, що виникають у всіх напрямках під впливом усадки під час твердіння бетону, зміни температури та вологості, а також силові, що розвиваються головним чином в напрямку дії внутрішніх сил під час навантаження конструкції [5]. Силові поздовжні деформації супроводжуються поперечними, що обумовлено початковим коефіцієнтом поперечних деформацій Пуассона (для бетону $\nu = 0,2$). Силові деформації залежно від характеру навантаження і його тривалості поділяються на три підвиди: при одноразовому завантаженні короткочасним навантаженням, при довготривалій дії навантаження і при багаторазово повторюваній дії навантаження.

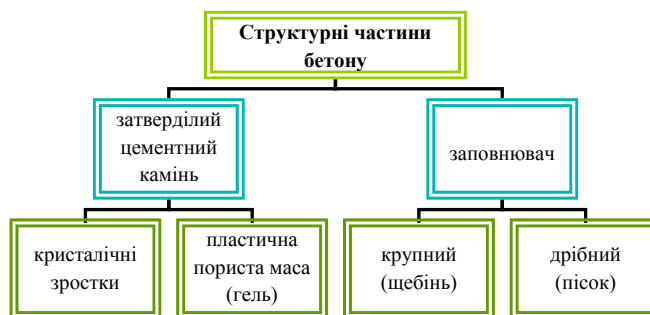


Рисунок 1 – Класифікаційна схема будови бетону

Джерело: розроблено авторами

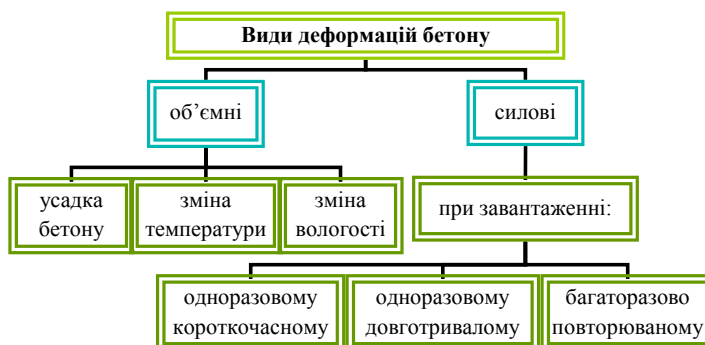


Рисунок 2 – Класифікаційна схема видів деформацій бетону

Джерело: розроблено авторами

Як було зазначено, бетон є пружно-пластичним матеріалом. Тому в ньому поряд з пружними деформаціями виникають непружні чи пластичні незворотні (тобто такі, що не зникають після зняття навантаження). Під час тривалої дії навантаження на комбінований сталезалізобетонний елемент непружні деформації у бетоні з часом зростають. Найбільший зріст непружних деформацій спостерігається протягом перших трьох-чотирьох місяців експлуатації конструкції, а загалом він може продовжуватися аж декілька років. Властивість бетону акумулювати непружні деформації при тривалій дії навантаження називають *повзучістю бетону*. Непружні деформації повзучості бетону можуть бути у 3...4 рази більшими за пружні деформації. Суть виникнення повзучості пояснюється будовою бетону, тривалими процесами кристалізації й зменшенням кількості гелю. Під дією зовнішнього навантаження напруження, що виникають в бетоні, перерозподіляються із в'язкої гелевої структури на кристалічні зростки та зерна заповнювачів. З часом процес перерозподілу напружень стихає і деформування припиняється, чим пояснюється сповільнення повзучості напруженого бетону. За тривалої дії зовнішнього постійного навантаження деформації повзучості у бетоні проявляються вільно, напруження залишаються незмінними. За наявності у бетоні внутрішніх арматурних стержнів, що не дозволяють вільно проявлятися у бетоні деформаціям повзучості, напруження не будуть залишатися постійними, а з часом будуть зменшуватися. Це явище називають релаксацією напружень у бетоні.

Наведемо основні закономірності розвитку повзучості бетону. Незалежно від швидкості навантаження елемента до однакового рівня напружень в бетоні, деформації повзучості бетону будуть однаковими. Завантажений в ранньому віці бетон має більші показники повзучості ніж старий. Повзучість бетону в сухому середовищі значно більша ніж у вологому. Повзучість бетону зростає зі збільшенням водо-цементного

відношення й кількості цементу на одиницю об'єму бетонної суміші. Із збільшенням міцності зерен заповнювачів повзучість зменшується.

Алгоритм врахування повзучості бетону під час створення скінченно-елементних (СЕ) розрахункових моделей попередньо напружених сталезалізобетонних конструкцій (СЗБК). Популярність використання методу СЕ для аналізу напружено-деформованого стану конструкцій сприяла створенню ряду комерційних пакетів програм, серед яких в механіці можна відзначити NASTRAN, ANSYS, SCAD, Lira, Cosmos, ASKA. Ці програми використовуються для статичних, динамічних та інших розрахунків складних композитних конструкцій із нерегулярною геометричною конфігурацією й несистематичною фізичною структурою. За допомогою цих програм можливо враховувати фізичну нелінійність бетону, геометричної нелінійності роботи композитного сталезалізобетонного елемента та реологічні властивості бетону (рис. 3).

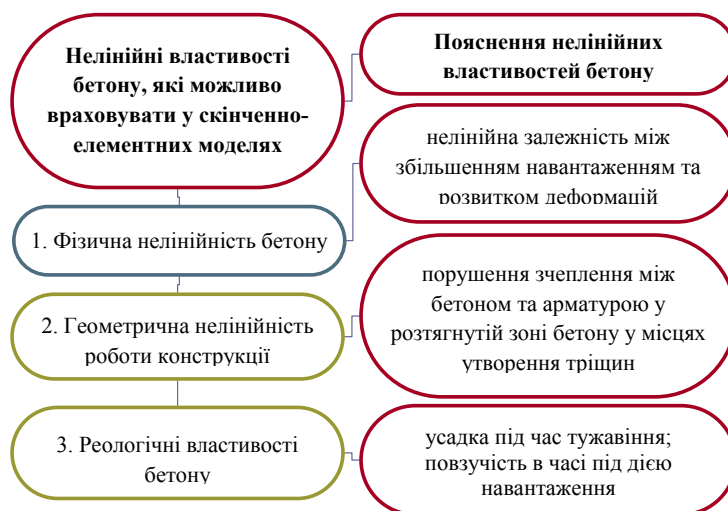


Рисунок 3 – Врахування нелінійних реологічних властивостей бетону під час СЕ моделювання
Джерело: розроблено авторами

Достовірність результатів СЕ моделювання НДС СЗБК та їх схожість із результатами теоретичних розрахунків згідно з діючими нормативними документами і результатами експериментальних досліджень буде тим вище, чим точніше буде створена СЕ модель комбінованих конструкцій [8]. Під створенням СЕ моделі СЗБК мається на увазі відповідність геометричних параметрів моделі, фізико-механічних властивостей матеріалів та граничних умов дійсним умовам завантаження та закріплення. Модель створюють за алгоритмом:

- створення об'ємної геометричної моделі сталезалізобетонного елемента;
- задавання дволінійної діаграми роботи сталевих прокатів та фізичної нелінійності й реологічних властивостей бетону;
- вибір типу, розмірів і властивостей СЕ, розбиття на них геометрії моделі;
- задавання попереднього натягу сталевих стержневих чи прокатних елементів;
- задавання в'язей, що прикладаються до опорних площин конструкції;
- задавання зосереджених чи розподілених навантажень на площадках чи об'ємах;
- видалення зайвих елементів геометрії чи частин скінченно-елементної сітки;
- задавання характеристик, проведення і контроль процесу розрахунку СЕ моделі;
- формування розподілів параметрів напружено-деформованого стану конструкцій.

Висновки. Завдяки наявності у бетоні пластичної пористої маси – гелю – при тривалій дії навантаження, в ньому накопичуються непружні деформації, що враховуються повзучістю бетону. Її відносять до групи других втрат попереднього

напруження конструкцій. Згідно ДБН В.2.6-98:2009 вплив повзучості слід враховувати коефіцієнтом повзучості, що апроксимується в часі при постійному напруженому стані бетону певною кривою. У сучасних програмах скінченно-елементного моделювання роботи конструкцій можливо враховувати нелінійні реологічні властивості бетону.

Врахування під час чисельного моделювання згинаної попередньо-напруженої сталезалізобетонної конструкції споруд цивільного захисту впливів повзучості, приводить до зменшення напружень у стиснутій зоні бетону, збільшення напружень в розтягнутій арматурі та збільшення прогинів.

Список літератури

1. Бабич В.Є., Поляновська О.Є., Борейчук Л.М. Аналіз розрахунку деформацій залізобетонних згинальних елементів за різними методиками. *Зб. наук. пр. НУВГП: Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2016. Вип. 32. С. 121-128.
2. Бамбура А.М., Дорогова О.В., Петрук Ю.М. Напружено-деформований стан, несуча здатність та момент виникнення тріщин постнапружених згинних залізобетонних елементів за модифікованим деформаційним методом. *Наука та будівництво*. 2020. Том 24. Вип. 2. С. 11-18.
3. Башинська С.Ю., Барабаш М.С. Порівняльний аналіз методів чисельного моделювання пластичних деформацій бетону. *Зб. наук. пр. ПДАБА: Будівництво, матеріалознавство, машинобудування*. 2016. Вип. 91. С. 32-39.
4. Бібик Д.В., Семко О.В. Визначення внутрішніх зусиль у перерізі сталезалізобетонної балки з урахуванням стадійності виготовлення. *Зб. наук. пр. ПДАБА: Будівництво, матеріалознавство, машинобудування*. 2010. Вип. 56. С. 47-53.
5. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування. Київ: М-во регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2009.
6. Deng Yu, Shen, M., Zhang H., Zhang P., Terry Y.P. Yuen, Hansapinyo C. et al. Experimental and analytical studies on steel-reinforced concrete composite members with bonded prestressed CFRP tendon under eccentric tension. *Composite Structures*. 2021. Vol. 271. P. 114-124. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114124>
7. Hasenko A.V. Previous self-stresses creation methods review in bent steel reinforced concrete structures with solid cross section. *Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2021. Vol. 2 (57). P. 82-89. <https://doi.org/10.26906/znp.2021.57.2589>
8. Pavlikov A.M., Harkava O.V., Hasenko A.V. & Andriets K.I. Comparative analysis of numerical simulation results of work of biaxially bended reinforced concrete beams with experimental data. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2019. Vol. 77. P. 84-92. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2019-77-84-92>
9. Semko O.V. & Hasenko A.V. Classification of self-stressed steel-concrete composite structures. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. Vol. 181. P. 367-374. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_34

References

1. Babych, V.Ie. Polianovska, O.Ie. & Boreichuk, L.M. (2016). Analiz rozrakhunku deformatsij zalizobetonnykh zghynal'nykh elementiv za riznymi metodykamy [Analysis of calculation of deformations of reinforced concrete bending elements by various methods]. *Zb. nauk. pr. NUVHP: Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy – Coll. of science Ave. NUVHP: Resource-saving materials, constructions, buildings and structures*, 32, 121-128 [in Ukrainian].
2. Bambura, A.M., Dorogova, O.V. & Petryk, Yu.M. (2020). Napruzhenno-deformovanyy stan, nesucha zdatsnist' ta moment vynyknennya trishchyn postnapruzhenykh z hynnykh zalizobetonnykh elementiv za modyfikovanyy deformatsiynym metodom [The stress-strain state, bearing capacity and moment of cracking of post-stressed bending reinforced concrete elements according to the modified deformation method]. *Nauka ta budivnytstvo – Science and construction*, 24 (2), 11-18 [in Ukrainian].
3. Bashyns'ka, S.Yu. & Barabash, M.S. (2016). Porivnial'nyj analiz metodiv chysel'noho modeliuвання plastychnykh deformatsij betonu [Comparative analysis of methods of numerical modeling of plastic deformations of concrete]. *Zb. nauk. pr. PDABA: Budivnytstvo, materialoznavstvo, mashynobuduвання – Coll. of science PDABA Ave: Construction, materials science, mechanical engineering*, 91, 32-39 [in Ukrainian].
4. Bibik, D.V. & Semko, O.V. (2010). Vyznachennia vnutrishnykh zusyly u pererizi stalezalizobetonnoi balky z urakhuvanniam stadijnosti vyhotovlennia [Determination of internal forces in the cross-section of a steel-reinforced concrete beam, taking into account the stages of production]. *Zb. nauk. pr.*

- PDABA: Budivnytstvo, materialoznavstvo, mashynobuduvannia – Coll. of science pr. PDABA: Construction, materials science, mechanical engineering, 56, 47-53 [in Ukrainian].*
5. Betonni ta zalizobetonni konstruksii. Osnovni polozhennia proektuvannia [Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions of design]. (2009). *DBN V.2.6-98:2009*. Kyiv: M-vo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy [in Ukrainian].
 6. Deng, Yu, Shen, M., Zhang, H., Zhang, P., Terry, Y.P. Yuen, Hansapinyo, C. et al. (2021). Experimental and analytical studies on steel-reinforced concrete composite members with bonded prestressed CFRP tendon under eccentric tension. *Composite Structures, Vol. 271*, P. 114-124. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114124> [in English].
 7. Hasenko, A.V., (2021). Previous self-stresses creation methods review in bent steel reinforced concrete structures with solid cross section. *Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering, Vol. 2 (57)*, P. 82-89. <https://doi.org/10.26906/znp.2021.57.2589> [in English].
 8. Pavlikov, A.M., Harkava, O.V., Hasenko, A.V. & Andriiets, K.I. (2019). Comparative analysis of numerical simulation results of work of biaxially bended reinforced concrete beams with experimental data. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Vol. 77*, P. 84-92. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2019-77-84-92> [in English].
 9. Semko, O.V. & Hasenko, A.V. (2022). Classification of self-stressed steel-concrete composite structures. *Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 181*, P. 367-374. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_34 [in English].

Anton Hasenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Educational and Scientific Institute of Architecture, Construction and Land Management, National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine

Victor Darienko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Mykola Bibik, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Director of "SOLID POLTAVA" LLC, Poltava, Ukraine

Dmytro Bibik, Ph.D. tech. sci.

«PB «INTERSTAL» LLC, Poltava, Ukraine

Viktor Slon, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Kherson State agrarian and economic University, Kherson, Ukraine

Review of the influence of concrete creep on the operation of pre-stressed steel-reinforced concrete structures of civil defense structures

The rheological properties of concrete are mainly determined by its creep properties, which affect the stress-strain state of the structure over time. In the case of pre-stressing a steel-reinforced concrete structure, forces are redistributed in its section between highly loaded and lightly loaded elements, namely between steel reinforcement and concrete. It should be noted that the supporting frame of buildings and structures (in addition to reliability, safe operation and economic feasibility) must guarantee functional suitability. It is impossible to determine the functional suitability of the structure without a correct prediction of the redistribution of stresses in time between the concrete and the reinforcement, which occurs as a result of the creep of concrete. According to the current norms of DBN B.2.6-98:2009 and EN (Eurocode 2), the criterion for the appearance of the limit state of reinforced concrete structures is the achievement of limit values by the deformations of compressed concrete. Therefore, a detailed study of the rheological properties of prestressed reinforced concrete is undoubtedly an urgent issue. The paper analyzes general information about the creep of concrete and its effect on losses during prestressing, including with the use of modern finite element modeling programs, which allow not only physically nonlinear characteristics of concrete to be specified when creating models of reinforced concrete structures, but also take into account the geometric nonlinearity of the work of composite reinforced concrete structure, but also to specify the rheological properties of concrete, in particular, creep characteristics.

Conducted studies of the influence of concrete creep on the work of bent pre-stressed steel-reinforced concrete structures prove that the main reason for the increase in deflections of such structures under long-term load action is the creep of concrete in the compressed cross-sectional area. Taking into account during the numerical modeling of the bent pre-stressed combined structure the influences of the second order, namely the creep in time of the stressed concrete, leads to a decrease in the stresses in the compressed zone of the concrete by 6.5%, but to an increase in the stresses in the stretched reinforcement by 0.6% and , which is most significant, to increase the deflections of the structure by 23%.

steel-reinforced concrete structures, pre-stressing, concrete creep

Одержано (Received) 20.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 27.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 624.97

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.84-91](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.84-91)

А.О. Вітровий, доц., канд. техн. наук, **П.В. Попович**, проф., д-р техн. наук, **Р.І. Розум**, доц., канд. техн. наук, **О.В. Чорна**, доц., канд. екон. наук, **О.П. Захарчук**, доц., канд. техн. наук, **Н.А. Галиш**, канд. екон. наук, **З.М. Цідило**, ст. викл., **К.П. Шок**, ст. викл.

Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна

e-mail: ppopovich@ukr.net

Особливості впровадження Єврокодів в Україні

В роботі висвітлено важливість впровадження Єврокодів в Україні на базі аналізу проведених досліджень та публікацій. Розглянуто основні європейські стандарти, які є базою Єврокодів. Досліджено стан гармонізації вітчизняних ДСТУ та ДБН з Єврокодами. Описано структуру Єврокодів, етапи та особливості їх впровадження в Європейське Співтовариство. Розкрито переваги Єврокодів для їх впровадження в національну нормативну базу. Висвітлено основні положення по гармонізації національних будівельних стандартів, з Єврокодами та їх впровадження в будівельну галузь України.
будівництво, Єврокоди, Європейські стандарти

Постановка проблеми. Отримавши незалежність в 1991 році, Україна успадкувала від колишнього СРСР нормативно-технічну базу для проектування та будівництва будівель та споруд. Дана нормативно-технічна база була сформована ще у 80-х роках минулого століття і звичайно не враховує сучасні вимоги до будівельних матеріалів та технологій, які вдосконалюються мало не щодня. Перед Україною постало нелегке завдання – розробити свою національну нормативну документацію в галузі будівельних конструкцій. Складність завдання полягала в тому, що Україна не мала власного досвіду по розробці такої документації, ми користувалися розробками Радянського союзу, які, як правило, розроблялись фахівцями, які залишились в росії. На початках, Україна звичайно використовувала Радянські ГОСТи і СНіПи, поступово переходячи на свої ДСТУ та ДБН. На думку багатьох експертів, Україні це завдання частково вдалося виконати і наші стандарти та норми досить непогано зарекомендували себе на практиці.

Але все ж таки, будівельна документація України характеризується недостатньою ефективністю, також значні проблеми створює її неузгодженість із світовими стандартами. Тому було прийняте рішення гармонізувати Українські будівельні стандарти з Єврокодами [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ще на початку своєї незалежності в Україні зрозуміли важливість європейських стандартів для проектування та зведення будівельних об'єктів, оскільки вони відображають новизну та прогресивність

сучасних рішень в галузі будівництва. Практично впровадження EN в українські норми розпочалося лише після 2006 року. Гармонізація ДБН і ДСТУ з Єврокодами почалась в 2007...2009 роках. Рішення про пряме використання Єврокодів в будівництві в Україні було прийняте лише 01.07.2014 р. Зазначимо, що на практиці впровадження ДСТУ-EN паралельно з ДБН є досить утрудненим, через значні нововведення в Єврокодах. Насправді наші будівельні спеціалісти мало обізнані із світовими публікаціями, які присвячені EN та з досягненнями світового науково-технічного прогресу в галузі будівництва. Як зазначають деякі автори, на сьогодні таких публікацій в усьому світі більше декількох десятків тисяч. В Україні ж кількість таких публікацій є зовсім не значною.

Хоч в директивному ДСТУ [2] чітко прописано необхідність організувати вивчення основних положень Єврокодів та їх практичне використання, на сьогодні друга половина цієї проблеми практично не вирішена.

Керівництва, які видані в Європі, що роз'яснюють вимоги EN, мають приклади по розв'язанню найбільш характерних завдань, спираються на порівняльні оцінки, які враховують вимоги країн, де ці керівництва були видані, тому в Україні такі керівництва вимагають суттєвих уточнень під наші стандарти. Також, зазначимо, що дані видання є авторськими і видаються мовою оригіналу.

Серед науковців та провідних інженерів, які докладають значних зусиль для впровадження Єврокодів в Україні варто відзначити Барзиловича Д. В., Немчинова Ю. І., Тарасюка В. Г., Поклонського В. Г., Матвеева І. В., Крітова В. О., Пічугіна С. Ф., Горохова Е. В., Мущанова В. П., Шмуклера В. С. та деякі науково-дослідні, проектні інститути та проектні і будівельні фірми, які використовують в своїх роботах прогресивні конструктивні рішення та технології.

Постановка завдання. Розглянути основні європейські стандарти, які стали базою Єврокодів. Провести дослідження стану гармонізації вітчизняних ДСТУ та ДБН з Єврокодами.

Виклад основного матеріалу дослідження. Єврокоди - це набір європейських стандартів (EN), які використовуються при проектуванні будівель і цивільних споруд, та при розробці вимог до будівельної продукції, що були розроблені Європейським комітетом стандартизації (CEN) за дорученням Європейської комісії [3].

Розробку Єврокодів почали, ще в далекому 1975 році в результаті рішення Комісії Європейського Співтовариства. Єврокоди мали б усунути технічні перешкоди в торгівлі та узгодити технічні специфікації з національним будівельними нормами, які діяли в державах-членах ЄС.

Базою для розробки єврокодів слугувала 95 стаття Римського договору. Перші єврокоди були опубліковані в 1984 році, що вказує на те, яка це не проста і кропітка робота. Через п'ять років в 1989 році було видано Директиву щодо будівельних виробів (CPD), в якій зазначалися основні вимоги до будівельних виробів. В 1992 році після підписання Маастрихтського договору почалася публікація єврокодів. В 2003 році Комісія Європейського Співтовариства рекомендувала використання єврокодів в ЄС та їх імплементацію в будівельну документацію країн учасниць. Лише в 2007 році було остаточно опубліковано всі єврокоди і програма по їх впровадженню вступила в період співіснування (єврокоди використовувалися паралельно з національними стандартами, що мають однакові сфери застосування).

Базою єврокодів стали 10 європейських стандартів, EN 1990 - EN 1999, які містять загальні підходи до проектування будівель та інших будівельних робіт і будівельних виробів (рис.1) [3]:

- EN 1990 - основи структурного проектування (вимоги безпеки, довговічність, основні аспекти надійності конструкцій);
- EN 1991 - навантаження та дії на конструкції (всі навантаження та дії, які потрібно враховувати при проектуванні будівель, включаючи геотехнічні навантаження);
- EN 1992 - проектування бетонних конструкцій (вимоги EN 1990 до проектування будівель з простого, армованого та попередньо напруженого бетону);
- EN 1993 – проектування сталевих конструкцій (вимоги до міцності, надійності, довговічності та вогнестійкості сталевих конструкцій);
- EN 1994 – проектування композитних сталевих та бетонних конструкцій (вимоги до міцності, надійності, довговічності та вогнестійкості композитних конструкцій);

- EN 1995 - проектування дерев'яних конструкцій (вимоги до будівель виготовлених з суцільної, пиляної, струганої або деревини у формі стовпа, клеєної ламінованої деревини або деревних панелей, з'єднаних між собою за допомогою клеїв або механічних кріплень.);

- EN 1996 - проектування кам'яних конструкцій (вимоги до проектування будівель, при будівництві яких застосовується неармована, армована, попередньо напружена та замкнута кладки, а також вимоги до якості застосовуваних матеріалів.);

- EN 1999 - проектування алюмінієвих конструкцій (вимоги до міцності, надійності, довговічності та вогнестійкості алюмінієвих конструкцій;

що поєднуються разом з

- EN 1997 - геотехнічне проектування (встановлює принципи та вимоги до безпеки та зручності експлуатації, описує основи проектування та перевірки і регламентує вимоги структурної надійності враховуючи геотехнічні аспекти проектування будівель);

- EN 1998 - проектування, оцінку і модернізацію конструкцій для сейсмостійкості (вимоги до проектування та будівництва будівель у сейсмічних регіонах).

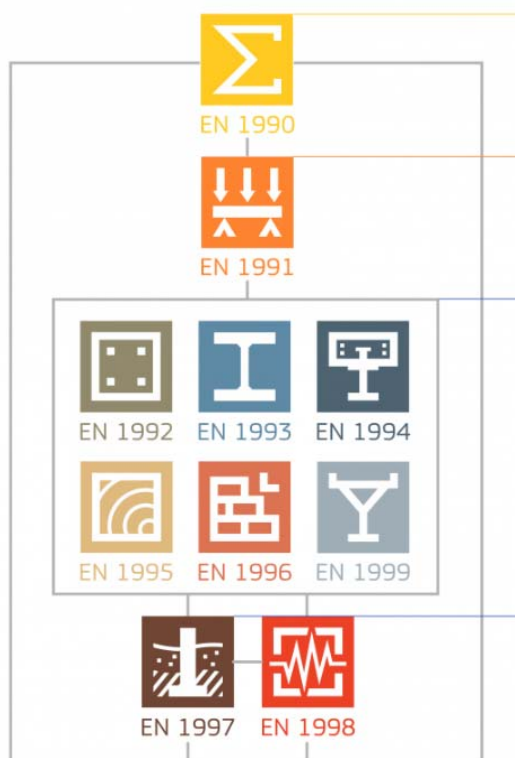


Рисунок 1 – База Єврокодів

Джерело: розроблено [3]

Розглянемо основні концепції, які є основою Єврокодів [4]:

- Основні вимоги, що ставляться до будівельних конструкцій та матеріалів (безпечність, експлуатаційна придатність, вогнестійкість та міцність);

- Розмежування вимог по надійності;
- Вимоги, щодо терміну служби;
- Довговічність;
- Якість.

Структурна надійність в рамках Єврокодів базується на напівімовірнісному методі (проектування граничних характеристик і метод часткових коефіцієнтів) [5].

Основні вимоги

Конструкція та конструктивні елементи будівель та споруд мають бути спроектовані, виконані та підтримуватися в такому стані, щоб відповідати наступним вимогам [6]:

- **Безпека** - конструкція будівлі чи споруди повинна витримати всі дії та впливи, які можуть виникнути при її зведенні та використанні.

- **Експлуатаційна придатність** - конструкція будівлі та споруди на протязі її передбаченого терміну експлуатації, з належною надійністю та економічністю, буде придатною для використання.

- **Пожежна** - вогнестійкість конструкції будівель та споруд повинна відповідати пожежним вимогам на протязі всього періоду їх експлуатації.

- **Міцність** - конструкція будівель чи споруд не буде пошкоджена від вибуху, удару чи інших наслідків людського та природнього впливу, до ступеня, непропорційного даній причині.

Вимоги до надійності

Для різних будівель та споруд, в залежності від їх призначення та ефективності використання висувають різні вимоги та рівні надійності. Рівень надійності може бути прийнятий як для структурного опору, так і в залежності від способу експлуатації. Вибір рівня надійності для конкретної конструкції має враховувати ряд чинників [7]:

- можливі причини та/або спосіб досягнення граничного стану;
- можливі наслідки руйнування будівель чи споруд через недостатню надійність з точки зору ризику для життя людей, травми та потенційних економічних втрат;
- реакція суспільства на наслідки від руйнування через недостатню надійність конструкції, а також соціальні та екологічні наслідки;
- затрати та процедури, які необхідні для зменшення ризику руйнувань.

Рівні надійності, які застосовуються до конкретної будівлі чи споруди, можна визначити за одним або обома з наведених нижче способів:

- шляхом визначення надійності будівлі чи споруди в цілому;
- шляхом визначення надійності окремих складових будівлі чи споруди.

Вимоги до терміну служби

Розрахунковий термін служби - це передбачуваний період, протягом якого будівля чи споруда має використовуватися за призначенням з передбачуваним обслуговуванням, але без необхідності капітального ремонту. Поняття терміну експлуатації є корисним при:

- виборі розрахункових дій (вітер, землетрус);
- розгляді погіршення властивостей матеріалу (втома, повзучість);
- оцінці вартості життєвого циклу;
- розробці стратегій обслуговування.

Довговічність

Конструкція будівлі чи споруди повинна бути спроектована таким чином, щоб її експлуатація не погіршувала довговічність і ефективність конструкції з урахуванням очікуваного терміну обслуговування.

Гарантія якості

Єврокоди EN передбачають, що на етапах проектування, виконання, використання та технічного обслуговування будівель та споруд буде вжито відповідних заходів для створення конструкції, яка відповідатиме вимогам та припущенням, зробленим у проекті. Дані заходи включають вимоги до надійності, організаційні заходи та контроль на всіх етапах.

Єврокоди направлені зробити європейські будівельні компанії конкурентоспроможними, як на внутрішньому так і на світовому ринку, дозволяють значно підвищити безпеку будівельної галузі.

Єврокоди EN є еталоном для розробки національних будівельних стандартів країн ЄС та чотирьох країн Європейська асоціація вільної торгівлі, які не вступили до ЄС (Республіка Ісландія, Князівство Ліхтенштейн, Королівство Норвегії та Швейцарська Конфедерація).

Наразі єврокоди знаходяться на стадії підтримки та еволюції для вирішення різноманітних нових методів, нових матеріалів, нових нормативних вимог і нових суспільних потреб, а також для гармонізації з національними стандартами.

Як показує історія Єврокодів, така тривала їх розробка в деякій мірі пов'язана з тим, що в них об'єднано та гармонізовано різні традиції проектування та будівництва всіх держав-членів ЄС. Відмінні умови навколишнього середовища та спосіб життя в різних державах-членах вимагають гнучкості в національному застосуванні Єврокодів.

Тому для гнучкості впровадження Єврокоди дозволяється робити поправку на: відмінності в географічних, геологічних або кліматичних умовах; різну культуру проектування та процедуру структурного аналізу; вимоги щодо рівнів безпеки у відповідних державах-членах. [8]

Держави-члени заохочуються мінімізувати кількість різбіжностей між національними будівельними стандартами та єврокодами. Цього можна досягнути двома способами: зменшити різноманітність національних будівельних стандартів шляхом суворого використання рекомендованих значень Єврокодів і поступово вирівнювати рівні безпеки будівництва в державах-членах ЄС.

Чому Україні також варто переходити на Єврокоди? Головна відповідь полягає в тому, що Україна хоче бути членом ЄС, а отже коли наша мрія забудеться ми вимушені будемо гармонізувати наші будівельні норми з Єврокодами. Враховуючи досвід країн – членів ЄС, які на гармонізацію своїх будівельних норм з Єврокодами потратили десятиліття, Україна повинна вже активно включитися в даний процес. Зазначимо, що нами вже немало зроблено в цьому напрямку: на рівні держави прийнято цілий ряд законів та постанов про наближення законодавчої бази України до європейської; чітко сформульовано державну концепцію адаптації національної нормативної бази до нормативів ЄС, її інтегрування у європейський нормативно-правовий простір технічного регулювання у будівництві. [9]

В 2009 році Україна розпочала роботи по гармонізації Єврокодів.

З 2011 року в Україні діє офіційний дозвіл проектувати й будувати за Єврокодами.

В 2012 році завершена робота над розробленням ДСТУ-Н Б EN, гармонізованих з Єврокодами. На даний час в Україні розроблено та затверджено 58 національних стандартів, гармонізованих з Єврокодами.

В 2013 році розроблені Національні додатки до 58 національних стандартів, гармонізованих з Єврокодами.

В 2018 році Кабінет міністрів ухвалив рішення, спрямовані на гармонізацію державно-будівельних норм зі стандартами Європейського Союзу та оптимізацію процедури і строків їх опрацювання. Згідно даного рішення починають одночасно діяти ДБН, розроблені за національними стандартами і ті, що гармонізовані з нормами ЄС, на всі об'єкти будівництва, незалежно від класу наслідків. Що дозволило привести українське будівельне законодавства та систему нормування до європейських вимог та усунуло корупційні ризики. Згідно даного рішення до 2024 року всі будівельні норми мали б на 100% бути гармонізовані з Єврокодами, нажалі війна завадить виконати дане

рішення. Хоча на даний час можна з впевненістю сказати, що Єврокоди вже виступають як альтернативний стандарт в Україні. Також зазначимо, що робота над удосконаленням Єврокодів триває і зараз. А це означає, що з кожним нововведенням в Єврокодах Україна буде вимушена їх повторно гармонізувати. [10]

Наступною досить вагомою перевагою Єврокодів є те, що сьогодні експерти всього світу визнають, їх як новітньою, найбільш досконалу базу нормативного регулювання в будівництві, адже, на протязі 40 років видатні фахівці більшості країн Європи брали участь в їх розробці, введенні та науковому супроводі. Саме тому Єврокоди адсорбували в собі сучасні наукові досягнення з теорії споруд, механіки ґрунтів, механіки і фізиці будівельних матеріалів.

Також, Єврокоди вважаються першою в світі системою проектування, в концепцію яких, покладено принцип керованої надійності та довговічності. Звичайно, інші системи проектування, також прагнуть гарантувати безпеку спорудам та будівлям, але тільки Єврокоди дали проектанту апарат керування надійністю, а відтак і довговічністю об'єктів будівництва.

Висновки. Підсумовуючи вище сказане, ми вважаємо, що для того, щоб вивести вітчизняну будівельну галузь на новий рівень, орієнтиром для неї мають стати Єврокоди.

Державні норми, які будуть адаптовані до європейських, дозволять впроваджувати новітні технології та підходи, що забезпечить відповідність будівель і споруд сучасним світовим тенденціям.

Також, це дозволить залучити на наш ринок європейських інвесторів, адже їхні норми виступатимуть для них певною гарантією того, що під час проектування будівництва будуть витримані всі нормативні положення, а об'єкт будівництва буде реалізовано відповідно до чинних європейських стандартів.

Список літератури

1. Настанова. Керівний документ L. Щодо застосування і використання єврокодів: ДСТУ-Н Б А.1.1-77:2007. / Guidance paper L (concerning the Construction Products Directive –89/106/EEC). APPLICATION AND USE OF EUROCODES. Київ, Мінрегіон України, 2008. с.43.
2. Про Загальнодержавну програму адаптації законодавства України до законодавства Європейського Союзу: Закон України від 18.03.2004 р. №1629-IV Відомості Верховної Ради України. 2004. № 29. Ст. 367. URL: [http:// zakon.rada.gov.ua/laws/show/1629-15#Text](http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1629-15#Text) (дата звернення: 10.11.2023).
3. ISO-2394:1998 (E) General principles on reliability for structures. Geneva, Switzerland. p.73.
4. Пічугін С. Ф., Махінко А. В., Дрижирук Ю. В. Підготовка Національних додатків до норм Єврокоду з навантажень і впливів. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. 2013. Вип. 4 (39), т. 1. С. 204–208.
5. Розрахунок сталевих конструкцій будівель відповідно до Єврокоду 3 та національних додатків України / Бреттл М., Браун Д., Беляєв М.А., Білик А.С. Київ: 2014. – 97 с.
6. Розрахунок стовпчастих монолітних фундаментів за Європейськими нормами: посіб. / Корнієнко М.В. та ін. Київ: КНУБА, 2015. 72 с.
7. Проектування сейсмостійких конструкцій відповідно до Єврокоду 8: практ. посіб. / Немчинов Ю.І та ін.; під ред. проф. Ю. І. Немчинова. Київ: ДП НДІБК Мінрегіону України, 2015. Ч. 1. 142 с.
8. Порядок застосування будівельних норм, розроблених на основі національних технологічних традицій, та будівельних норм, гармонізованих з нормативними документами Європейського Союзу / Постанова Кабінету Міністрів України від 23.05.2011 р. № 547. *Офіційний вісник України*. 2011. № 40. С. 19.
9. Система стандартизації та нормування у будівництві. Проектування будівельних конструкцій за Єврокодами. Основні положення: ДБН А.1.1-94:2010: затв. Мінрегіонбудом України 16.12.2010. [Чинні від 2013-07-01]. К.: Мінрегіонбуд України, 2012. III, 22 с.
10. Корнієнко М. В. Про досвід вивчення та використання при проектуванні, зведенні та експлуатації будівельних об'єктів за Єврокодами в Україні. *Світ геотехніки*. 2016. № 4. С. 9-14.

References

1. Nastanova. Kerivnyi dokument L. Shchodo zastosuvannya i vykorystannya yevrokodiv: DSTU-N B A.1.1-77:2007 [Instruction. Guideline L. Regarding the application and use of Eurocodes: DSTU-NB A.1.1-77:2007] (2008) / Guidance paper L (concerning the Construction Products Directive – 89/106/EEC). APPLICATION AND USE OF EUROCODES. Kyiv: Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].
2. Pro Zahal'noderzhavnu prohramu adaptatsii zakonodavstva Ukrainy do zakonodavstva Yevropejs'koho Soiuzu: Zakon Ukrainy vid 18.03.2004 r. №1629-IV [On the nationwide program of adaptation of the legislation of Ukraine to the legislation of the European Union: Law of Ukraine dated 03.18.2004 No. 1629-IV]. *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy - Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine*, 29, 367. Retrieved from URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1629-15#Text> [in Ukrainian].
3. ISO-2394:1998 (E) General principles on reliability for structures. Geneva, Switzerland. p.73.
4. Pichuhin, S. F., Makhin'ko, A. V. & Dryzhyruk, Yu. V. (2013). Pidhotovka Natsional'nykh dodatkov do norm Yevrokodu z navantazhen' i vplyviv [Preparation of National Annexes to Eurocode norms on loads and impacts]. *Zbirnyk naukovykh prats' (haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstvo) – A collection of scientific works (industry mechanical engineering, construction)*, 4 (39), 1, 204-208 [in Ukrainian].
5. Brettl, M., Braun, D., Beliaiev, M.A. & Bilyk A.S. (2014). *Rozrakhunok stalevykh konstruksij budivel' vidpovidno do Yevrokodu 3 ta natsional'nykh dodatkov Ukrainy [Calculation of steel structures of buildings in accordance with Eurocode 3 and national annexes of Ukraine]*. Kyiv [in Ukrainian].
6. Korniienko, M.V. et al. (2015). *Rozrakhunok stovpchastykh monolitnykh fundamentiv za Yevropejs'kymy normamy [Calculation of columnar monolithic foundations according to European standards]*. Kyiv: KNUBA [in Ukrainian].
7. Nemchynov, Yu.I. et al. (2015). *Proektuvannya sejsmostijykh konstruksij vidpovidno do Yevrokodu 8 [Design of earthquake-resistant structures in accordance with Eurocode 8]*. Nemchynov, Yu.I. (Ed). Kyiv: DP NDIBK Minrehionu Ukrainy [in Ukrainian].
8. Poriadok zastosuvannya budivel'nykh norm, rozroblenykh na osnovi natsional'nykh tekhnolohichnykh tradytsij, ta budivel'nykh norm, harmonizovanykh z normatyvnymy dokumentamy Yevropejs'koho Soiuzu / Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 23.05.2011 r. № 547 [The procedure for applying construction standards developed on the basis of national technological traditions and construction standards harmonized with regulatory documents of the European Union / Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 05/23/2011 No. 547]. *Ofitsijnyj visnyk Ukrainy - Official Gazette of Ukraine*, 40, 19 [in Ukrainian].
9. Systema standartyzatsii ta normuvannya u budivnytstvi. Proektuvannya budivel'nykh konstruksij za Yevrokodamy. Osnovni polozhennia [System of standardization and rationing in construction. Design of building structures according to Eurocodes. Substantive provisions]. (2012). *DBN A.1.1-94:2010 from July 1, 2013*. K.: Minrehionbud Ukrainy [in Ukrainian].
10. Korniienko, M. V. (2016). Pro dosvid vyvchennia ta vykorystannya pry proektuvanni, zvedenni ta ekspluatatsii budivel'nykh ob'ektiv za Yevrokodamy v Ukraini [About the experience of studying and using in the design, construction and operation of construction objects according to Eurocodes in Ukraine]. *Svit heotekhniki – The world of geotechnics*, 4, 9-14 [in Ukrainian].

Andriy Vitroviy, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Pavlo Popovych**, Prof., DSc, **Ruslan Rozum**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olha Chorna**, Assoc. Prof., Ph.D econ. sci., **Olena Zakharchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Nataliya Halysh**, Ph.D econ. sci., Senior Lecturer, **Zoriana Tsidylo**, Senior Lecturer, **Kateryna Shok**, Senior Lecturer

Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine

Features of implementation of eurocodes in Ukraine

The paper highlights the importance of the implementation of Eurocodes in Ukraine and the development of its own national regulatory documentation in the field of building structures based on them and its alignment with world standards.

The article analyzes a number of studies on the implementation of Eurocodes in Ukraine. A number of main European standards, which are the basis of Eurocodes, are considered. 10 European standards, EN 1990 - EN 1999, containing general approaches to the design of buildings and other construction works and construction products, and are basic in the formation of Eurocodes, were analyzed.

The main concepts that are the basis of the Eurocodes are considered, namely safety, serviceability, fire resistance and strength of building structures and materials, requirements for their reliability, service life, durability and quality.

The state of harmonization of domestic DSTU and DBN with Eurocodes was studied. unification and harmonization of various design and construction traditions of all EU member states led to their long-term

development and implementation. Different environmental conditions and lifestyles in different Member States require flexibility in the national application of Eurocodes.

The structure of the Eurocodes, the stages and features of their implementation in the European Community are described. The advantages of Eurocodes for their introduction into the national regulatory framework are revealed. The main provisions on the harmonization of national construction standards with Eurocodes and their implementation in the construction industry of Ukraine are highlighted.

In order to bring the domestic construction industry to a new level, Eurocodes should become a standard for it.

State norms, which will be adapted to European ones, will allow the introduction of the latest technologies and approaches, which will ensure the compliance of buildings and structures with modern world trends.

It will also allow European investors to be attracted to our market, because their standards will serve as a certain guarantee for them that all regulatory provisions will be observed during construction design, and the construction object will be implemented in accordance with current European standards.

construction, Eurocodes, European standards

Одержано (Received) 23.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 28.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 624.97

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.91-97](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.91-97)

Ю.В. Дзядикевич, проф., д-р техн. наук, **П.В. Попович**, проф., д-р техн. наук, **А.О. Вітровий**, доц., канд. техн. наук, **Р.І. Розум**, доц., канд. техн. наук, **О.В. Чорна**, доц., канд. екон. наук, **О.П. Захарчук**, доц., канд. техн. наук., **Н.А. Галиш**, ст. викл., канд. екон. наук, **З.М. Цідило**, ст. викл., **К.П. Шок**, ст. викл.

Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна

e-mail: prorovich@ukr.net

Сумісність компонентів матеріалів в цивільній інженерії

В роботі висвітлено проблематику сумісності компонентів при створенні тугоплавких та міцних композитних матеріалів в цивільній інженерії. Проаналізовано праці провідних вітчизняних та зарубіжних вчених з даної проблематики. Виділено основні чинники, які впливають на сумісність компонентів при термодинамічних твердофазних процесах створення композитних матеріалів. Дано рекомендації щодо вибору металевої основи і зміцнючого оксиду із врахуванням споріднення до кисню металу основи і елемента, що утворює оксид. Досліджено твердофазну взаємодію і розчинність матеріалів при високих температурах. Наведено способи одержання композиційних матеріалів із використанням несумісних компонентів.

сумісність компонентів, композитні тугоплавкі матеріали, цивільна інженерія

Постановка проблеми. Сумісність компонентів – це властивість, яка визначається рівноважними і кінетичними характеристиками системи. Розрізняють термодинамічну та кінетичну сумісність [1]. Під термодинамічною сумісністю розуміють стан стабільної рівноваги між покриттям і основою. Кінетична сумісність - це стан метастабільної рівноваги, яка зумовлена такими чинниками, зокрема: швидкістю дифузії, енергією активації, швидкістю розчинення та ростом утворених фаз. Необхідно зазначити, що відомо дуже невелику кількість захисних покриттів і композицій, які мають термодинамічну сумісність. Водночас присутність термодинамічної несумісності зовсім не виключає можливості використання таких компонентів у покритті, оскільки регулюючи технологічними параметрами процесу формування

© Ю.В. Дзядикевич, П.В. Попович, А.О. Вітровий, Р.І. Розум, О.В. Чорна, О.П. Захарчук, Н.А. Галиш, З.М. Цідило, К.П. Шок, 2023

захисного шару, можна досягнути кінетичної сумісності. У випадку термодинамічної несумісності необхідним є знання не тільки діаграм стану систем, але і кінетики реакцій між компонентами системи. Наявність кінетичної сумісності значно розширює можливості використання на практиці термодинамічно несумісних між собою компонентів високотемпературних матеріалів. З огляду на це, дослідження процесу формування високотемпературних матеріалів із урахуванням термодинамічної та кінетичної несумісності є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі розробки високотемпературних матеріалів, компоненти яких мають кінетичну сумісність, присвячені праці багатьох вітчизняних вчених, зокрема: А. Л. Борісової [1], М. С. Цирліна [2], Ю. В. Дзядикевича [3, 4], Л. О. Сосновського [5], В. А. Мечника [6], Рідван Яманоглу [7], Г. Л. Жунковського [8], О. В. Чудівич, О. І. Бикова, А. В. Самелюка [9], О. М. Григор'єва, А. В. Веделя [10].

А. Л. Борісова у своїй монографії [1], приводить данні про кінетику взаємодії температури, тиску, структурних особливостей, ступені компактності матеріалу та зовнішнього середовища. Вказані області практичного застосування твердофазних реакцій, описані методи бар'єрного захисту. А. Л. Борісова зазначає, що розв'язання проблеми сумісності основи з армуючими компонентами в багатьох випадках визначає перспективи розробки та практичного застосування такого виду конструкційних матеріалів як композиційні. В роботі [1] запропоновано механізм взаємодії речовин у твердій фазі та зазначено, що механізм взаємодії твердих речовин є більш складним, ніж рідин і газів. Процес твердофазної взаємодії не можна описати тільки одним кінетичним рівнянням. Автор [1] показала, що для твердофазних реакцій особливими є виникнення границі розділу між реагентами.

М. С. Цирлін, разом із співавторами, у своїй монографії [2], особливу увагу приділили захисту тугоплавких матеріалів від високотемпературної газової корозії. Використовуючи різні методи нанесення покриття, вони запропонували сформувати на металевій поверхні виробу шар покриття, який містить комплекс тугоплавких сполук.

Дослідження сумісності боридного покриття з тугоплавкими металами, яке було проведено за участю авторів [3,4], показало, що на молібдені і вольфрамі в температурному інтервалі 1400-1600°C у вакуумі ($p=1,10^{-4}$ мм рт.ст.) спостерігається поступовий перехід моноборидних фаз (α -MoB і α -WB) у нижчий борид Me_2B , який має стовбчасту - голчасту структуру. Мікротвердість цих фаз добре узгоджується із величинами мікротвердості для компактних матеріалів.

Дослідження взаємодії боридного покриття з металевою основою, яке було проведено Л. О. Сосновським [5], показало, що фази Mo_2B і W_2B ростуть за параболічним законом. Це не значно перевищує значення n для процесів, обмежуючою ланкою, яких є дифузія. Довготривала експлуатація боридного покриття на металах приводить до зміни його механічних властивостей.

Розвиток високотемпературної техніки веде за собою підвищення робочих температур конструкцій із тугоплавких матеріалів, які захищені від окислення силіцидними покриттями. В зв'язку з тим, Сосновським Л. О. разом із співавторами [5], була вивчена сумісність жаростійких силіцидних шарів із металевою основою, яка показала, що при відпалі у вакуумі в інтервалі 1400-1600°C, відбувається перетворення вищих силіцидів у нижчі. Товщина шару силіцидних фаз на молібдені росте із підвищенням температури і тривалості процесу. Підчас дослідження кінетичних закономірностей процесу взаємодії покриття з основою було встановлено, що в подальшому інтервалі дисиліцидна фаза M_0Si_2 росте практично по лінійному закону. Одержані результати дозволяють зробити висновок, що вищий силіцид молібдену

сумісний із металевою основою до 1400°C і може бути використаний для захисту від окислення конструкцій із молібденових сплавів, які експлуатуються в температурному режимі 1400°C. Порівнюючи характер взаємодії боридних і силіцидних покриттів з тугоплавкими металами, необхідно відзначити більш високу стабільність боридних фаз.

В. А. Мечником разом із співавторами [6], було досліджено особливості структури, твердість, модуль пружності та стійкість до спрацювання композиційних матеріалів системи Fe–Cu–Ni–Sn із різним вмістом CrB₂. Збільшення вмісту CrB₂ до 8% у складі композита супроводжується одночасним зростанням твердості та модуля пружності, що свідчить про сумісність компонентів, які входять у склад системи.

Рідван Яманоглу та інші [7], вважають, що застосування магнію для розробки матеріалів із найменшою щільністю є проблематичним через недостатню міцність у порівнянні з іншими матеріалами. Для дослідження сумісності компонентів Mg₁₇Al₁₂ додавали до чистого магнію для створення композитної структури частинки Mg та Mg₁₇Al₁₂. Мікротвердість і стійкість до спрацювання композитів значно підвищується зі збільшенням вмісту частинок Mg₁₇Al₁₂. Густина композита зростає з 1,72 до 1,92 г/см³ при додаванні зміцнювача, міцність збільшується у 2,4 рази, а стійкість до спрацювання – удвічі.

Г. Л. Жунковський і Т. М. Євтушок [8] дослідили взаємодію дибориду титану з хромом в інтервалі температур 1200–1950°C у вакуумі. Встановлено, що до 1580 ± 20 °C при витримці 2 год на границі контакту проходить твердофазна реакція з утворенням на стороні хрому прошарку Cr₂B товщиною 40 мкм. Вище 1580°C процес взаємодії протікає за механізмом контактного плавлення, характерного для евтектичних систем. На підставі проведених досліджень розроблено технологію активованого спікання дибориду титану, що дозволило підвищити його міцність на згин в 1,5–2 рази.

Авторами [9] досліджено взаємодію дибориду титану з залізом і його сплавом X18H10T в інтервалі температур 1200–1850°C. Встановлено, що твердофазна взаємодія на границі контакту відсутня. Утворена рідка фаза змочує поверхню дибориду титану з крайовим кутом змочування ≈40°. Підвищення температури до 1450°C не змінює значення крайового кута, і крапля по поверхні не розтікається. Отримані дані свідчать про те, що залізо в контакті з диборидом титану може працювати до температури 1400°C, а його сплав X18H10T — до 1300°C. Сплави заліза є перспективними для використання їх як основи для композиційних матеріалів.

Вивчаючи сумісність компонентів високотемпературних матеріалів вчені [10] встановили, що згідно з даними SEM, боридний шар мав гладку і щільну поверхню. У сплавах Ni–Mg дифузія атомів бору від поверхні до основи прискорювалася зі збільшенням температури та часу обробки. Як наслідок, товщина шару бориду збільшилася.

Отже, аналізуючи результати робіт, присвячених проблемі розробки високотемпературних матеріалів, які застосовуються в цивільній інженерії, можна зробити висновок, що актуальною проблемою є термодинамічна та кінетична сумісність компонентів, яка визначається рівноважними і кінетичними характеристиками системи [1].

Постановка завдання. Вивчення закономірностей процесу сумісності компонентів під час розробки та експлуатації високотемпературних матеріалів в цивільній інженерії.

Виклад основного матеріалу дослідження. Одним із параметрів процесу розробки високотемпературних матеріалів є температура початку взаємодії компонентів. Температурою початку реакції взаємодії в твердофазних процесах вважають температуру, при якій ізобарно-ізотермічний потенціал дорівнює нулю [1].

Температурою початку взаємодії є така температура, при якій ізобарно-ізотермічний потенціал залежить також від тиску навколишнього газового середовища. Важливою характеристикою процесу взаємодії у високотемпературних матеріалах є температура початку взаємодії компонентів. Температурою початку реакції вважають таку температуру, при якій можна виявити продукти хімічної реакції. Застосування поняття «температура початку реакції» є дуже доцільним, оскільки дає змогу порівняти відносну реакційну здатність різних речовин в однакових умовах. Процес взаємодії складається із двох стадій, у яких перша відображає мікроскопічні зміни в зоні контакту, а друга сприяє зміні властивостей системи.

Можна зробити висновок, що умовна температура початку хімічної реакції може розглядатися як характеристична величина поруч із ефективною енергією активації.

Щодо реакції твердофазного процесу, то можна розглядати два випадки застосування тиску. У першому випадку може змінюватися кінетика реакції, а у другому, відповідно до принципу Ле-Шательє, можуть бути зміщені також рівноважні реакції. Вплив тиску залежно від механізму і умов проходження реакції може бути неоднозначним. Попереднє ущільнення на кінетику твердофазної взаємодії в порошковій суміші добре прослідковується при дослідженні нітриду кремнію і титану [1]. Необхідно зазначити, що активатором процесу твердофазної взаємодії може бути пластична деформація під тиском. Застосування тиску і глибокого вакууму дозволяє зварювати в холодному стані такі матеріали, як мідь, срібло, алюміній титан і свинець і інші пластичні матеріали.

Більшість тугоплавких матеріалів по адгезійній взаємодії у вакуумі і середовищі гелія відрізняються незначно. Це пояснюється тим, що ті сполуки не взаємодіють із залишковими газами. Вплив середовища на твердофазні реакції не обмежуються стадією адгезійної взаємодії. Зниження тиску зовнішнього середовища суттєво зміщує рівновагу реакцій, які супроводжуються дисоціативним випаровуванням реагентів або відбувається утворення газоподібних продуктів. Оскільки при взаємодії неметалічних тугоплавких сполук із металами велику роль відіграють газофазні процеси. Зменшення тиску в реакційному просторі і наявність масообміну з навколишнім середовищем зміщують рівновагу реакцій таким чином, що відбувається зміна фазового складу продуктів реакції, так, як при пониженні температури [1].

Ішим видом сполук із областю гомогенності є тверді розчини, утворення яких можна передбачати по діаграмі стану для тугоплавких матеріалів. Утворення в системі твердих розчинів також приводить до зміни термодинамічних характеристик систем. Кількісна оцінка такого впливу в даний час не завжди можлива. Таким чином, при строгому розв'язку основних задач термодинамічного дослідження твердофазних процесів необхідно прийняти до уваги:

- 1) вплив температури на термодинамічні функції;
- 2) фазові перетворення компонентів у дослідженому температурному інтервалі;
- 3) вплив тиску на процеси, які супроводжується при значній зміні об'єму, фаз, особливо, якщо процес проходить під тиском, що суттєво відрізняються від атмосферного;
- 4) наявність масообміну з навколишнім середовищем;
- 5) вплив на термодинамічні функції і зміну складу в області гомогенності.

Необхідно зазначити, що термодинамічно розглядаються тільки рівноважні умови, водночас як на практиці результати взаємодії залежать не стільки від параметрів досліджень і кінцевого стану, скільки від неметалевих обмежень.

Головною проблемою, що виникає на шляху створення композиційних матеріалів для роботи в області високих температур (вище 1000°C) є проблема сумісності компонентів. Багато матеріалів, які армовані волокнами або зміцнені

дисперсними включеннями, втрачають стійкість при експлуатації в області високих температур внаслідок дифузії та хімічної взаємодії на границі волокно – основа. Це приводить до руйнування волокна та зміни складу основи і різкого погіршення механічних властивостей композиції. В зв'язку з тим, основні труднощі в технології композитів зв'язані з руйнуванням матеріалів під час хімічної взаємодії. Суттєвий вплив на розвиток дифузії в композиційних матеріалах впливають дислокації, границі розділу основа-волокно, надлишкові неврівноважені дефекти, які виникають під впливом термічних напружень.

З метою забезпечення високих експлуатаційних показників до композиції додають волокна, які повинні мати такі властивості: високу температуру плавлення, низьку густину, високу міцність в усій області робочих температур, мінімальну розчинність в основі, високу хімічну стійкість, відсутність фазових перетворень у зоні робочих температур, а також бути нетоксичними в умовах виготовлення та експлуатації [3]. Комплекс таких властивостей мають волокна бора, карбіду кремнію, графіту, карбіду бора, нитковидні кристали оксиду алюмінію оксиду берилію, карбіду кремнію, карбіду бора, а також вольфрамовий, молібденовий і сталевий тонкий дріт, який застосовується як зміцнювач у композиційних матеріалах. Металевою основою найбільш часто є алюміній, нікель, залізо, хром, титан і сплави на їх основі. При виборі зміцнюючих фаз, які сумісні з металевою основою використовують термодинамічний підхід. Зокрема, як дисперсне включення застосовують, з метою підвищення стабільності композиції, металеву основу із меншим спорідненням до кисню, а тугоплавкі оксиди – з великим спорідненням до кисню.

В літературі містяться загальні практичні рекомендації щодо вибору металевої основи і зміцнюючого оксиду із врахуванням споріднення до кисню металу основи і елемента, що утворює оксид. Наприклад, рекомендується використовувати оксиди, ізобарний потенціал утворення яких при температурі $T=1270\text{K}$ перевищує 250кДж/моль атомів кисню і навіть перевищує 400кДж/моль атомів кисню. Відповідно до термодинамічних розрахунків оксиди рідкоземельних металів мають великі значення ізобарно-ізотермічного потенціалу взаємодії з нікелем і малу розчинність в нікелевій основі. Приймаючи до уваги, що сумісність з основою оксиди рідкоземельних металів є перспективними зміцнювачами для нікеля [1].

Другий підхід щодо вибору сумісних складових композиційних матеріалів охоплює дослідження твердофазної взаємодії і розчинності матеріалів при високих температурах. Для створення сумісної системи зміцнювач-основа необхідно знайти компромісний розв'язок по відношенню до двох протилежних задач:

1) утворення міцного зв'язку на поверхні розділу для ефективної передачі навантаження і підтримування суцільності при термічних циклах;

2) необхідність запобігати руйнуванню композита при високих робочих температурах.

Таким чином, перша задача передбачає збудження хімічної реакції, а друга навпаки перешкоджає протіканню хімічної реакції. Отже, в ідеальному випадку зміцнювач і основа повинні хімічно взаємодіяти лише до такого ступеня, який необхідний для утворення зв'язку при високих температурах, ніж ті при яких передбачається використання матеріалу. Хімічна взаємодія при робочих температурах допустима, якщо швидкість реакції на стільки мала, що практично не зменшує довговічність матеріалу [4].

Одним із способів одержання композиційних матеріалів із використанням несумісних компонентів (наприклад, нитковидних кристалів Si_3N_4 алюмінієм або міддю) - тимчасова взаємодія кристалів із розплавленим металом. Одержання структурно стабільних композиційних матеріалів може бути досягнуто внаслідок

зменшення градієнта хімічного потенціалу і зниження дифузії, який визначають ріст товщини реакційної зони, шляхом очищення від домішок зміцнюючих волокон або кристалів легуванням основи або шляхом нанесення бар'єрного шару на волокно або дріт. Матеріал дифузійного бар'єру повинен задовольняти таким вимогам:

- 1) сумісний із зміцнюючою основою;
- 2) мати близькі коефіцієнти термічного розширення і кристалографічні розміри ґраток із зміцнюючою фазою і основою;
- 3) міцно зчіплюватися із зміцнюючою фазою і основою і не приводити до різкого зниження міцності.

В процесі розробки високотемпературних матеріалів особливе значення має вивчення взаємодії на границі розділу фаз. Хімічні реакції, які проходять в системі покриття – основа, визначають з одного боку технологічні параметри процесу одержання покриття, які характеризуються достатньо міцним щепленням з основою та довговічністю захисної дії.

Висновки. Результати проведених дослідів свідчать про те, що найбільш міцне щеплення покриття з основою досягається при утворенні між ними проміжного шару, який формується внаслідок дифузійної або хімічної взаємодії. Необхідно зазначити, що хімічна взаємодія ефективна лише в тому випадку, якщо нові продукти реакції нагромаджуються в перехідному шарі і мають властивості, які погоджуються із властивостями покриття і основи, а також мають високу міцність. Погодження властивостей покриття і основи може бути досягнуто шляхом підбору режиму нанесення покриття, застосуванням активаторів або сповільнювачів реакції, створення проміжних шарів із подібними властивостями.

Список літератури

1. Афанасьєва О.В. Матеріалознавство та конструкційні матеріали: навч. посіб. Харків: ХНУРЕ, 2016. 188 с.
2. Кицькай Л.І. Формування багатшарового покриття на ніобії і танталі для захисту їх від окислення : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.16.01. Київ, 2020. 16 с.
3. Погребова І.С., Янцевич К.В. Вплив високотемпературного окислення на корозійну стійкість хромосиліційованої сталі 45 І. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2021. Вип. 6. С. 92-97.
4. Юрій Дзядикевич, Олена Захарчук, Павло Попович, Руслан Розум, Мукола Буряк, Віктор Шевчук. Використання боридних і силіцидних покриттів у ДВЗ: технологічний аспект. *Збірник наукових праць Центральноукраїнський науковий вісник «Технічні науки»*. 2023. Вип. 7(38), ч.І. С. 151-159.
5. Калініна Н.Є. Структура, властивості та використання конструкційних наноматеріалів / Калініна Н.Є., Никифорчин Г.М., Калінін О.В. та ін. – Львів : Простір-М, 2017. 302 с.
6. Савуляк В.І., Шиліна О. П., Шенфельд В. Й. Матеріалознавство: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2019. 34 с.
7. William D. Callister Jr., David G. Rethwisch. *Materials Science and Engineering*. John Wiley & Sons; 9th Edition SI Version, 2014. 936 p.
8. William D. Callister Jr., David G. Rethwisch. *Callister's Materials Science and Engineering*. Wiley; 10th edition, 2020. 944 p.
9. Adrian P. Sutton FRS. *Concepts of Materials Science*. OUP Oxford, 2021. 160 p.
10. Жунківський Г.Л., Григорьев О.М., Ведель Д.В. Взаємодія дибориду титану з залізом та нержавіючою сталлю X18H10T. *Порошкова металургія*. 2021. Вип. 07/08. С.95-104.

References

1. Afanas'ieva, O.V. (2016). *Materialoznavstvo ta konstruktivni materialy [Materials science and construction materials]*. Kharkiv: KhNURE [in Ukrainian].
2. Kytskaj, L.I. (2020). Formuvannia bahatosharovoho pokryttia na niobii i tantali dlia zakhystu ikh vid okyslennia [Formation of a multilayer coating on niobium and tantalum to protect them from oxidation]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].

3. Pohrebova, I.S. & Yantsevych, K.V. (2021). Vplyv vysokotemperaturnoho okyslennia na korozijnju stijkist' khromosylitsijovanoi stali 45 I [The influence of high-temperature oxidation on the corrosion resistance of chromosilicized steel 45 I]. *Visnyk KrNU imeni Mykhajla Ostrohrads'koho – Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky KrNU*, 6, 92-97 [in Ukrainian].
4. Dziadykevych, Yu., Zakharchuk, O., Popovych, P., Rozum, R., Buriak, Mukola & Shevchuk, V. (2023). Vykorystannia borydnykh i sylitsydneykh pokryttiv u DVZ: tekhnolohichnyj aspekt [Use of boride and silicide coatings in internal combustion engines: technological aspect]. *Zbirnyk naukovykh prats' Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk «Tekhnichni nauky» – Collection of scientific works Central Ukrainian Scientific Bulletin "Technical Sciences"*, 7(38), I, 151-159 [in Ukrainian].
5. Kalinina, N.Ye., Nykyforchyn, H.M., Kalinin, O.V. et al. (2017). *Struktura, vlastyvoli ta vykorystannia konstruksijnykh nanomaterialiv [Structure, properties and use of structural nanomaterials]*. L'viv : Prostir-M [in Ukrainian].
6. Savuliak, V.I., Shylina, O. P. & Shenfel'd, V. J. (2019). *Materialoznavstvo [Materials science]* Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
7. William D. Callister Jr. & David G. Rethwisch (2014). *Materials Science and Engineering*. John Wiley & Sons; 9th Edition SI Version. 936 p. [in English].
8. William D. Callister Jr. & David G. Rethwisch. (2020). *Callister's Materials Science and Engineering*. Wiley; 10th edition. 944 p. [in English].
9. Adrian P. Sutton FRS.(2021). *Concepts of Materials Science*. OUP Oxford, 160 p. [in English].
10. Zhunkivs'kyj, H.L., Hryhor'iev, O.M. & Vedel', D.V. (2021). Vzaiemodiia dyborydu tytanu z zalizom ta nerzhaviiuchoiu stalliu Kh18N10T [Interaction of titanium diboride with iron and stainless steel X18H10T]. *Poroshkova metalurhiia – Powder metallurgy*, 07/08, 95-104 [in Ukrainian].

Yuriy Dziadykevich, Prof., DSc, **Pavlo Popovych**, Prof., DSc, **Andriy Vitroviy**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ruslan Rozum**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olha Chorna**, Assoc. Prof., Ph.D econ. sci., **Olena Zakharchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Nataliya Halysh**, Ph.D econ. sci., Senior Lecturer, **Zoriana Tsidylo**, Senior Lecturer, **Kateryna Shok**, Senior Lecturer

Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine

Compatibility of material components in civil engineering

The work highlights the problem of thermodynamic and kinetic compatibility of components in the creation of fire-resistant and strong composite materials in civil construction. The works of leading domestic and foreign scientists on this problem are analyzed. The kinetics of the interaction of temperature, pressure, structural features, the degree of compactness of the material and the external environment are considered. Areas of practical application of solid-phase reactions are indicated. Attention is paid to the protection of refractory materials from high-temperature gas corrosion. The compatibility of the boride coating with refractory metals was investigated. The interaction of titanium diboride with iron and its alloy was studied. It has been proven that iron alloys are promising for their use as a basis for composite materials. The laws of the compatibility process of components during the development and operation of high-temperature materials in civil engineering were studied. The main factors influencing the compatibility of components during thermodynamic solid-phase processes of creating composite materials are highlighted. Recommendations are given for the selection of the metal base and strengthening oxide, taking into account the affinity of the base metal and the oxide former for oxygen. The solid-phase interaction and solubility of materials at high temperatures were studied. Methods of obtaining composite materials using incompatible components are given.

The results of the conducted experiments indicate that the strongest grafting of the coating with the base is achieved when an intermediate layer is formed between them, which is formed as a result of diffusion or chemical interaction. It should be noted that the chemical interaction is effective only if the new reaction products are accumulated in the transition layer and have properties that agree with the properties of the coating and the base, and also have high strength. Matching the properties of the coating and the base can be achieved by selecting the coating application mode, using activators or reaction retarders, and creating intermediate layers with similar properties.

compatibility of components, composite refractory materials, civil engineering

Одержано (Received) 26.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 29.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 624.15

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.98-115](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.98-115)

І. А. Карпюк, доц., канд. техн. наук, **Є.В. Клименко**, проф. д-р техн. наук
Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса, Україна
e-mail: irina.carpyuk@gmail.com, klimenkoew57@gmail.com

Д.С. Даниленко, інженер, канд. техн. наук
Будівельна компанія "СТІКОН", м. Одеса, Україна
e-mail: doazisds@gmail.com

М. В. Карпюк, студ.
Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса, Україна
e-mail: marai.v.karpiuk@gmail.com

Порівняльний аналіз несучої здатності дослідних пошкоджених залізобетонних елементів, підсилених металевими обоймами

В роботі представлені результати досліджень та порівняльний аналіз несучої здатності деформативності та тріщиностійкості доведених у попередніх випробуваннях до граничного стану (ULS) базальтобетонних балок, підсилених металевими обоймами. Ці дані представлені у вигляді експериментально – статистичних залежностей основних параметрів працездатності дослідних зразків від конструктивних чинників та рівнів малоциклового повторного навантаження.

Проведені експериментально-теоретичні дослідження показали, що руйнування дослідних зразків-балок з великими і середніми прольотами зрізу при знакозмінному малоцикловому навантаженні відбувається за небезпечними похилими наскрізними тріщинами від переважної дії згинальних моментів в повздовжніх елементах підсилення обойми, у повздовжній розтягнутій арматурі а також поперечних стержнів балки та обойми границі текучості.

пошкоджені базальтобетонні балки; підсилення приопорних ділянок вуглепластиковими сорочками; підкріплення нижніх розтягнених зон вуглепластиковими полотнами; деформативність бетону, арматури і фіброармованого пластика; тріщиностійкість балок; експериментально-статистичні залежності

Постановка проблеми. Підсилення пошкоджених наскрізними нормальними і похилими перехресними надмірно розкритими тріщинами балкових ЗБК, у гідротехнічному і транспортному будівництві, при зведенні прогонових будов мостів, очисних споруд, об'єктів хімічної та харчової промисловості, будівель спеціального призначення та у фундаментобудуванні. доведених в процесі вказаної вище експлуатації до граничного або передаварійного стану, за дії зростаючого циклічного навантаження високих рівнів без зупинки технологічного процесу виробництва за допомогою попередньо напружених металевих обойм є актуальним і перспективним. Проте, проектування такого підсилення стримується відсутністю нормативної методики та чітких рекомендацій в авторських методиках, які адекватно б відображали реальний напружено-деформований стан як пошкодженої конструкції, так і елементів підсилення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Будь-яке явище, що відбувається з людиною, здавна піддавалося аналізу і опису з метою з'ясування причинно-наслідкових зв'язків та наступними спробами прогнозування цього явища. З ростом розуміння докільля та виникненням окремих описів чинників явищ з'явився розподіл загального на часткове. Залежно від точності та призначення ті або інші окремі складові почали

застосовуватися на практиці. Не став виключенням розвиток аналітичного розуміння роботи залізобетону. Адже накопичення експериментального досвіду з удосконаленням розрахункового апарату спонукає до підйому й розвитку ЗБК на більш високому рівні. Бондаренко В. М. і Колчунов В. І. запропонували таку методичну вертикаль досліджень: першочергово – фізична модель; друга за значимістю розрахункова модель; і найвищий ступінь цього ланцюжка – математична модель.

Фізична модель має повний опис явища за допомогою чіткої у фізичному розумінні термінології і базується на підставі інтуїтивного та аналітичного досвіду. Набір окремих функцій опису процесів часто носить несумісно-протилежний характер взаємодії, що іноді йде в розріз із загальноприйнятим розумінням явища. Проте, саме повний опис явища дозволяє з достатньою точністю врахувати усі чинники.

Але багатофакторність навіть простого явища породжує складну фізичну модель, інколи малоприсадибну для практичного використання в повсякденній роботі. У зв'язку з чим доводиться нехтувати малозначимими чинниками, чинники ж "середньої значущості" об'єднувати в коефіцієнти робіт, а основні залежності описувати зручними для практичного застосування виразами. В процесі трансформації однієї моделі в іншу головне не втратити взаємозв'язок між процесами, зберігши якісну складову цих зв'язків. Але і будь-яка розрахункова модель має свої межі, залежні у свою чергу від вживаного математичного апарату.

Математична модель містить у своєму розпорядженні набори формул та їх співвідношень, алгоритмів, що дозволяє в максимально повному та точному вираженні математично відтворити явища і процеси. Розвиток комп'ютерних технологій дає можливість застосування математичних моделей в якості розрахункових, зберігаючи деталізоване фізичне розуміння з математичною точністю.

Усі види моделей, поведінка конструкції при дії зовнішніх чинників розвиваються з моменту появи залізобетону, з кожним досвідом і аналітичним аналізом, трансформуючись та "обростаючи" усе більш точними залежностями. Кількість робіт, що проводяться, в області "опису" поведінки залізобетонних елементів нашо́вхує на висновок про не досконалість розрахункової моделі.

Розглянемо ж зародження та еволюційну трансформацію математичної поведінки підсиленої горизонтальними попередньо напруженими зтяжками, залізобетонної балки.

Початковим етапом приведення до чисельного вираження є розрахункові передумови.

У рекомендаціях щодо оцінки стану та посилення будівельних конструкцій промислових будівель та споруд. НДІБК викладена методика розрахунку підсиленого згинального залізобетонного елемента з горизонтальною попередньо напруженою зтяжкою, задавшись такими розрахунковими передумовами:

1. У підсиленій конструкції забезпечено надійне закріплення кінців арматури та забезпечений надійний зв'язок нової конструкції із старою.

2. У стадії руйнування підсиленої конструкції напруження в розтягнутій арматурі досягають границі текучості. Одночасно стискаюче напруження у бетоні досягає тимчасового опору стиску при згині. Бетон не бере участь в передачі розтягуючих зусиль. Епюра нормального напруження бетону в стислій зоні є прямокутною.

3. Розтягнута арматура основної конструкції та арматура підсилення мають однакову границю текучості.

Автори [5] в результаті аналітичного дослідження для визначення граничного напруження в попередньо напруженій зтяжці виходили з того що напруження в попередньо напруженій зтяжці є лінійно-пружним. А розрахункові моделі за Міхеєв І.І., Захаров С. Т., Косенков Е. Д. будувалися з умови того, що попереднє натягнення

стержнів підсилення буде таким, що напруження в арматурі балки та стержнях одночасно досягне розрахункових опорів.

Підсилення здійснюється, в основному, пошкоджених конструкцій. Пропонуючи розрахункові методики дослідники по-різному враховують пошкодженість конструкцій: хто шляхом визначення залишкової несучої здатності, інші – коефіцієнтами, а хто взагалі її не ураховує. Так Пинаджян В. В. вплив рівня пошкодженості конструкції при виведенні розрахункових формул не враховував. При цьому, збіжність експериментальних з розрахунковими даними склала від - 6,9% до 17,4%.

Переходячи до безпосередніх розрахункових методів підсилення попередньо напруженими зтяжками згинальних залізобетонних елементів, дослідники застосовують теж різний підхід. Детально методику розрахунку підсиленого елемента виклав Онуфрієв Н. М., в якій проектування підсилення ЗБК рекомендує виконувати в такій послідовності:

1) Розраховуються і будуються первинні епюри згинаючих моментів, та поперечних сил в конструкції, яка підлягає підсиленню.

2) Будуються епюри згинальних моментів, та поперечних сил від завантаження елемента тільки додатковим розрахунковим навантаженням, прикладеним після реконструкції елемента шляхом його підсилення зтяжкою.

3) Орієнтовно визначається необхідна площа поперечного перерізу зтяжки підсилення.

4) Визначається жорсткість підсилюваного елемента при дії повного розрахункового навантаження та зусиль в тяжах зтяжки, напружених до граничного стану.

5) Визначаються розрахункові зусилля в зтяжці від дії повного розрахункового навантаження.

6) Визначається величина потрібного попереднього напруження в тяжах зтяжки.

7) Перевіряється підсилений елемент на сприйняття ним збільшених навантажень та зусиль після реконструкції.

Мальганов А. И., Плевков В. С. і Полищук А. И. пропонували розрахунок по нормальних перерізах вести, виходячи з рівнянь рівноваги. А розрахунок по похилих перерізах дослідники пропонують виконувати за допомогою нормативної методики, додаючи до несучої здатності, похилого перерізу залізобетонного посилюваного елемента несучу здатність хомутів підсилення з пониженим розрахунковим опором арматури.

Автори Міхеєв І. І., Захаров С. Т., Косенкова Е. Д. розрахунок за нормальними перерізами пропонують виконувати як для звичайної залізобетонної балки з приведеною площею перерізу робочої арматури і приведеною робочою висотою за умови, що попереднє натягнення стержнів підсилення буде таким, що напруження в арматурі балки та стержнях одночасно досягне розрахункових опорів.

В ході експериментального дослідження авторами Хило Е. Р. і Попович Б. С. була виявлена умовність визначення жорсткості, виведеної з формули кривизни позациенторово-стиснутого елемента. Відмінність в 45% експериментальних прогинів від теоретично вичислених по вище вказаній жорсткості. У зв'язку з цим автори висунули припущення, що для визначення жорсткості підсилення балок: а) жорсткість підсиленої балки потрібна, зазвичай, для визначення її деформацій, відлічуваних від положення, зайнятого балкою після натягнення стержнів підсилення; б) попереднє напруження балки порівняно невелике та переріз напружених стержнів складає тільки частину загальної площі арматури балки; в) величина початкового напруження від заздалегідь натягнутих стержнів підсилення не має впливу на величину деформацій балки від навантаження, яке прикладається до неї вже після підсилення. Внаслідок цього запропоновано підсилену балку розглядати як єдиний згинальний елемент з

приведеними площею арматури $F_{п}$ та робочої висоти $h_{0п}$. Визначення прогину виконується як для згинального елемента, без попереднього напруження. Життєздатність цього підходу була підтверджена експериментальними результатами, проведеними Е.Р. Хило, та в результаті обробки даних Онуфрієв Н. М. та Хило Е. Р. і Попович Б. С. Розрахунок же за похилими перерізами автори пропонують вести виходячи з припущення що руйнування залізобетонної балки по косою перерізу відбувається внаслідок руйнування стислої зони бетону над косою тріщиною.

При розрахунку напруження в попередньо напруженій зтяжці автори [4] пропонують застосувати уточнений ними коефіцієнт урахування стержнів посилюваного елемента та стержнів підсилення, що надалі дозволяє виконувати розрахунок за стандартною методикою, з використанням формул:

- при одноточковому навантаженні:

$$\Omega_u = \frac{1.5}{\left(\frac{L}{d_{ps}}\right)}, \quad (1)$$

- при три точковому і розподіленому навантаженнях:

$$\Omega_u = \frac{3.0}{\left(\frac{L}{d_{ps}}\right)}, \quad (2)$$

де L – довжина прольоту;

d_{ps} – відстань від крайнього стиснутого волокна балки до центру попередньо напруженого елемента підсилення.

Автори [1] цей коефіцієнт рекомендують визначати за формулою:

$$\tilde{\omega} = \frac{A_{ps} f_{pe} + A_s f_y - A'_s f'_s - 0.85 \beta_1 f'_c (b - b_w) h_f}{0.85 \beta_1 f'_c b_w b_{ps}}, \quad (3)$$

де A_{ps} , A_s , A'_s – площа поперечного перетину стержнів підсилення, нижніх та верхніх стержнів балки;

f_{pe} , f_s , f'_s – значення міцності стержнів підсилення, нижньої та верхньої арматури балки на розтяг;

β_1 – коефіцієнт глибини стискаючих напружень;

b – ширина поперечного перерізу балки;

h_f – висота поперечного перерізу балки;

d_{ps} – робоча висота поперечного перерізу.

Однією з особливостей цього виду виду підсилення є пристрій попереднього напруження в елементах підсилення, який дослідники описують по-різному. В результаті експериментального дослідження Онуфрієвим Н. М. було виявлено падіння напруження в зтяжках внаслідок обминання бетону під анкерами та випрямлення тяжів під натягненням в межах 5 - 19% для горизонтальних і шпренгельних зтягувань, та 3 - 20% для двопролітних балок. У зв'язку з цим Онуфрієв Н. М. пропонує враховувати втрати попереднього напруження шляхом введення експериментально встановленого коефіцієнта умов роботи m_0 :

1) Для горизонтальних попередньо напружених зтяжок $m_0=0,85$ ($m_0=0,80$ за рекомендаціями по проектуванню підсилення залізобетонних конструкцій будівель і споруд будівель, що реконструюються).

2) Для попередньо напружених шпренгельних та комбінованих зтяжок $m_0=0,80$.

3) Для попередньо напружених поперечних стержнів підсилення $m_0=0,90$ ($m_0=0,75$ за рекомендаціями по проектуванню підсилення залізобетонних конструкцій будівель і споруд будівель, що реконструюються).

Автори каталогу конструктивних рішень щодо посилення та відновлення будівельних конструкцій промислових будівель, Гранєв В.В., Кудрявцев Ю.В., Макулин І.С., Сисоєв О.М. обмежили вище наведені коефіцієнти умов роботи нижньою межею в балках $l=6$ м, не дивлячись на те, що Онуфрієв Н. М. отримав ці значення в результаті аналізу проведених експериментальних досліджень на балках з прольотом $l=3,2$ м (однопролітні), та $l=2,0$ м (двопролітні). В процесі вивчення питання втрат попереднього напруження коефіцієнт m_0 , запропонований Онуфрієв Н.М., зазнавав зміни в кількісному вираженні. Надалі цей коефіцієнт був названий коефіцієнтом умови роботи зтягування "m", та, на додаток, рекомендовано урахувувати міру податливості вузлів сполучення конструкцій підсилення з елементами ЗБК, які підсилюються у залежності від їх конструктивного рішення: металевий упор на бетон без розчину - 2-5 мм/вузол; з розчином - 2-4 мм/вузол; з'єднання металевих елементів болтами - 1 мм/вузол. У свою чергу, пізніше було запропоновано при розрахунку підсилення ненапружених елементів коефіцієнт "m" приймати залежно від міри розвантаження посилюваного елемента. Так, при повному розвантаженні $m=0,95$; при розвантаженні на рівні 75% - 0,9; 50% - 0,8; 25% - 0,7. Є ще одна точка зору - втрати попереднього напруження від релаксації для сталей А-I, А - II, А - III, А - Пв, А-IIIв, а також від повзучості та усадки бетону внаслідок їх згасання в посилюваних конструкціях Михеев И. И., Захаров С. Т., Косенкова Е. Д. пропонують не враховувати. При цьому Онуфрієв Н. М., пропонує врахувати втрати від обтискання та деформації анкерів, а також від можливого випрямлення стержнів підсилення, величину цих втрат, рівню 20%. При визначенні площі перерізу додаткової попередньо напруженої арматури Мартемьянов А.І. пропонує розрахунковий опір додаткової попередньо напруженої арматури прийняти з коефіцієнтом $0,75\gamma_s$, величину напруження в арматурі підсилення обчислюють за формулою, яка надалі застосовується, замість розрахункового опору, для визначення кількості додаткової розтягнутої арматури:

$$\sigma_{lim,ad} = \frac{\left[\sigma_{sp,ad} + 2\alpha R_{bt,ser} + \left(\delta_b - \frac{\sigma_{sp,ad}}{R_{s,ser,ad}} \right) \frac{R_{b,ser} h_{0,red}}{\mu l} \right]}{\gamma_s}, \quad (4)$$

де $\sigma_{sp,ad}$ – величина попереднього напруження в додатковій арматурі підсилення (з врахуванням втрат);

$R_{s,ser,ad}$ – розрахунковий опір додаткової арматури підсилення для граничних станів другої групи;

γ_s – коефіцієнт надійності по арматурі;

μ – коефіцієнт армування;

l – відстань між внутрішніми торцями анкерів арматури підсилення;

δ_b – основний безрозмірний коефіцієнт.

Наявність точок перегину збільшує величину втрати попереднього напруження зтяжок. В результаті експериментального дослідження в шпренгельних зтяжках відзначалося тертя в місцях їх перегину, яке Онуфрієв Н.М. запропонував врахувати середнім коефіцієнтом тертя $f_0=0,45$. Як бачимо, у втратах попереднього напруження, та у величині податливості немає загального рішення з причини багатofакторності умов застосування. Але факт значущості цього параметра є незаперечним.

Ще один значущий чинник впливає на напружено-деформований стан підсиленої конструкції - рівень попереднього напруження елементів підсилення. Так, величину попереднього напруження горизонтальних стержнів підсилення дослідники [1] пропонують прийняти від $0,4 R_a''$ до $1,0 R_a''$, а автори каталогу конструктивних рішень щодо посилення та відновлення будівельних конструкцій промислових будівель, Гранев В.В., Кудрявцев Ю.В., Макулин І.С., Сисоєв О.М. пропонують задавати рівень попереднього напруження у залежності від рівня навантаження балки у момент підсилення, тобто від $0,3 R_d^H$ до $1,0 R_d^H$. При призначенні рівня попереднього напруження (для стержнів із сталей класів А - І, А - ІІ, А - ІІІ) Мартемьянов А.І. запропонував враховувати рівень навантаження конструкції, у певній залежності:

p_p / p_y (1 ... 1,25)	σ_{sp} / R_{sd} (0,9)
(1,25 ... 1,7)	(0,7 ... 0,9)
(1,7 ... 2,5)	(0,55 ... 0,7)
(2,5)	(0,4 ... 0,55)

де p_p - навантаження котре сприймає підсилений елемент;

p_y - навантаження, прикладене у балці при її підсиленні;

σ_{sp} - попереднє напруження в затяжці;

R_{sd} - розрахунковий опір розтягуванню арматури підсилення.

Мартемьянов А. І. обмежує максимальну величину попереднього напруження для стержнів з м'яких сталей - $0,9 R_{s,ser}$ ($R_{sn,ad}$) та для стержнів з високоміцних сталей - $0,7 R_{s,ser}$ ($R_{sn,ad}$). Мінімальна ж величина попереднього напруження стержнів у будь-якому випадку обмежена - $0,4 R_{s,ser}$ ($R_{sn,ad}$).

У більшості робіт розрахунків поперечних попередньо напружених елементів підсилення пропонується виконувати як і для поперечних стержнів посилюваної конструкції за умови відсутності похилих тріщин. Але деякі дослідники, в т.ч. Онуфрієв Н. М. при пошкоджених похилих перерізах розрахунковий опір поперечних попередньо напружених елементів підсилення рекомендують понизити на 25%.

Мальганов А. І., Плевков., В. С., Полищук А. І. пропонують коефіцієнт умови роботи хомутів підсилення приймати рівним $\gamma_{ss}=0,85$. У пізнішому джерелі інформації Посібник П 1-98 при розрахунку підсилених конструкцій по похилому до подовжньої осі перерізу рекомендується до поперечної арматури підсилення, ввести коефіцієнт умови роботи: за відсутності похилих тріщин $\gamma_{sw,ad}=1,0$; за наявності похилих тріщин в зоні зрізу з попереднім напруженням поперечних стержнів підсилення $\gamma_{sw,ad}=0,9$; за наявності похилих тріщин в зоні зрізу, без попереднього напруження поперечних стержнів підсилення $\gamma_{sw,ad}=0,7$.

Не мало важким чинником є напружений стан пошкодженої конструкції. Але, як відмічено було пізніше, під час підсилення фактичне розрахункове навантаження, на посилювану конструкцію не повинне перевищувати 65%. В рекомендаціях по проектуванню підсилення залізобетонних конструкцій будівель і споруд будівель, що реконструюються рекомендовано прийняти коефіцієнтом умови роботи $\gamma_{sri}=0,8$ з обмеженням на застосування: "поширюється на підсилення конструкцій залізобетонними обоймами, сорочками та нарощуванням" без вказівки застосування в горизонтальних затяжках.

У випадку необхідності зварювання з робочою арматурою посилюваної балки у роботах [4] пропонується врахувати це у вигляді зменшення перерізу існуючої (старої) арматури на 25%.

При розрахунках важко пошкоджені конструкції коли зруйновано 50% перерізу бетону або 50% площі робочої арматури, то несуча здатність підсилюваної конструкції

не урахується, а пристрій підсилення розраховується на повне навантаження [10]. Пропонується також урахувати додаткові зусилля, які виникають при зміні температурних умов. Величина цих зусиль визначається різницею температур у момент натягнення елементів підсилення та експлуатації (мінімальною або максимальною).

Постановка завдання. Таким чином з вище сказаного можна побачити недосконалість розрахункової моделі підсилених, попередньо напруженими горизонтальними затяжками, згинальних залізобетонних елементів. Думки дослідників різняться, практично, по всіх параметрах. Втрати попереднього напруження, рівень попереднього напруження, урахування напруженого стану конструкції під час підсилення та ступеню пошкодженості посилюваної конструкції, вплив температурного чинника з всіх параметрах ще не однозначно ураховані у запропонованих методах, що свідчить про їх незавершеність.

Мета роботи полягає в порівнянні, впливу передумов й розрахункових схем, існуючих нормативних та авторських методик деформативності та тріщиностійкості пошкоджених у попередніх досліджень [2] і доведених до граничного стану (ULS) бетонних балок з базальтопластиковою арматурою, підсилених вуглепластиковими сорочками на приопорних ділянках і вуглепластиковими полотнами у нижній розтягнутій зоні за дії малоциклового повторного навантаження високих рівнів з розробкою експериментально - статистичних залежностей впливу дослідних чинників на вказані вихідні параметри другої групи граничних станів (SLS), а також в поповненні даних до єдиної розрахункової моделі деформативності та тріщиностійкості вказаних конструкцій.

Завдання досліджень полягає порівняльного аналізу несучої здатності дослідних пошкоджених залізобетонних елементів, підсилених металевими обоймами, за існуючими національними нормами проектування та авторськими методами.

Виклад основного матеріалу. Питанням розрахунку підсилених будівельних конструкцій, як вже було сказано, займалося багато дослідників. Але найцікавішими являються авторські методики розрахунку котрі були розроблені в результаті експериментальних досліджень, й існуючі нормативні методики. Адже перші мають під собою практичне підґрунтя, а другі (скопільовані з практичних та теоретичних досліджень) носять законодавчу силу, й фактично відповідають за безпечну працю підсилених будівельних конструкцій.

Для зручності, розрахункові формули винесені до табл. 1, тут же розглянемо наявні: розрахункові передумови, розрахункові моделі, коефіцієнти і умови розрахунку.

Порівняння дослідних і розрахункових значень несучої здатності пошкоджених експериментальних зразків-балок показало незадовільну їх збіжність тому, що відомі нормативні та авторські методи передбачають розрахунок несучої здатності пошкоджених ЗБК за небезпечною похилою тріщиною при переважній дії поперечної сили, тобто урахуються складові несучої здатності похилих перерізів по бетону над вершиною небезпечної похилої тріщиною та хомутів і вертикальних елементів зовнішнього підсилення. Проте проведені експериментально-теоретичні дослідження показали, що руйнування дослідних зразків-балок з великими і середніми прольотами зрізу при знакозмінному малоцикловому навантаженні відбувається за небезпечними похилими наскрізними тріщинами від переважної дії згинальних моментів в повздовжніх елементах підсилення обойми, у повздовжній розтягнутій арматурі а також поперечних стержнів балки та обойми границі текучості. Тобто, реальна фізична картина роботи системи “пошкоджена залізобетонна балка-попередньо напружена металева обойма підсилення” при знакозмінному поперечному навантаженні високих рівнів суттєво відрізняється від фізичної моделі раніше діючих нормативних і авторських методів.

Таблиця 1 – Таблиця розрахункових формул за найбільш поширеними методиками визначення несучої здатності підсиленних залізобетонних елементів, що згинаються

<p>Передумови:</p> <p>1. Передумови: В посилюваній конструкції забезпечено надійне закріплення кінців розтягнутої арматури; забезпечений надійний зв'язок нової конструкції зі старою;</p> <p>2. В стадії руйнування посилюваної конструкції напруження в розтягнутій арматурі досягає межі пружності; одночасно</p>	
<p>Вираження взаємозв'язку лінійних деформацій балки та балочного залізобетонного елемента за пропозицією Мальганова А. И., Плевкова В. С., Полищука А. И., 4. Онуфриев Н. М.:</p> $\delta_x = \delta_q - \delta_M - \Delta_x; \delta_q = c \cdot (\alpha + \beta); \delta_M = \frac{Xlc^2}{B}; \delta_x = \frac{Xl}{F_0 E_a}; \Delta_x = \frac{Xl}{FE_\sigma}$	
<p>Зусилля в затяжці:</p> $X = \frac{(\alpha + \beta) \cdot B}{l \cdot A}; A = \frac{B}{cF_0 E_a} + c + \frac{B}{cFE_\sigma}$	
<p>Передумови:</p> <p>1. В посилюваній конструкції забезпечено надійне закріплення кінців розтягнутої арматури; забезпечений надійний зв'язок нової конструкції зі старою;</p> <p>2. В стадії руйнування посилюваної конструкції напруження в розтягнутій арматурі досягає межі пружності; одночасно напруження стиску в бетоні досягають тимчасового опору стиснення при згині. Бетон не бере участь в передачі розтягуючих зусиль. Епюра нормальних напружень бетону в зжатій зоні представляє собою прямокутник.</p> <p>3. Розтягнута арматура основної конструкції та арматура підсилення мають однакову межу текучості.</p>	
<p>Розрахунок за нормальними перерізами за пропозицією Пинаджян В. В. [6]:</p> $M_p = bh_0^2 R_u \alpha (1 - 0,5\alpha) + f_2 S \sigma_T,$ $\alpha = \frac{(f_1 + f_2) \sigma_T}{R_u b h_0} < 0,50$	
<p>Розрахунок за похилими перерізами:</p> $Q_p = \Sigma f_{от} \sigma_{от} \sin \phi + \Sigma f_x \sigma_x + \frac{0.15 b h_0^2 R_u}{Z \text{ctg} \alpha}$	
<p>Згинаючий момент за пропозицією Михеев И. И., Захаров С. Т., Косенков Е. Д., Хило Е. Р., Попович Б. С. та Рекомендаційц щодо посилення монолітних залізобетонних конструкцій будівель та споруд підприємств гірничодобувної промисловості :</p> $M = R_u b x (h_{0п} - \frac{x}{2}) + R_{ac} F'_a (h_{0п} - a')$	
<p>Висота стиснутої зони:</p> $x = \frac{R_a F_n - R_{ac} F'_a}{b R_u}$	<p>Приведена площа робочої арматури:</p> $F_n = F_a + F_d \frac{R_d}{R_a}$
<p>Приведена робоча висота:</p> $h_{0п} = h_0 + \frac{R_d F_d}{R_a F_n} (h_d + h_0)$	

Продовження таблиці 1

Площа додаткової арматури за пропозицією Михеева И. И., Захарова С. Т., Косенкова Е. Д., 9. Хило Е. Р., Рекомендаційц щодо посилення монолітних залізобетонних конструкцій будівель та споруд підприємств гірничодобувної промисловості:

$$F_d = \frac{-B_1 + \sqrt{B_1^2 - 4A_1C_1}}{2A_1}$$

$$A_1 = \frac{R_d^2}{2bR_u}; \quad B_1 = \frac{F_a R_d R_a}{bR_u} + R_d \left(\frac{R_{ac} F_a'}{bR_u} - h_d \right);$$

$$C_1 = \frac{R_a^2 F_a^2}{2bR_u} - \frac{R_{ac} F_a' R_a F_a}{bR_u} + M + R_{ac} F_a' \left(\frac{R_{ac} F_a'}{2bR_u} + a' \right) - R_a F_a h_0$$

$$F_u \leq \alpha_{\max} b h_0 \frac{R_u}{R_a}$$

Передумови:

1. Розрахунок ведеться як для статично не визначеного позацентрово стиснутого елемента.
2. Статично невизначені зусилля в зтяжці визначаються з рівняння взаємозв'язку лінійних деформацій балочного елемента та тяжів зтяжки.

Розрахунок за нормальними перерізами за пропозицією Онуфриєва Н. М., Допомоги з підсилення несучих конструкцій будівель і споруд, що реконструюються, промислових підприємств, розташованих у II і III зонах м. Алма-Ати:

$$N_e = R_u b x (h_0 - 0,5x)$$

Розрахунок за похилими перерізами:

$$Q_{x0} = \sqrt{0,45 R_u b h_0^2 (q_x + q_{x0})} - q_x u > Q + Q_q$$

$$q_{x0} = \frac{F_{x0} R_{ax} \cdot 0,85}{u_{x0}}$$

$m_0 = 0,85$ – коефіцієнт умови роботи зтяжки

Напруження в попередньо напружених стержнях за пропозицією Озкул О., Насіф Х., Танчан П., Хараджлі М.:

$$f_{ps} = f_{pe} + \frac{E_{ps}}{196} \left[\frac{e \beta_1 f_c' b}{A_s f_y + A_{sp} f_{pu}} k_1 \right]$$

Згинальний момент за пропозицією Хило Е. Р., Попович Б. С.:

$$M = R_u b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + R_{ac} F_a' (h_0 - a)$$

Продовження таблиці 1

Висота стиснутої зони:

$$x = \frac{R_a F_n - R_{ac} F_a'}{b R_u}$$

Приведена робоча висота:

$$h_{0n} = h_0 + \frac{F_n - F_a'}{F_n} (h_d - h_0)$$

Площа поперечного перерізу стержнів підсилення:

$$F_d = \frac{B \pm \sqrt{B^2 - 4A C}}{2A}$$

$$A = \frac{R_a^2}{2b R_u}; \quad B = \frac{R_{ac} F_a' R_a}{b R_u} + R_a \cdot h_d$$

$$C = M_n + R_{ac} F_a' \left(\frac{R_{ac} F_a'}{2b R_u} + a' \right) + R_a F_a' (h_d - h_0)$$

$$F_n \leq \alpha_{\max} b h_0 \frac{R_u}{R_a}$$

Рівняння рівноваги для визначення граничної поперечної сили:

- без поперечного армування підсилюваної конструкції

$$Q_{np} \cdot a = R_{np} b x_1 z + \frac{q_x c^2}{2}$$

- з поперечним армуванням підсилюваної конструкції

$$Q_{np} \cdot a - \frac{q a^2}{2} = R_{np} b x_1 z + \frac{q_x c^2}{2}$$

Граничне напруження в попередньо напружених стержнях за пропозицією Нааман А., Алхайрі Ф.:

$$f_{ps} = f_{pe} + \Delta f_{ps} = f_{pe} + \Omega_u E_{ps} \epsilon_{cu} \left(\frac{d_{ps}}{c} - 1 \right) \frac{L_1}{L_2}$$

Відстань від крайнього стискаючого волокна до нейтральної осі:

$$c = \frac{-B_1 + \sqrt{B_1^2 - 4A_1 C_1}}{2A_1};$$

$$A_1 = 0,85 f'_c b_w \beta_1$$

$$B_1 = A_{ps} (E_{ps} \epsilon_{cu} \Omega_u (L_1/L_2) - f_{pe}) + A'_s f'_y - A_s f_y + 0,85 f'_c (b - b_w) h_f$$

$$C_1 = -A_{ps} E_{ps} \epsilon_{cu} \Omega_u d_{ps} (L_1/L_2)$$

Приріст напруження в стержнях підсилення за пропозицією Хе З., Лю З.:

$$\Delta f_{ps,u} = \frac{\Gamma_1}{k} \left(1 - \frac{\Gamma_2}{k} \right)$$

$$\Gamma_1 = \gamma \eta K \epsilon_{cu} E_p \epsilon_m / \tilde{\omega} d_{ps}$$

$$\Gamma_2 = \gamma \phi K \epsilon_{cu} L^2 / \eta \tilde{\omega} d_{ps} \epsilon_m$$

Продовження таблиці 1

<p>Площа поперечного перерізу стержнів підсилення за пропозицією Мартемьянов А. І.:</p> $F_{sd} = \frac{A}{2} \pm \sqrt{\frac{A^2}{4} - B}$ $A = \frac{F_s R_s - F'_s R_{sc} - R_b b (h_{0II} + a_0)}{0,5 R_{сДН} 0,75 \gamma_{s6}}$ $B = \frac{2 [M - (R_s F_s h_{0II} - R_{sc} F'_s a')] R_b b + (R_s F_s - R_{sc} F'_s)^2}{(R_{сДН} 0,75 \gamma_{s6})^2}$
<p>Висота стиснутої зони:</p> $x = \frac{R_{sd} F_{sd} + R_s F_s + R_{sc} F'_s}{R_b b}$
<p>Кількість додаткової розтягнутої арматури за пропозицією «Надземні конструкції та споруди». Харьковський Промбудніипроєкт:</p> $A_{s,ad} = - \left(\frac{A}{2} \right) \pm \sqrt{\frac{A^2}{4} - B}$ $A = \frac{A_s R_s - A'_{s,red} R_{sc} - R_{b,red} b h_{0,red}}{0,5 \sigma_{lim,ad}}$ $B = \frac{2 [M + (R_{sc} A'_{s,red} a' + R_s A_s h_{0,red})] R_{b,red} b - (R_s A_s - R_{sc} A'_{s,red})^2}{\sigma_{lim,ad}^2}$
<p>Висота стиснутої зони:</p> $x = \frac{\sigma_{lim,ad} A_{sp,ad} + R_s A_s - R_{sc} A'_{s,red}}{R_{b,red} b}$
<p>Площа поперечного перерізу додаткової арматури в розтягнутій зоні конструкції за пропозицією Посібника «Посилення залізобетонних конструкцій».</p> $A_{s,ad} = - \left(\frac{B}{2} \right) - \sqrt{\frac{B^2}{4} - C}$ $B = \frac{2(A_s R_s - A'_s R_{sc} - R_b b h_{0,ad})}{R_{s,ad}}$ $C = \frac{2 [M + (R_{sc} A'_s a' - R_s A_s h_0)] R_b b + (R_s A_s - R_{sc} A'_s)^2}{R_{s,ad}^2}$
<p>Міцність по похилій стислій смузі:</p> $Q \leq 0,3 \varphi_{w1} \varphi_{b1} R_b b h_0$ <p>Міцність по похилій тріщині:</p> $Q \leq Q_b + Q_{sw} + Q_{s,inc}$
$Q_b = \frac{M_b}{c};$ $Q_{sw} = (q_{sw} + q_{sw,ad}) c_0;$ $Q_{s,inc} = R_{sw,ad} A_{s,inc,ad} \sin \theta$

Продовження таблиці 1

<p>Граничний згинаючий момент перерізами за рекомендаціями СП 349.1325800.2017. Конструкції бетонні та залізобетонні. Правила ремонту та посилення.:</p> $M_{ult} = R_{b,red} b x (h_{0,red} - 0,5x) + R_{sc} A_{s,red} (h_{0,red} - a')$ $M \leq M_{ult}$
<p>Передумови:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Розрахунок ведеться як для статично не визначеного позacentрово стиснутого елемента. 2. Втрати попереднього напруження в додатковій арматурі визначаються по СНиП 2.03.01-84*, як для конструкції з натягом арматури на бетон. 3. Розрахунок міцності ведеться з припущенням що граничний стан підсиленних конструкцій настає одночасно з досягненням існуючою арматурою та зтяжкою розрахункового опору. 4. При розрахунку підсилення сильно пошкоджених конструкцій (при руйнуванні 50% перерізу чи 50% площі робочої арматури), конструкція підсилення розраховується на повне діюче навантаження, при цьому несуча здатність конструкції що підсилюється, в розрахунку не враховується.
<p>Розрахунок за нормальними перерізами за пропозицією Посібника «Посилення залізобетонних конструкцій».</p> $N_e = R_u b x (h_0 - 0,5x)$ <p>Розрахунок за похилими перерізами:</p> $Q < Q_b + Q_{sw}$ <p>по похилій сжатій смузі:</p> $Q < 0,3 \phi_{w1} \phi_{b1} R_{b,red} b h_0$ <p>$\gamma_{sp,ad} = 0,8$ – коефіцієнт умови роботи зтяжки; $\gamma_{sw,ad} = 0,9$ – коефіцієнт умови роботи додаткової поперечної арматури.</p>
<p>Передумови:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Втрати попереднього напруження в зтяжках визначаються по СП 63.13330, як для конструкції з натягом арматури на бетон. 2. Напруження в арматурі посилюваного елемента слід приймати рівним розрахунковому опору арматури. 3. При розрахунку підсилення сильно пошкоджених конструкцій (при руйнуванні 50% перерізу чи 50% площі робочої арматури), конструкція підсилення розраховується на повне діюче навантаження, при цьому несуча здатність конструкції що підсилюється, в розрахунку не враховується. 4. Розрахунок міцності ЗБЕ, підсиленних поперечним армуванням з початковим попереднім напруженням, слід виконувати як для звичайного армування, без врахування попереднього напруження.
<p>Розрахунок за нормальними перерізами за рекомендаціями СП 349.1325800.2017. Конструкції бетонні та залізобетонні. Правила ремонту та посилення.:</p> $M_{ult} = R_{b,red} b x (h_{0,red} - 0,5x) + R_{sc} A_{s,red} (h_{0,red} - a')$ <p>Розрахунок за похилими перерізами:</p> $Q < Q_b + Q_{sw}$ <p>по похилій сжатій смузі:</p> $Q < 0,3 R_b b h_0$ <p>$\gamma_{sp,ad} = 0,8$ – коефіцієнт умови роботи зтяжки.</p>
<p>Розрахунок за нормальними перерізами за пропозицією Zhou S., Sun J., Zeng Z., Jie Z.:</p> $M_u = M_c + M'_s + M_s + M_{sp1} + M_{sp2} + M_{sp3}$ <p>Розрахунок за похилими перерізами:</p> $V_u = V_{bo} + V_{b,sp}$

Продовження таблиці 1

<p>Передумови:</p> <p>1. У разі руйнування більше ніж 50% перерізу конструкцій або більше ніж 50% площі робочої арматури, конструкція підсилення розраховується на повне фактичне навантаження, при цьому несуча здатність конструкції що підсилюється, в розрахунку не враховується.</p>
<p>Залізобетонні конструкції що підлягають підсиленню, проектується згідно ДБН В.2.6-98 при підсиленні бетоном і залізобетоном і згідно ДБН В.2.6-198 – при підсиленні сталевим прокатом за ДСТУ Б В.3.1-2:2016. Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій та основ будівель і споруд [9].</p>
<p>Передумови:</p> <p>1. Розрахунок за граничними станами ведеться згідно до СНиП 2.03.01-84* як для позацентрово стиснутого елемента.</p> <p>2. Втрати попереднього напруження в затяжках визначаються по СНиП 2.03.01-84*, як для конструкції з натягом арматури на бетон, з урахуванням коефіцієнта γ_{fix}.</p> <p>3. У разі руйнування більше ніж 50% перерізу конструкцій або більше ніж 50% площі робочої арматури, конструкція підсилення розраховується на повне фактичне навантаження, при цьому несуча здатність конструкції що підсилюється, в розрахунку не враховується.</p>
<p>Розрахунок за нормальними перерізами за пропозицією Голишев А. Б.</p> $M=(M_1+M_2)-M_{dis}$ <p>Розрахунок за похилими перерізами:</p> $Q<Q_1+Q_2$ <p>$\gamma_{fix}=0.8$ – коефіцієнт умови роботи зтяжки.</p>

Джерело: розроблено авторами

В табл. 2 представлено порівняння експериментальних даних несучої здатності похилих перерізів підсиленних металевими обоймами залізобетонних балок (серія 4) з її розрахунковими значеннями, обчисленими за методикою Малиганова А. І., Плевкова, В. С., Полищука А. І. ($V_{uf}^{calc} 1$); Карпюк І.А, Даниленка Д.С., Карпюка В.М. ($V_{uf}^{calc} 2$); Егорова В.В., Алексашкина Е.Н., Медвеженкова С.В., Юферева М.В. ($V_{uf}^{calc} 3$); [7] ($V_{uf}^{calc} 4$); [11] ($V_{uf}^{calc} 5$); [3] ($V_{uf}^{calc} 6$); ; [10] ($V_{uf}^{calc} 7$).

В табл. 3 представлено порівняння експериментальних даних несучої здатності нормальних перерізів підсиленних металевими обоймами залізобетонних балок (серія 4) з її розрахунковими значеннями, обчисленими за методикою Малиганова А. І., Плевкова, В. С., Полищука А. І. ($M_{uf}^{calc} 1$); Карпюк І.А, Даниленка Д.С., Карпюка В.М. ($M_{uf}^{calc} 2$); Егорова В.В., Алексашкина Е.Н., Медвеженкова С.В., Юферева М.В. ($M_{uf}^{calc} 3$); [7] ($M_{uf}^{calc} 4$); [11] ($M_{uf}^{calc} 5$); [3] ($M_{uf}^{calc} 6$); [10] ($M_{uf}^{calc} 7$); [8] ($M_{uf}^{calc} 8$).

Таблиця 2 – Порівняння експериментальних даних несучої здатності похилих перерізів підсилених металевими обоймами залізобетонних балок (серія 4) з її розрахунковими значеннями, обчисленими за нормативними та авторськими методиками

№ посліп	План експерименту				Несуча здатність V_{uf} , kH, похилих перерізів							
	X_1	X_2	X_3	X_4	V_{uf}^{exp}	$V_{uf}^{calc}_1$	$V_{uf}^{calc}_2$	$V_{uf}^{calc}_3$	$V_{uf}^{calc}_4$	$V_{uf}^{calc}_5$	$V_{uf}^{calc}_6$	$V_{uf}^{calc}_7$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	+	+	+	+	110	97	-	147	164	115	102	176
2	+	+	+	-	115	97	-	147	164	115	102	176
3	+	+	-	+	110	97	-	128	167	121	86	147
4	+	+	-	-	115	97	-	128	167	121	86	147
5	+	-	+	+	95	97	-	86	113	78	81	121
6	+	-	+	-	100	97	-	86	113	78	81	121
7	+	-	-	+	95	97	-	78	117	83	65	101
8	+	-	-	-	100	97	-	78	117	83	65	101
9	-	+	+	+	200	201	-	241	171	262	153	329
10	-	+	+	-	190	201	-	241	171	262	153	329
11	-	+	-	+	200	201	-	234	171	262	136	306
12	-	+	-	-	190	201	-	234	171	262	136	306
13	-	-	+	+	140	127	-	146	109	105	132	227
14	-	-	+	-	140	127	-	146	109	105	132	227
15	-	-	-	+	140	127	-	146	109	105	116	204
16	-	-	-	-	140	127	-	146	109	105	116	204
17	+	0	0	0	110	97	-	114	142	100	84	141
18	-	0	0	0	190	176	-	199	157	187	134	273
19	0	+	0	0	150	146	-	165	232	184	107	206
20	0	-	0	0	130	146	-	100	178	127	86	145
21	0	0	+	0	145	146	-	143	213	151	107	197
22	0	0	-	0	145	146	-	133	198	158	90	162
23	0	0	0	+	145	146	-	138	219	161	98	183
24	0	0	0	-	145	146	-	138	219	161	98	183
25	0	0	0	0	145	146	-	138	219	161	98	183
$\sum (V - V_0)^2$					2574	-	12806	53814	26532	34947	1141	11
$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (V - V_0)^2}{24}}$					10,4	-	23,1	47,4	33,3	38,2	69,0	
$v = \left(\frac{\sigma}{b_0}\right) \cdot 100, \%$					7,0%	-	15,9%	32,6%	22,9%	26,3%	47,5	%

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3 – Порівняння експериментальних даних несучої здатності нормальних перерізів підсиленних металевими обоймами залізобетонних балок (серія 4) з її розрахунковими значеннями, обчисленими за нормативними та авторськими методиками

№ дослідж.	План експерименту				Несуча здатність M_{uf} , кНм, нормальних перерізів								
	X_1	X_2	X_3	X_4	M_{uf}^{exp}	M_{uf1}^{calc}	M_{uf2}^{calc}	M_{uf3}^{calc}	M_{uf4}^{calc}	M_{uf5}^{calc}	M_{uf6}^{calc}	M_{uf7}^{calc}	M_{uf8}^{calc}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	+	+	+	+	54,5	52,6	60,3	47,2	46,0	56,0	54,0	80,4	48,1
2	+	+	+	-	56,9	52,6	60,3	47,2	46,0	56,0	54,0	80,4	48,1
3	+	+	-	+	54,5	52,6	60,3	47,2	46,0	56,0	54,0	80,4	48,1
4	+	+	-	-	56,9	52,6	60,3	47,2	46,0	56,0	54,0	80,4	48,1
5	+	-	+	+	47,0	52,6	33,1	45,6	42,0	56,0	52,3	75,5	48,1
6	+	-	+	-	49,5	52,6	33,1	45,6	42,0	56,0	52,3	75,5	48,1
7	+	-	-	+	47,0	52,6	33,1	45,6	42,0	56,0	52,3	75,5	48,1
8	+	-	-	-	49,5	52,6	33,1	45,6	42,0	56,0	52,3	75,5	48,1
9	-	+	+	+	-	-	60,3	47,2	46,0	56,0	54,0	80,4	48,1
10	-	+	+	-	-	-	60,3	47,2	46,0	56,0	54,0	80,4	48,1
11	-	+	-	+	-	-	60,3	47,2	46,0	56,0	54,0	80,4	48,1
12	-	+	-	-	-	-	60,3	47,2	46,0	56,0	54,0	80,4	48,1
13	-	-	+	+	-	-	33,1	45,6	42,0	56,0	52,3	75,5	48,1
14	-	-	+	-	-	-	33,1	45,6	42,0	56,0	52,3	75,5	48,1
15	-	-	-	+	-	-	33,1	45,6	42,0	56,0	52,3	75,5	48,1
16	-	-	-	-	-	-	33,1	45,6	42,0	56,0	52,3	75,5	48,1
17	+	0	0	0	54,5	52,6	55,6	46,8	45,0	56,0	53,2	79,1	48,1
18	-	0	0	0	-	-	55,6	46,8	45,0	56,0	53,2	79,1	48,1
19	0	+	0	0	48,0	52,6	60,3	47,2	46,0	56,0	54,0	80,4	48,1
20	0	-	0	0	41,6	52,6	33,1	45,6	42,0	56,0	52,3	75,5	48,1
21	0	0	+	0	46,4	52,6	55,6	46,8	45,0	56,0	53,2	79,1	48,1
22	0	0	-	0	46,4	52,6	55,6	46,8	445,0	56,0	53,2	79,1	48,1
23	0	0	0	+	46,4	52,6	55,6	46,8	45,0	56,0	53,2	79,1	48,1
24	0	0	0	-	46,4	52,6	55,6	46,8	45,0	56,0	53,2	79,1	48,1
25	0	0	0	0	46,4	52,6	55,6	46,8	45,0	56,0	53,2	79,1	48,1
$\sum(\sigma - \sigma_0)^2$					459,4 кН ²	1657,3	404,4	647,5	982,6	471,2	13567	337,9	
$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\sigma - \sigma_0)^2}{24}}$					5,53 кН	8,31	4,10	5,19	6,39	4,43	23,78	3,75	
$\sigma = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) \cdot 100, \%$					11,2 %	15,7%	7,8%	9,8 %	12,1%	8,4%	45,0%	7,1 %	

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Всі існуючі нормативні та авторські методики передбачають розрахунок несучої здатності пошкоджених ЗБК за небезпечною похилою тріщиною при переважній дії поперечної сили, тобто ураховуються складові несучої здатності похилих перерізів по бетону над вершиною небезпечної похилої тріщини та хомутів і елементів зовнішнього підсилення. Що й показало порівняння, вплив передумов й розрахункових схем, існуючих нормативних та авторських методик, дає незадовільну збіжність. Дане питання потребує більш досконалого вивчення сутті проблеми.

Список літератури

1. He Z., Liu Z.. Stresses in external and internal unbonded tendons: unified methodology and design equations. *Journal of Structural Engineering*. 2010. №136. P. 1055–1065. https://www.researchgate.net/publication/245305693_Stresses_in_External_and_Internal_Unbonded_Tendons_Unified_Methodology_and_Design_Equations
2. Karpiuk V., Tselikova A., Khudobych A., Karpiuk I., Kostyuk A. Study of strength, deformability property and crack resistance of beams with BFRP. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2020. Vol. 4/7 (8), P.42-53. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/209378/211998>
3. D. Danilenko, M. Zaboloka, V. Karpiuk et al. Load-bearing capacity of damaged reinforced concrete span structures strengthened with prestressed metal casings. *Journal of Engineering Science*. 2020. №2. P. 106–127.
4. Naaman A., Alkhairi F. Stress at ultimate in unbonded post-tensioning tendons. Part 2. Proposed methodology. *ACI Structural Journal*. 1991. №88. P. 683–692. https://www.researchgate.net/publication/279543485_Stress_at_ultimate_in_unbonded_post-tensioning_tendons_Part_2_Proposed_methodology
5. Ozkul O., Nassif H., Tanchan P., Harajli M.. Rational approach for predicting stress in beams with unbonded. *ACI Structural Journal*. 2008. №105. P. 338–347. <https://scholarworks.aub.edu.lb/handle/10938/13903>
6. Zhou C., Sun J., Zeng Z., Jie Z. Studies on the RC beam strengthened by using the exterior-wrapping U-shaped steel plate and its application. *Advances in Civil Engineering*. 2019. №1. P. 1–9. <https://www.hindawi.com/journals/ace/2019/2396764/>
7. Вплив конструктивних чинників та факторів зовнішньої дії на несучу здатність балкових конструкцій при малоцикловому навантаженні / Карпюк В. М. та ін. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2016. №61. С. 130-136. <http://mx.ogasa.org.ua/handle/123456789/2440>
8. Деформативність пошкоджених залізобетонних балок, посилені металевими обоймами / Даниленко Д. С. та ін. *Актуальні проблеми інженерної механіки* : тези доп. VII Міжнар. наук.-практ. конф. / під заг. ред. М. Г. Сур'янінова. Одеса : ОДАБА, 2020. С. 81-84.
9. ДСТУ Б В.3.1-2:2016. Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій та основ будівель і споруд. [Чинний від 2017-04-01]. Київ : ДП “УкрНДНЦ”, 2016. 98 с. https://dnaop.com/html/62197/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_%D0%91_%D0%92.3.1-2_2016
10. Карпюк В. М., Даниленко Д. С., Карпюк І. А., Даниленко А. В. Напружено-деформований стан підсилені металеві обойми, залізобетонних балок за дії циклічного знакозмінного навантаження: тези доповідей 76 науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу академії 21-22 травня, 2020 р. Одеса : ОДАБА, 2020. С. 92.
11. Параметри тріщиностійкості балкових залізобетонних елементів при дії знакозмінного та знакопостійного циклічних навантажень / В. М. Карпюк, К. І. Албу, Д. С. Даниленко та ін. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2016. №62. С. 220–228.

References

1. He, Z. & Liu, Z. (2010). Stresses in external and internal unbonded tendons: unified methodology and design equations. *Journal of Structural Engineering*, No. 36, P.1055–1065. https://www.researchgate.net/publication/245305693_Stresses_in_External_and_Internal_Unbonded_Tendons_Unified_Methodology_and_Design_Equations [in English].
2. Karpiuk, V., Tselikova, A., Khudobych, A., Karpiuk, I. & Kostyuk A. (2020). Study of strength, deformability property and crack resistance of beams with BFRP. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, Vol. 4/7 (8), P. 42-53. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/209378/211998> [in English].
3. Danilenko, D., Zaboloka, M. & Karpiuk, V. et al. (2020). Load-bearing capacity of damaged reinforced concrete span structures strengthened with prestressed metal casings. *Journal of Engineering Science*, 2, 106–127 [in English].
4. Naaman, A. & Alkhairi, F. (1991). Stress at ultimate in unbonded post-tensioning tendons. Part 2. Proposed methodology. *ACI Structural Journal*, №88, P. 683-692. https://www.researchgate.net/publication/279543485_Stress_at_ultimate_in_unbonded_post-tensioning_tendons_Part_2_Proposed_methodology [in English].

5. Ozkul, O., Nassif, H., Tanchan, P. & Harajli M. (2008). Rational approach for predicting stress in beams with unbonded. *ACI Structural Journal*, №105, P. 338–347. <https://scholarworks.aub.edu.lb/handle/10938/13903> [in English].
6. Zhou, C., Sun, J., Zeng, Z. & Jie, Z. (2019). Studies on the RC beam strengthened by using the exterior-wrapping U-shaped steel plate and its application. *Advances in Civil Engineering*, №1, P. 1-9. <https://www.hindawi.com/journals/ace/2019/2396764/> [in English].
7. Karpiuk, V. M. et al. (2016). Vplyv konstruktyvnykh chynnykiv ta faktoriv zovnishn'oi dii na nesuchu zdatsnist' balkovykh konstruksij pry malotsyklovomu navantazheni [The influence of structural factors and factors of external action on the bearing capacity of beam structures under short-cycle loading] [V. M. Karpyuk, K. I. Albu, D. S. Danilenko et al.]. *Visnyk Odes'koi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury - Bulletin of the Odessa State Academy of Construction and Architecture*, 61, 130-136 <http://mx.ogasa.org.ua/handle/123456789/2440> [in Ukrainian].
8. Danylenko, D. S. et al. (2020). Deformatyvnyshchyna poshkodzhennykh zalizobetonnykh balok, posylenykh metalovymi obojmamy [Deformability of damaged reinforced concrete beams reinforced with metal clips]. Actual problems of engineering mechanics: VII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia – International scientific and practical conference (pp. 81-84). Odesa : ODABA [in Ukrainian].
9. Remont i pidsylennia nesuchykh i ohorodzhuval'nykh budivel'nykh konstruksij ta osnov budivel' i sporud [Repair and extension of load-bearing and enclosing building structures and foundations of buildings and structures]. (2016). *DSTU B V.3.1-2:2016 from 2017-04-01*. Kyiv : DP “UkrNDNTs” https://dnaop.com/html/62197/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_%D0%91_%D0%92.3.1-2_2016 [in Ukrainian].
10. Karpiuk, V. M., Danylenko, D. S., Karpiuk, I. A. & Danylenko, A. V. Napruzhenno-deformovanyj stan pidsylenykh metalevoiu obojmou, zalizobetonnykh balok za dii tsyklichnoho znakovminnoho navantazhenia [The stress-strain state of reinforced concrete beams reinforced with a metal bracket under the action of cyclic alternating load]. *76 naukovo-tekhnichnoi konferentsii profesors'ko-vykladats'koho skladu akademii (21-22 travnia, 2020 r.) -76 scientific and technical conference of the professorial staff of the academy (P. 92)*. Odesa : ODABA [in Ukrainian].
11. Karpiuk, V. M., Albu, K. I. & Danylenko, D. S. (2016). Parametry trishchynostijkosti balkovykh zalizobetonnykh elementiv pry dii znakovminnoho ta znakovpostijnoho tsyklichnykh navantazhen' [Parameters of crack resistance of beam-reinforced concrete elements under the action of alternating sign and constant sign cyclic loads]. *Visnyk Odes'koi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury – Bulletin of the Odessa State Academy of Construction and Architecture*, 62, 220–228 [in Ukrainian].

Iryna Karpiuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yevhenii Klymenko**, Prof., DSc.
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine

Denis Danilenko, Design Engineer, PhD tech. sci.
Construction company “STIKON”, Odesa, Ukraine

Mariia Karpiuk, Student, Department of Reinforced Concrete Structures and Transportation Structures
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine

Comparative analysis of the load-bearing capacity of experimental damaged reinforced concrete elements reinforced with metal clips

The paper presents research results and a comparative analysis of the load-bearing deformability and crack resistance of basalt concrete beams brought to the limit state (ULS) in previous tests. The beams were reinforced with prestressed metal clips under high-level static and low-cycle alternating loads.

The work performed comparative calculations of reinforced building structures using proprietary methods and existing regulatory methods. A comparison of the experimental and calculated values of the bearing capacity of damaged experimental beam samples showed their unsatisfactory convergence because the well-known regulatory and proprietary methods provide for the calculation of the bearing capacity of damaged reinforced concrete structures along a dangerous inclined crack under the predominant action of transverse force, i.e. the top of a dangerous inclined crack and clamps and vertical elements of external reinforcement. However, experimental and theoretical studies have shown that the destruction of prototype beams with large and medium shear spans under a variable low-cycle load occurs along dangerous inclined through cracks, from the overwhelming action of bending moments, in the longitudinal reinforcement elements of the frame, in the longitudinal tensile reinforcement, as well as transverse beam beams and yield stress cages. That is, the real physical picture of the operation of the system “damaged reinforced concrete

beam – prestressed metal reinforcement cage” under alternating transverse load at high levels differs significantly from the physical model of previously existing regulatory and proprietary methods. All existing regulatory and proprietary methods provide for the calculation of the bearing capacity of damaged reinforced concrete structures along a dangerous inclined crack under the predominant action of transverse force, that is, the components of the bearing capacity of inclined sections on concrete above the top of a dangerous inclined crack and clamps and external elements are taken into account.

Experimental and theoretical studies have shown that the destruction of prototype beams with large and medium shear spans, under alternating low-cycle loads, occurs along dangerous inclined through cracks from the overwhelming action of bending moments in the longitudinal tensile reinforcement, as well as in the transverse rods of the beam and the cage yield strength.

Damaged basalt concrete beams; reinforcement of supporting areas with carbon fiber shirts; reinforcement of the lower stretched zones with carbon plastic sheets; deformability of concrete, reinforcement and fiber-reinforced plastic; crack resistance of beams; experimental and statistical dependencies

Одержано (Received) 31.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 30.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

АГРОІНЖЕНЕРІЯ

УДК 631.348

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.116-125](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.116-125)**Б.Б. Левицький**, асп., **А.В. Бабій**, проф., д-р техн. наук*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна**e-mail: levyskyi.bb@gmail.com*

Аналіз конструктивних особливостей мініобприскувачів для невеликих фермерських господарств

У роботі проведено аналіз конструктивних особливостей основних типів мініобприскувачів: ранцевих, тачкових, навісних та причіпних. Вказано на їх особливості застосування та виділено недоліки, які спостерігаються при хімічних обробках ними невеликих площ просапних культур. Запропоновано концептуальне рішення щодо створення самохідного мініобприскувача. Він повинен переміщатися від власного двигуна, мати сервісний механізм зміни ширини колії, достатній кліренс, системи регулювання висоти встановлення та стабілізації штанги, системи нагнітання, регулювання та контролю робочого тиску в напірній магістралі. І всі ці рішення повинні бути реалізованими при мінімальній вартості такої машини, що зробить її конкурентною на ринку мініобприскувачів.

хімічний захист, обприскувач, штанга, стабілізація, колювання, опір переміщенню, робочий тиск, самохідний, підсобне господарство, ширина колії, кліренс, ресурс роботи, норма виливу

Постановка проблеми. Серед багатьох способів захисту рослин – хімічний захист залишається одним з найбільш ефективних та рентабельних. Це викликано тим, що вплив хімічних препаратів має досить швидку дію і результату можна добитися за відносно короткий проміжок часу. Попри ризики негативних наслідків дії хімічних препаратів альтернативи, яка була би доступною пересічному виробнику сільськогосподарської продукції, поки не запроваджено. Технологічна операція хімічного захисту рослин є практично у кожній технології вирощування культур. Але, разом з тим, якщо розглядати невеликі підсобні чи фермерські господарства, то із-за низького ресурсного забезпечення, спостерігається і низька культура виробництва. Це позначається на тому, що часто виробниками опускаються або мінімізуються окремі технологічні операції. Саме до таких і належить хімічний захист рослин.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. За статистичними даними [17] та результатами досліджень інших авторів [13] більше 90% картоплі виробляється у господарствах населення. Загалом, така площа станом на кінець 2022 року тільки по виробництву картоплі складає 1187,7 тис.га [17]. Також зрозумілим є те, що у підсобних господарствах вирощують й інші культури, тобто вказане значення площ є значно більшим. Приклад щодо виробництва картоплі наведено з тою метою, що у західному регіоні України у підсобних господарствах ця культура є однією з основних і вирощується практично у кожному домогосподарстві. Якщо проаналізувати розміри орних земельних ділянок, які є у приватній власності домогосподарств, то вони не перевищують приблизно 2 га. Тут не враховано розпайовані земельні наділи колишніх колгоспів, які, переважно, здані в оренду більш крупним виробникам сільськогосподарської продукції, де спостерігається високе ресурсне забезпечення виробництва та застосовуються і реалізуються передові технології. Тому найчастіше у підсобних господарствах спостерігаються площі під посадкою однієї культури,

наприклад, картоплі, в межах 0,1 га, 0,2 га, рідше – 0,3 га. Для таких невеликих площ недоцільно використовувати «великі» тракторні обприскувачі, та й не кожен виробник має трактор, щоб агрегатувати обприскувач, тому, переважно, використовують найпростіші ранцеві обприскувачі або іншого типу мініобприскувачі.

Дослідженню ефективності виконання технологічного процесу обприскувачами, міцності та ресурсу роботи їх складових присвячено багато праць вчених, які всебічно вивчають проблеми, що там виникають та пропонують ряд рішень для їх усунення [4, 5, 12, 15, 16, 18].

Постановка завдання. Метою проведеного дослідження є виконання аналізу конструктивних особливостей та ефективності роботи різних типів мініобприскувачів на невеликих площах просапних культур та формування критеріїв, за якими повинен бути спроектований новий самохідний мініобприскувач зі системою стабілізації штанги.

Виклад основного матеріалу. Аналіз конструктивних особливостей мініобприскувачів розпочнемо з найпростіших – ранцевих.

Серед багатьох конструкцій, що є у пропозиції на ринку, розглянемо на прикладі двох типових моделей таких обприскувачів, рис. 1.



Рисунок 1 – Ранцеві обприскувачі

Джерело: [19, 11]

На рис. 1, а показано ранцевий обприскувач українського виробника – торгової марки «Леміра» [19]. Це 12-ти літровий резервуар, який має власну (суху) масу 3,5 кг. Ручним насосом нагнітають робочий тиск повітря до 0,3 МПа, яким витісняють робочу рідину і вона через штангу та розпилюючий пристрій транспортується на оброблювану поверхню.

На рис. 1, б представлено ранцевий акумуляторний обприскувач FERMER OCA-16 польського виробника «Фермер» [11]. Такий обприскувача має ємність бака 16 л. Робочий тиск 0,15–0,45 МПа в напірній магістралі нагнітається діафрагмовим насосом, який живиться від свинцево-кислотного акумулятора. Власна маса обприскувача складає 5,5 кг.

Наведені ранцеві обприскувачі можна використовувати для хімічного захисту рослин на невеликих ділянках (городах), у садах, для дезінфекції приміщень тощо. Це прості та надійні знаряддя. Але поряд з тим, їх використання на площах в межах 0,2 га, про які мова йшла вище, має певні недоліки. Наприклад, обприскувач на рис. 1, а заправленим буде мати масу приблизно 15,5 кг і для обробки 0,2 га, наприклад, картоплі, потребуватиме мінімум 4-5 заправок при нормі виливу приблизно 250 л/га. Меншої витрати робочої рідини важко досягнути при роботі з таким знаряддям,

оскільки виробники хімічних препаратів вказують на упаковках «2 мл на 10 л води на 3-4 сотих» і т.д. Крім того, якщо піти шляхом збільшення концентрації розчину для зменшення об'єму вилитої рідини, то потрібно збільшити швидкість обробки. Це, в свою чергу, провокує нерівномірність обробки та значно підвищує втому людини, що здійснює цю обробку. Тут потрібно зважити на те, що, крім швидко рухатись людині у міжряддях культури, їй потрібно переміщати масу 15,5 кг на спині, періодично (для інших подібних конструкцій обприскувачів) чи постійно підкачувати ручним насосом, заправляти – це все провокує втому оператора.

Питання підтримки тиску у напірній магістралі вирішено в акумуляторному обприскувачі, що на рис. 1, б. Але його конструкція складніша, він дорожчий, а саме основне – він значно важчий. Його маса при повній заправці становитиме 21,5 кг і переміщатись полем, обробляючи певну культуру, не кожному буде просто. Тут не є метою вказати на недоліки розглянутих конструкцій обприскувачів. Виробники представили на ринок достатньо оптимальні конструкції таких знарядь, вони мають свою високу ефективність у певному секторі використання, за вартістю доступні широкому загалу виробників сільськогосподарської продукції, але потребують значної затрати ручної праці, особливо на площах більше 0,1 га. Тому їх використання у технологічних процесах вирощування культур може бути поштовхом до зменшення кількості хімічних обробок культури внаслідок високої трудомісткості процесу, зниження якості обробки, особливо це позначається на площах, де потрібне суцільне внесення робочого препарату тощо. Тому, займаючись виробництвом сільськогосподарської продукції на описаних площах, потрібно шукати альтернативу ранцевим обприскувачам.

Зменшуючи питому частку ручної праці при виконанні хімічного захисту, виробники сільськогосподарських машин дрібним фермерам пропонують варіант тачкових (візкових) обприскувачів. Тут маса обприскувача та заправленої робочої рідини перенесена на його шасі-візок і це частково вирішує загострену проблему.

Серед множини таких машин, наведемо кілька варіантів сучасних машин, які є у пропозиції на ринку, рис. 2.



Рисунок 2 – Електричний (акумуляторний) обприскувач на колесах 80 л Stocker 303 (а) та обприскувач MasterCut OS60T/25 (б)

Джерело: [9, 7]

Італійський виробник Stocker пропонує електричний (акумуляторний) обприскувач на колесах 80 л Stocker 303, рис. 2 [9].

Цей мініобприскувач має міцне шасі тачкового типу, на якому змонтовано 80 л пластиковий бак. Напір робочої рідини створюється електричним насосом потужністю 100 Вт та може досягати тиску від 0,1 МПа до 1,0 МПа при витраті 1,5-6 л/хв. Довжина

шланга 50 м, максимальна відстань розпилення до 8 м. Маса незаправленого обприскувача 62 кг, рис. 2, а.

В іншому варіанті цей обприскувач обладнується навісною штангою, ширина якої регулюється від 1,5 м до 2,5 м, що дозволяє забезпечити максимальну ширину обробки до 3,5 м. При використанні змінного причіпного дишла його можна агрегатувати мініенергозасобами.

Такі обприскувачі використовують у садах, теплицях та невеликих ділянках для обприскування сільськогосподарських культур та інших господарських роботах.

На рис. 2, б наведено модель тачкового обприскувача MasterCut OS60T/25 німецько-китайського виробництва [7].

Подібно до попередньої моделі, обприскувач MasterCut OS60T/25 обладнаний 60-ти літровим баком, замість простої підставки має керовані опорні колеса, що дозволяє легше переміщати його по ділянках з твердим покриттям. Головною відмінністю є те, що такий обприскувач обладнаний двигуном внутрішнього згоряння, який приводить в дію поршневий насос, що може створювати тиск робочої рідини у напірній магістралі до 2,5 МПа при продуктивності 6-8 л/хв. Він обладнаний шлангом штанги довжиною 25 м. Маса обприскувача складає 30 кг. Такий мініобприскувач можна використовувати у садах, теплицях, інших ділянках, де не буде утруднене його переміщення.

Обприскувачі, що наведені на рис. 2, це вже більш професійні машини у порівнянні з ранцевим, вони не перекладають свою масу на плечі оператору, у прямому сенсі, але їх використання для обробки польових культур є дещо обмеженим. Такі машини доволі проблематично пересувати на підйом навіть по твердій поверхні, а із-за малого діаметра коліс і як наслідок – великого опору перекочуванню, вони нездатні рухатись по розпушеній поверхні поля. Крім того, якщо такі обприскувачі використовувати для обробки просапних культур, то тут виникають нові проблеми – малий кліренс та фіксована ширина колії, що не завжди співпадає з кратністю ширини міжрядь. Тобто їх ефективність доведена при роботі у садах, теплицях, при дезінфекції у складських приміщеннях тощо.

Аналізуючи далі інші конструкції, цю проблему частково вирішують мініобприскувачі причіпні чи навісні на мініенергозасоби, рис. 3. Найбільш популярними є навісні обприскувачі. На рис. 3, а представлено обприскувач на мототрактор [10].



а)



б)

Рисунок 3 – Обприскувач на мототрактор 130 літрів (Агрокрам) (а) та обприскувач для мінітрактора 80 л (Agrofast) (б)

Джерело: [10, 1]

Це компактний навісний обприскувач, що має ширину штанги 4 м, на якій встановлено 8 розпилюючих пристроїв, рис. 3, а. Бак місткістю 130 л з робочою

рідиною живить напірну магістраль за допомогою двох мембранних електронасосів прямої подачі на розпилювачі. Штанга має можливість регулювання за висотою та переводу з робочого у транспортне положення. Суха маса обприскувача – 25 кг. Агрегатується з енергозасобами малої потужності при наявності у них системи навіски. Заявлена виробником продуктивність – 1 га/год.

Інша система нагнітання робочого тиску в напірній магістралі використана на обприскувачі української фірми Agrofast (рис. 3, б) – це витіснення робочої рідини з використанням надлишкового тиску, що створюється компресором [1].

В якості резервуара тут використано бак 80 л від гідроаккумулятора насосної установки, де робочий тиск допускається до 0,8 МПа. Електричний компресор Ураган продуктивністю 35 л/хв створює надлишковий тиск, що витискає робочу рідину через вісім розпилювачів, що встановлені на штанзі. Ширина захоплення, при врахуванні кута розпилення розпилювачами, складає 5,5 м. Сама штанга по висоті може на рамі фіксуватися у кількох положеннях. Перевід у транспортне положення здійснюється за допомогою часткового розбирання секцій та фіксування їх у спеціальному консольному тримачі.

Якщо аналізувати ці дві моделі обприскувачів (рис. 3), то вони дуже подібні між собою, відрізняються тільки системами витіснення рідини. За такого конструктивного виконання ці навісні обприскувачі будуть добре працювати при обприскуванні польових культур, але тільки за певних умов.

Тут, зі зростанням технологічного рівня машини, більш прискіпливо ставимося до забезпечення нею агротехнічних вимог при обприскуванні.

Найперше, це норма внесення робочого препарату на оброблювану площу. Щоб забезпечити задану норму внесення потрібно правильно узгодити тиск в напірній магістралі з витратою через визначене число розпилювачів та швидкістю руху агрегату. Викликає сумнів чітке забезпечення заданої норми виліву, оскільки тиск в напірній магістралі не підтримується сталим – в наведених конструкціях відсутні будь-які регулятори тиску. Задану швидкість руху важко підтримувати на різних енергозасобах, оскільки не всі мототрактори, а тим більше мотоблоки з адаптерами, мають спідометри чи тахометри. При роботі у міжряддях різних просапних культур ширина колії трактора не співпадає з міжряддями культури або важко її змінити, виникають проблеми при обробці відносно високорослих культур (наприклад обробка картоплі до чи після фази цвітіння) із-за малого кліренсу енергозасобу тощо. Крім того, жорстке закріплення штанги на рамі обприскувача не сприяє її стабілізації при русі енергозасобу польовими нерівностями. За таких умов динамічно змінюється відстань до об'єкту обробки, а від того і норма внесення, а також це має суттєвий вплив на ресурс роботи каркасів і рами самого обприскувача [2, 3, 6, 14].

Що стосується причіпних обприскувачів, ринок таких машин має значно менше пропозицій, але розглянемо деякі конструкції, рис. 4.

На рис. 4, а представлений обприскувач для мотоблока і мототрактора українського виробника ПП Крючков [8].

Даний причіпний обприскувач приєднується до мотоблока з допомогою адаптера. Випускається у трьох варіантах об'ємів баків: 85 л, 150 л та 250 л. Робочий тиск 0,25-0,30 МПа нагнітається за допомогою мотопомпи або відцентрового насоса. Такі обприскувачі мають можливість регулювання висоти і ширини колії (мінімальна ширина – 0,8 м), а також регулювання висоти встановлення штанги, на якій змонтовано 8 розпилювачів, що дозволяє забезпечити ширину захоплення до 3,5 м. Маса обприскувача з порожнім баком (без насоса) – 39 кг.



Рисунок 4 – Обприскувач для мотоблока і мототрактора (ПП Крючков) (а)
та обприскувач причіпний до мінітрактора NorthStar (79 л)(б)

Джерело: [8, 20]

Іншим прикладом може слугувати обприскувач причіпний до мінітрактора NorthStar (79 л) (США), рис. 4, б [20].

Даний обприскувач може використовуватися у різних варіантах застосування розпилюючих пристроїв – навісної штанги з шістьма розпилювачами або ручної штанги. Він призначений, в основному, для роботи у садах, можна ним обробляти газони, інші подібні ділянки. Напір робочої рідини до 0,48 МПа створюється електричним насосом (12 В), що має продуктивність 8,3 л/хв. Загальна маса незаправленого обприскувача складає 27,2 кг.

Таким чином, наведені причіпні обприскувачі (рис. 4) мають свої переваги та недоліки. Наприклад, причіпний обприскувач ПП Крючков (рис. 4, а) має достатньо великий кліренс та можливість зміни ширини колії, але в агрегаті із мотоблоком його функціональні можливості обмежені. Це обмеження пов'язане з тим, що мотоблок немає такого кліренсу та можливості легко змінювати ширину колії, наприклад, при переїзді на іншу площу. Крім того, в обприскувачі відсутня система стабілізації штанги, що сприяє її значним коливанням, які збурюються колесами обприскувача і це погіршує якість нанесення робочого препарату на поверхні рослин. Витрата робочої рідини залежить від тиску, що створюється електричним мембранним насосом, але значення цього тиску невизначене та неконтрольоване, що також негативно може впливати на дотримання норми виливу отрутохімікатів.

В конструкції обприскувача причіпного до мінітрактора NorthStar, рис. 4, б вже передбачено регулювання та контроль тиску, що створюється в напірній магістралі, але теж відсутнє стабілізування штанги, не регулюється ні кліренс, ні ширина колії, що значно обмежує його використання для хімічного захисту польових культур.

Підсумовуючи проведений аналіз конструктивних особливостей наведених мініобприскувачів, робимо наступні висновки.

Висновки. Для окреслених площ обробки польових культур (в межах 0,2 га) ранцеві обприскувачі потребують значної затрати фізичної праці оператора: на переміщення маси обприскувача з робочою рідиною, підкачування ручним насосом

(для варіанту без електричного насоса), часті заправки. Крім того, ручне переміщення штанги не може гарантувати рівномірності нанесення робочого препарату на всю площу, особливо при суцільному внесенні.

Маса тачкових обприскувачів перенесена на їх шасі, але оператор повинен штовхати її для переміщення. Якщо говорити про міжряддя рослин, то у пухкому ґрунті утворюється колія, що значно утруднює переміщення такого обприскувача. До того ж малий кліренс та нерегульована колія не дозволяють рух міжряддями просапних культур. У варіанті використання навісної штанги – важко витримати постійною швидкість переміщення, якщо обприскувач рухати вручну, а при використанні мініенергозасобу виникають ті ж проблеми – малий кліренс енергозасобу, нездатність регулювати ширину колії. Також відсутня система стабілізації штанги.

Навісні обприскувачі в більшій мірі залежать від параметрів шасі енергозасобу. Тут переважно виникають ті ж проблеми – обмежені регулювання ширини колії та фіксований кліренс, що звужує їх використання у певних фазах розвитку рослин, коли вже дорожнього просвіту енергозасобу недостатньо, щоб не пошкоджувати рослини при обробці. Крім того, відсутність системи стабілізації штанги призводить до її коливань, які передаються від коліс енергозасобу при русі польовими нерівностями. І це має значний вплив на рівномірність внесення робочого препарату та ресурс роботи складових обприскувача.

Щодо причіпних мініобприскувачів, то в їх конструкціях можна усунути ряд описаних недоліків, але їх функціональність в значній мірі є обмеженою параметрами енергозасобів, з яким вони агрегуються. Для підвищення ефективності нанесення робочого препарату на оброблювані площі слід використовувати хоча б найпростіші маятникові підвіски для стабілізації штанги.

З метою підвищення якості нанесення робочого препарату на оброблювані поверхні, універсального використання щодо обробки різних сільськогосподарських культур, в тому числі робота у садах, зменшення ручної праці оператора тощо, варто розробити самохідний малогабаритний обприскувач, аналогів якому на ринку України не спостерігається.

До розробленої конструкції висуваються наступні вимоги:

- самопересувний (з допомогою двигуна);
- можливість змінювати ширину колії за допомогою сервісних механізмів;
- мати достатній кліренс або його регулювати;
- навісна штанга повинна мати систему стабілізації та регулюватися за висотою встановлення;
- в напірній магістралі повинен підтримуватися постійний і контрольований тиск робочої рідини;
- розроблена модель самохідного обприскувача повинна бути доступною за вартістю для середньостатистичного виробника сільськогосподарської продукції у підсобному господарстві.

При врахуванні цих вимог та реалізації конструкції обприскувача на практиці ми отримаємо високоефективну та конкурентоздатну машину на ринку мініобприскувачів.

Список літератури

1. Agrofast. Обприскувач для мінітрактора 80 л. URL : <https://agrofast.com.ua/p/1542892189-opryskivatel-dlya-minitraktora-80-l/>.
2. Andreikiv O.E., Babii A.V., Dolinska I. Ya. & Matviiv Yu. Ya. Determination of the Residual Life of the Spraying Boom of a Field Sprinkler in the Maneuvering Loading Mode. *Materials Science*. 2020. Vol. 56, No. 1, P. 112–118.
3. Andreikiv O.E., Babii A.V. & Dolinska, I.Ya. Influence of the Working Media and Maneuvering Loading Mode on the Service Life of Spraying Booms of Field Sprinklers. *Materials Science*. 2020. Vol.

56. P.166–173.
4. Babii A. Parameters investigation for independent pendular suspension of sprayer boom. *Scientific Journal of TNTU*. 2019. Vol. 96. No. 4. P. 90–100.
 5. Babii A. Study of the efficiency of working mixture application in chemical crop protection. *Scientific Journal of TNTU*. 2020. Vol. 98. No. 2. P. 99–109.
 6. Babii A., Aulin V., Babii M., Levytskyi B. Investigation of the working capacity of the operating body suspension functional-transporting machine. *Scientific Journal of TNTU*. 2022. Vol 105, no 1, pp. 5–12.
 7. Gurkit. Обприскувач MasterCut OS60T/25. URL : <https://gurkit.ua/ua/product/31573/opryskivatel-mastercut-os60t25.html>.
 8. Kruchkov. Обприскувач для мотоблока і мототрактора. URL : <https://kruchkov.com.ua/obpriskuvachi/>.
 9. NiceGarden. Електричний (акумуляторний) обприскувач на колесах 80 л Штокер / Stocker 303. URL : <https://nicedgarden.com.ua/ua/elektricheskij-akkumulyatornyj-opryskivatel-na-kolesah-80-l>.
 10. Агрокрам. Обприскувач на мототрактор 130 л. URL : <https://agrokram.com.ua/opryskivatel-mototraktor-130-l>.
 11. Акумуляторний обприскувач FERMER OCA-16. URL : <https://tehno-haos.com.ua/ua/p870437397-akkumulyatornyj-opryskivatel-fermer.html>.
 12. Бабій А.В. Методика розрахунку напружено-деформівного стану обичайки бака обприскувача. *Технічний сервіс АПК, техніка та технології у с.г. машинобудуванні. Вісник ХДТУСГ*. 2006. Вип. 46. С. 96–100.
 13. Бабій А.В., Головецький І.В., Гладь Ю.Б. Дослідження кінематичних параметрів вібраційного лемеша картоплекопача з використанням комп'ютерної програми. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. "Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин"*. 2023. Вип.53. С.227-236.
 14. Бабій А.В., Дзюра В.О., Головецький І.В. Дослідження впливу вертикальних коливань штанги обприскувача на рівномірність обприскування. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 5(36), ч. I. С. 216-226.
 15. Бутитер І.Б., Вікович І.А., Когут І.С. Рациональне проектування крайніх секцій широкозахватних штанг обприскувачів із композиційних матеріалів. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. 2006. № 560. С. 35–40.
 16. Вікович І.А. Конструкції і динаміка штангових обприскувачів: монографія. Львів : «Львівська політехніка», 2003. 460 с.
 17. Державна служба статистики України. URL : Площі, валові збори та урожайність сільськогосподарських культур за їх видами та по регіонах (ukrstat.gov.ua).
 18. Мельник В.І., Сировицький К.Г., Шуляк М.Л., Панкова О.В. Методика проведення експериментальних досліджень технічного стану щілинних гідравлічних розпилювачів самохідних обприскувачів. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія Автомобіле- та тракторобудування*. 2021. №1. С.60-66.
 19. Обприскувач ОГ-101 Леміра ранцевий 12 л. URL : https://lemira.ua/catalog/opryskivatel_gidravlicheskie/88.htm.
 20. Обприскувач причіпний до мінітрактора NorthStar (79 л). URL : <http://tinyurl.com/ys3qwqo6>.

References

1. Agrofast. Obpryskuvach dlia minitraktora 80 l. [Sprayer for mini tractor 80 l] Retrieved from URL : <https://agrofast.com.ua/p/1542892189-opryskivatel-dlya-minitraktora-80-l/> [in Ukrainian].
2. Andreikiv, O.E., Babii, A.V., Dolinska, I. Ya. & Matviiv, Yu. Ya. (2020). Determination of the Residual Life of the Spraying Boom of a Field Sprinkler in the Maneuvering Loading Mode. *Materials Science, Vol. 56, No. 1*, P. 112–118 [in English].
3. Andreikiv, O.E., Babii, A.V. & Dolinska, I.Ya. (2020). Influence of the Working Media and Maneuvering Loading Mode on the Service Life of Spraying Booms of Field Sprinklers. *Materials Science, Vol. 56*, P. 166–173 [in English].
4. Babii, A. (2019). Parameters investigation for independent pendular suspension of sprayer boom. *Scientific Journal of TNTU, Vol. 96, No. 4*, P. 90-100 [in English].
5. Babii, A. (2020). Study of the efficiency of working mixture application in chemical crop protection. *Scientific Journal of TNTU, Vol. 98, No. 2*, P. 99–109 [in English].
6. Babii, A., Aulin, V., Babii, M. & Levytskyi, B. (2022) Investigation of the working capacity of the operating body suspension functional-transporting machine. *Scientific Journal of TNTU, Vol 105, No. 1*, P. 5–12 [in English].
7. Gurkit. Obpryskuvach MasterCut OS60T/25 [Sprayer MasterCut OS60T/25]. Retrieved from URL : <https://gurkit.ua/ua/product/31573/opryskivatel-mastercut-os60t25.html> [in Ukrainian].

8. Kruchkov. Obpryskuvach dlia motobloka i mototraktora [Sprayer for walk-behind tractor and walk-behind tractor]. Retrieved from URL : <https://kruchkov.com.ua/obpriskuvachi/> [in Ukrainian].
9. NiceGarden. Elektrychnyj (akumuliatornyj) obpryskuvach na kolesakh 80 l Shtoker / Stocker 303 [Electric (battery) sprayer on wheels 80 l Stocker / Stocker 303]. Retrieved from URL : <https://nicegarden.com.ua/ua/elektricheskij-akkumulyatornyj-opryskivatel-na-kolesah-80-l> [in Ukrainian].
10. Ahrokram. Obpryskuvach na mototraktor 130 l. [Sprayer for motor tractor 130 l.] Retrieved from URL : <https://agrokram.com.ua/opryskivatel-mototraktor-130-l> [in Ukrainian].
11. Akumuliatornyj obpryskuvach FERMER OSA-16 [Accumulator sprayer FERMER OSA-16] Retrieved from URL : <https://tehno-haos.com.ua/ua/p870437397-akkumulyatornyj-opryskivatel-fermer.html> [in Ukrainian].
12. Babij, A.V. (2006). Metodyka rozrakhunku napruzhenno-deformivnoho stanu obychnyjky baka obpryskuvacha [Procedure for calculation of stress-strain state of sprayer tank shell]. *Tekhnichnyj servis APK, tekhnika ta tekhnologii u s.h. mashynobuduvanni. Visnyk KhDTUSH - Technical service of agro-industrial complex, machinery and technologies in the city of mechanical engineering Bulletin of the KhDTUSH*, 46, 96-100 [in Ukrainian].
13. Babij, A.V., Holovets'kyj, I.V. & Hlad'o, Yu.B. (2023). Doslidzhennia kinematychnykh parametriv vibratsijnoho lemeshha kartoplekopacha z vykorystanniam komp'uternoji prohramy [Investigation of kinematic parameters of vibratory ploughshare of potato digger using computer program]. *Zahal'noderzhavnyj mizhvidomchyj naukovo-tekhnichnyj zbirnyk. "Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil'skohospodars'kykh mashyn" - All-state interdepartmental scientific and technical collection. "Design, production and operation of agricultural machines"*, 53, 227-236 [in Ukrainian].
14. Babij, A.V., Dziura, V.O. & Holovetskyi, I.V. (2022). Doslidzhennia vplyvu vertykal'nykh kolyvan' shtanhy obpryskuvacha na rivnomirmist' obpryskuvannia [Study of the effect of vertical vibrations of the sprayer on the uniformity of spraying]. *Tsentr'al'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky - Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*, 5(36), 1, 216-226 [in Ukrainian].
15. Butyter, I.B., Vikovych, I.A. & Kohut I.S. (2006). Ratsional'ne proektuvannia krajnykh sekcij shyrokozakhvatnykh shtanh obpryskuvachiv iz kompozytsijnykh materialiv [Rational design of extreme sections of wide-cut rods of sprayers made of composite materials]. *Visnyk Natsional'noho universytetu "Lviv'ska politekhnika" - Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic"*, 560, 35-40 [in Ukrainian].
16. Vikovych, I.A. (2003). *Konstruksii i dynamika shtanhovykh obpryskuvachiv [Designs and dynamics of boom sprayers]*. Lviv : «Lviv'ska politekhnika» [in Ukrainian].
17. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy [State Statistics Service of Ukraine]. Ploschi, valovi zbory ta urozhajnist' sil'skohospodars'kykh kul'tur za ikh vydamy ta po rehionakh (ukrstat.gov.ua) [in Ukrainian].
18. Mel'nyk, V.I., Syrovyts'kyj, K.H., Shuliak, M.L. & Pankova, O.V. (2021). Metodyka provedennia eksperymental'nykh doslidzhen' tekhnichnoho stanu schilnynykh hidravlichnykh rozpyliuvachiv samokhidnykh obpryskuvachiv [Procedure for conducting experimental studies of the technical condition of slit hydraulic sprayers of self-propelled sprayers]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya Avtomobileta traktorobuduvannia - Bulletin of NTU "KhPI". Series of automobile and tractor construction*, 1, 60-66 [in Ukrainian].
19. Obpryskuvach OH-101 Lemira rantsevyj 12 l [Sprayer OG-101 Lemira knapsack 12 l]. Retrieved from URL : https://lemira.ua/catalog/opryskivатели_gidravlicheskie/88.htm [in Ukrainian].
20. Obpryskuvach prychipnyj do minitraktora NorthStar (79) [NorthStar mini tractor-mounted sprayer (79 l)]. Retrieved from URL : <http://tinyurl.com/ys3qwqo6> [in Ukrainian].

Bohdan Levytskyi, post-graduate, **Andrii Babii**, Prof., DSc.

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

Analysis of design features of mini sprayers for small farms

The purpose of the study is to perform an analysis of the design characteristics and efficiency of various types of mini-sprayers in small areas of row crops and to form criteria by which a new self-propelled mini-sprayer with a rod stabilization system should be designed.

An analysis of the efficiency of various types of mini-sprayers in small areas used for planting various crops in small farms was carried out. For the outlined areas of treatment of field crops (within 0.2 hectares), it was established that knapsack sprayers require a significant amount of physical labor of the operator: to move the mass of the sprayer with the working fluid, pumping with a manual pump (for the option without an electric pump), frequent refueling. In addition, manual movement of the rod cannot guarantee the uniformity of application of the working preparation over the entire area, especially with continuous application.

For wheelbarrow sprayers, it is established that their mass is transferred to the chassis, but the operator must push it to move. If we talk about the inter-row of plants, then a furrow is formed in the loose soil, which greatly complicates the movement of such a sprayer. In addition, small ground clearance and unregulated furrow do not allow movement by inter-rows of row crops. In the option of using a hinged rod, it is difficult to maintain

a constant speed of movement if the sprayer is moved manually. When using the mini energy tool, the same issues arise – a small clearance of the energy tool and the inability to adjust the furrow width. There is also no rod stabilization system.

Hinged sprayers are more dependent on the parameters of the power supply chassis. Here, mainly, the same problems arise – limited adjustment of furrow width and fixed clearance, which narrows their use in certain phases of plant growth, when the ground clearance of the energy source is insufficient to avoid damaging plants during processing. In addition, the absence of a rod stabilization system can be seen. This leads to its oscillations, which are transmitted from the wheels of the energy store when moving by field irregularities, and this has an effect on the uniformity of the introduction of the operating solution and the resource of work.

Regarding trailed mini-sprayers, it is possible to eliminate some of the described drawbacks in their designs, but their functionality is significantly limited by the parameters of the energy tools with which they are aggregated. To increase the efficiency of applying the operating solution to the treated areas, at least the simplest pendulum suspensions should be used to stabilize the rod.

In order to improve the quality of application of the operating solution on the treated surfaces, universal use for processing various crops, including work in gardens, reducing the manual labor of the operator, etc., it is necessary to develop a self-propelled small-sized sprayer, analogues of which are not observed on the Ukrainian market.

The following requirements are put forward to the developed design: self-moving (using an engine); the ability to change the furrow width using service mechanisms; have sufficient clearance or regulate it; the hinged rod must have a stabilization system and be adjustable in height of the installation; the pressure line must maintain a constant and controlled pressure of the operating solution; the developed model of a self-propelled sprayer should be affordable for the average agricultural producer in the subsistence farming.

Taking into account these requirements and the implementation of the sprayer design in practice, we will get a highly efficient and competitive machine in the mini sprayer market.

chemical protection, sprayer, rod, stabilization, oscillation, resistance to movement, working pressure, self-propelled, subsistence farming, furrow width, clearance, operating life, spraying rate.

Одержано (Received) 26.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 22.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 656.13

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.125-133](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.125-133)

А.М. Пугач, проф., д-р. держ. упр., канд. техн. наук

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

e-mail: apugach13@gmail.com

В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,

Україна e-mail: AulinVV@gmail.com

В.І. Мельниченко, доц., канд. техн. наук, **О.Д. Деркач**, доц., канд. техн. наук

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

В.О. Тесля, канд. техн. наук

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

e-mail: volodymyr_teslya@ukr.net

Способи підвищення показників дизелів тракторів і автомобілів в умовах рядової експлуатації

Наводяться результати порівняльного аналізу способів підвищення показників дизелів тракторів і автомобілів вітчизняного і зарубіжного виробництва, які знаходяться в умовах рядової експлуатації підприємств України різної форми власності. Проаналізовано зміни показників паливної економічності

© А.М. Пугач, В.В. Аулін, В.І. Мельниченко, О.Д. Деркач, В.О. Тесля 2023

та екологічні показники дизелів тракторів і машинно-тракторних агрегатів. В якості прикладу розглянуто роботу паливного насосу високого тиску НД-22/6Б4, дизеля СМД-62 і трактора Т-150К. Дослідження та спостереження за технікою проводили протягом тривалого періоду. Наведено історичний аспект розвитку даної тематики щоб показати динаміку й зосередити увагу на більш ефективних способах підвищення показників тракторів і автомобілів в рядовій умові експлуатації й їх застосування. Розглянуто зазначені питання про аналізи конструкції і функціонуванні сучасних тракторів іноземного виробництва. **дизель, паливний насос високого тиску, регулятор, паливна економічність, димність відпрацьованих газів, дослідний універсальний регулятор, обмежувач димлення, від'ємний коректор**

Постановка проблеми. Ефективність агропромислового виробництва (АПВ) в Україні залежить передусім від технічного рівня та якості мобільних машин, які експлуатуються на сільськогосподарських підприємствах. Розвиток показників конструкції та експлуатації тракторів, автомобілів, комбайнів та ін. сільськогосподарської техніки має бути спрямований на значне підвищення продуктивності машин і агрегатів, їх якості та розширення діапазону виконуваних робіт. Все це обумовлює зростання енергонасиченості техніки у АПВ, збільшення навантаження та ускладнення деталей, вузлів, систем і агрегатів мобільних машин, знижується рівень їх надійності.

АПВ використовує як вітчизняну, так і імпортовану техніку фірм "Клаас", "Джон Дір", "Мерседес-Бенц", "Кейс" та ін. На підприємствах АПВ наявно і багато застарілої техніки, яка потребує значних витрат на технічне обслуговування і ремонт. Через низькі показники дизелів тракторів і автомобілів подовжуються агротехнічні строки виконання сільськогосподарських робіт, виникають втрати врожаю. Тому актуальним є виявлення способів підвищення їх показників в умовах рядової експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В умовах рядової експлуатації показники роботи дизелів тракторів та автомобілів залежать від багатьох факторів [12]. З 1980 року на кафедрі "Тракторів і автомобілів" Дніпропетровського сільськогосподарського інституту (ДСГІ), а з вересня 2018 року – на кафедрі "Тракторів і сільськогосподарських машин" Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ) проводяться дослідження по визначенню впливу характеристик паливних насосів високого тиску (ПНВТ) на екологічні, паливні і потужнісні показники дизелів, тракторів і автомобілів [1...5]. Співробітники кафедри були співавторами і виконавцями ряду робіт, які виконувались в різних організаціях: Центральноукраїнський національний технічний університет [10,11], Національний транспортний університет [6...8, 3]. Завідувач кафедри д-р. техн. наук, професор Головчук А.Ф. був науковим керівником аспірантів різних ЗВО України (1984-1998 рр.). При розгляді даної теми враховувались результати робіт інших дослідників, наприклад, аспіранта КАДІ Каньковського І.С. (науковий керівник д-р. техн. наук, професор Долганов К.Є.) [9]. Посилання на такі дослідження приведені в роботах [1...8].

Постановка завдання. Метою даної роботи є виявлення способів підвищення показників дизелів тракторів і автомобілів в умовах рядової експлуатації в господарства агропромислового виробництва на основі результатів аналізу їх конструктивних і експлуатаційних характеристик.

Виклад основного матеріалу. Виробники сільськогосподарської техніки, в тому числі тракторів і автомобілів, пропонують замовникам свої вироби, наголошуючи в першу чергу на їх перевагу. Потрібно відмітити, що більшість машин сучасних провідних фірм і компаній виробників майже ідентичні за конструктивними і експлуатаційними показниками. Знайти і відмітити їх суттєві недоліки майже неможливо.

Виявлену, при перегляді наявної технічної літератури, інформацію про особливості використання техніки в умовах рядової експлуатації і їх впливу на техніко-економічні показники сільськогосподарських тракторів або машинно-тракторних агрегатів (МТА) детально розглянуто та систематизовано за основними факторами впливу в табл. 2.1...2.3 роботи [4]. Серед множини різноманітних факторів впливу на

перевитрату палива (%) від витрати за нормою відмітимо лише значення мінімальні і максимальні. При спрацюванні циліндро-поршневої групи на 0,01 мм витрата палива збільшується на 0,5 %, а при нещільному закритті паливного бака (через відсутність стандартної кришки) – 0,7 %. Погіршення розпилювання палива збільшує його витрату на 30...35 %, а робота дизеля при температурі охолодної рідини 30...40 °С – на 30...40 %.

Аналіз факторів впливу, дав можливість згрупувати способи підвищення показників тракторів і автомобілів у сім груп (табл. 1).

Таблиця 1 – Основні способи підвищення показників тракторів і автомобілів в умовах рядової експлуатації

№ пп	Спосіб
1.	Застосування нових видів палива
2.	Підвищення кваліфікації персоналу
3.	Якісне проведення робіт з визначення технічного стану паливного насоса високого тиску, дизеля та трактора з наступним їх ремонтом або регулюванням
4.	Введення в конструкцію регулятора паливного насоса пристроїв, які покращують роботу насоса, дизеля і трактора на відповідних режимах (обмежувач димлення, від'ємний коректор, однорежимний регулятор, дворезимний регулятор, дворезимно-всережимний регулятор, електронний регулятор та ін.)
5.	Підбір оптимальних пристроїв, режимів роботи і комплекту сільськогосподарських машин і знарядь при виконанні польових і транспортних робіт
6.	Встановлення на трактор Т-150К інших дизелів (ЯМЗ-236, КамАЗ-740, «DOUTS»)
7.	Модернізація дизелів для роботи на інших паливах (стиснутий або зріджений газ) по газодизельному циклу

Джерело: розроблено авторами з використанням [4]

Очевидно, що в межах однієї роботи розглянути одночасний (комплексний) вплив такої кількості груп факторів на показники одного сільськогосподарського трактора, а тим більше на всі чи основні моделі, тракторів і автомобілів які експлуатуються на підприємствах АПВ, неможливо. Для прикладу, приведемо короткий аналіз деяких із цих факторів.

Прикладом використання 5-ї групи факторів є запропоноване заводом-виробником комплектування МТА для виконання суцільної культивуації (рис. 1). Видно, що запропоновано комплектування трактора Т-150К трьома культиваторами КПС-4. Очевидно, що такий МТА можливо використовувати не для всіх видів робіт (перша культивуація, культивуація поля після поливу або дощу та деяких інших) через надмірне перевантаження дизеля при збільшенні опору перекочування рушіїв. Збільшення опору обумовлене збільшенням опору ґрунту робочим органам культиваторів при зміні щільності ґрунту або зміні глибини обробітку (заглибленні робочих органів). Відмітимо, що таке перевантаження суттєве, інколи робота такого МТА неможлива. Про це свідчить дуже рідке застосування такого агрегату в умовах рядової експлуатації. У більшості господарств АПВ його взагалі не застосовують.



Рисунок 1 – Деякі режими роботи трактора Т-150К, запропоновані заводом-виробником

Джерело: [4]

При проведенні досліджень [3, 5] встановлено, що при перевантаженні дизеля має місце збільшення димності відпрацьованих газів (ВГ), інколи суттєве (рис. 2) [4].

Очевидно, що значно на димність ВГ, в першу чергу, впливає невідповідність комплектування агрегату, неправильний вибір режиму роботи, порушення в регулюваннях або роботі паливної апаратури. В результаті додаткового аналізу технічної літератури встановлено, що підвищена димність ВГ притаманна і при роботі на деяких режимах інших тракторів (рис. 3, 4).



Рисунок 2 – Можливі режими роботи трактора Т-150К в польових умовах

Джерело: [4]



Рисунок 3 – Можливі режими роботи тракторів на спортивних змаганнях

Джерело: [4]

Виявлено, що підвищена димність відпрацьованих газів має місце при форсуванні дизеля надмірною подачею палива, що є звичайним явищем при проведенні відповідних спеціалізованих нетривалих змагань (рис. 3). Але при цьому організатори змагань або виробники техніки можуть дещо зменшити негативні результати по димності ВГ або взагалі їх не надавати.



а



б



в

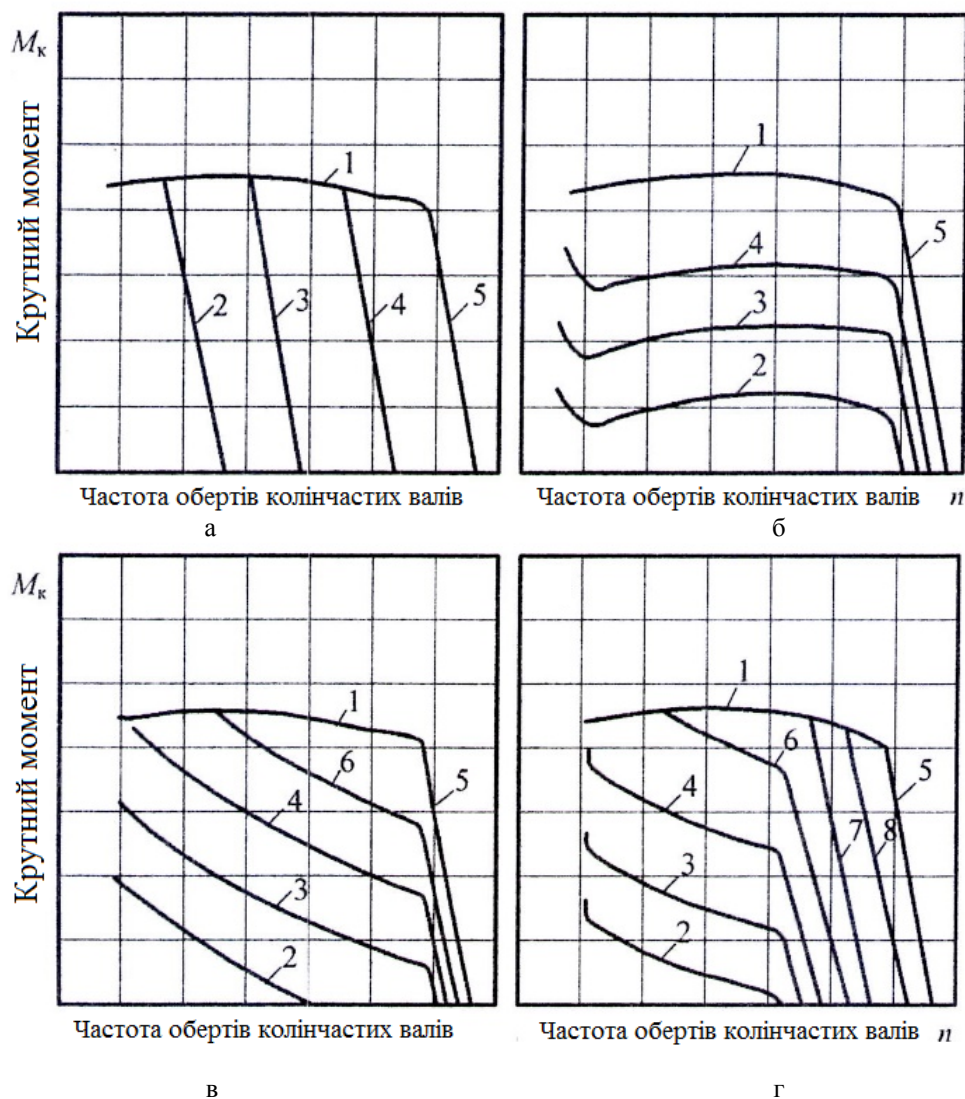
а – підвищена димність ВГ вітчизняного трактора;
б, в – підвищена димність ВГ закордонного трактора

Рисунок 4 – Можливі режими роботи деяких інших сільськогосподарських МТА

Джерело: [4]

При виконанні різних польових робіт підвищена димність ВГ вітчизняного трактора (рис. 4,а) і деяких зарубіжних (рис. 4,б; 4,в) пояснюється факторами, розглянутими вище, при розгляді особливостей 5-ї групи способів впливу. Необхідно відмітити, що на рис. 4,а підвищена димність ВГ надана дещо особливо, на фоні густих дерев лісопосадки, що також зменшує негативне сприйняття матеріалу, особливо на невеликому розмірі такого рисунку.

Зменшити димність ВГ і поліпшити паливну економічність тракторів можливо застосуванням дослідних (модернізованих) регуляторів паливних насосів високого тиску (4-та група способів, табл. 1). Загальний вигляд зовнішніх і проміжних швидкісних характеристик при застосуванні однорежимного і дворежимного регуляторів приведено на рис. 5.

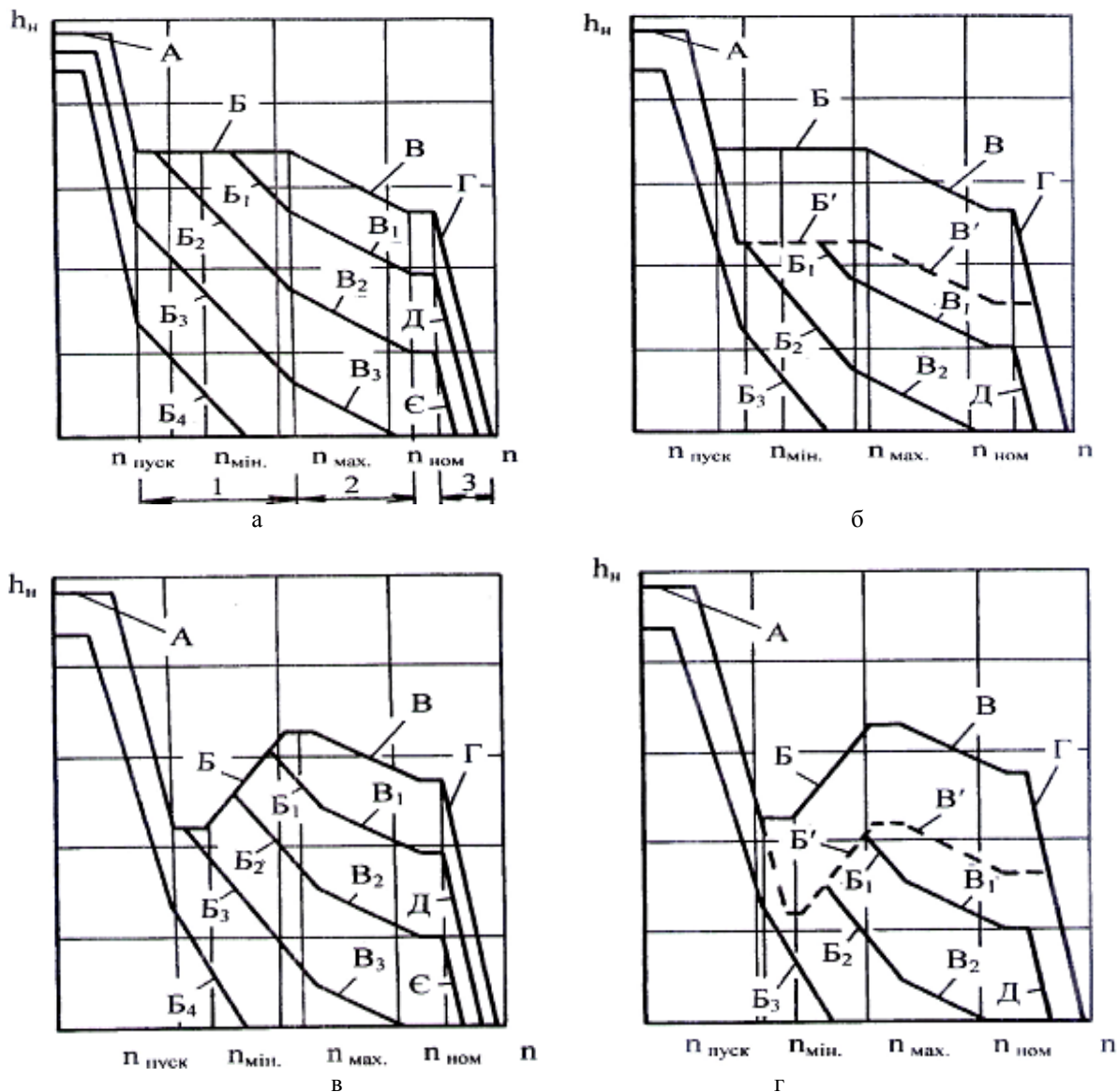


а, б – всережимний і дворежимний регулятори; в – однорежимний регулятор з коректуванням проміжних характеристик; г – дворежимно-всережимний регулятор з коректуванням проміжних характеристик при дворежимному регулюванні: 1 – зовнішня; 2-4, 6-8 – проміжні і 5 – граничні швидкісні характеристики

Рисунок 5 – Схематичне зображення способів регулювання кількості обертів автотракторних дизелів

Джерело: розроблено авторами з використанням [8]

Дещо змінюються особливості протікання характеристик при введенні в конструкцію регулятора паливного насосу, крім всережимного, однорежимного або дворежимного регуляторів, окремо, попарно або сумісно обмежувача димлення і від'ємного коректора (рис. 6).



а – дворежимний регулятор; б – дворежимний регулятор з обмежувачем димлення; в – дворежимний регулятор з від'ємним коректором; г – дворежимний регулятор з від'ємним коректором і обмежувачем димлення

Рисунок 6 – Схематичне відображення швидкісних характеристик ПНВТ НД-22/6Б4 з дворежимним регулятором кількості обертів при різних способах коректування подачі палива
Джерело: розроблено авторами з використанням [3]

В результаті подальших досліджень встановлено, що нові паливні насоси з регулюваннями у відповідності до вимог і, особливо, насоси з певним терміном роботи і регулюваннями в умовах рядової експлуатації мають певні відмінності (рис. 7).

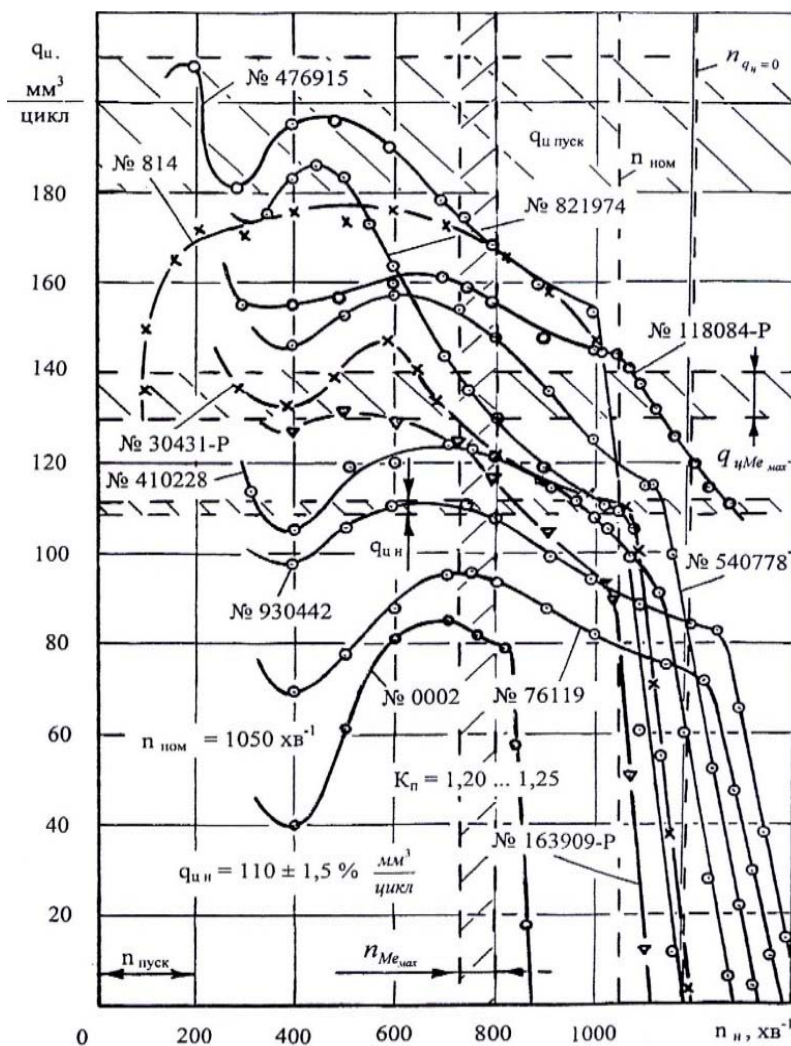


Рисунок 7 – Суміщені зовнішні швидкісні характеристики ПНВТ НД-22/6Б4 з експлуатаційними регулюваннями

Джерело: розроблено авторами з використанням [4]

Очевидно, що такі особливості протікання швидкісних характеристик паливних насосів з серійним всережимним регулятором і дослідними регуляторами необхідно враховувати при визначенні їх конструктивних і регулювальних параметрів і старанно досліджувати їх вплив на роботу насоса, дизеля, трактора і машинно-тракторного агрегату. Особливу увагу необхідно приділяти працездатності насосів з такими регуляторами при збільшенні терміну їхньої експлуатації.

Висновки. 1. На основі аналізу конструктивних і експлуатаційних характеристик дизелів тракторів і автомобілів сформульовані основні способи підвищення їх показників в умовах рядової експлуатації на підприємствах агропромислового.

2. Встановлено, що при перевантаженні дизеля збільшується димність відпрацьованих газів. На цей показник впливає комплектування агрегату, неправильно вибраний режим роботи, наявні порушення в регулюванні та роботі паливної апаратури.

3. Виявлено, що підвищена димність відпрацьованих газів має місце і при форсуванні дизеля надмірною подачею палива. Зменшити димність можливо застосуванням модернізованих регуляторів паливних насосів високого тиску.

4. Запропоновано способи регулювання кількості обертів автотракторних дизелів за допомогою введення в конструкцію регулятора паливного насоса дворегимних,

всережимних та однорежимним регулятором з коректуванням проміжних характеристик попарно або сумісно обмежувача димлення і від'ємного коректора.

5. Встановлено, що спостерігаються певні відмінності нових паливних насосів з регулюванням, у відповідності до вимог, та насосів з певним терміном роботи в умовах рядової експлуатації. Зазначено, що особливості мінішвидкісних характеристик паливних насосів з регуляторами слід враховувати в процесі працездатності дизелів тракторів і автомобілів при збільшенні ресурсу їх експлуатації.

Список літератури

1. Яковенко А., Макарчук В., Сербінов В. Вибір режиму роботи машинно-тракторних агрегатів. *Аграрний вісник Причорномор'я*. 2019. №94. С. 117-121.
2. Шляхи і методи підвищення довговічності і надійності роботи паливної апаратури автотракторних двигунів: монографія / Анісімов В.Ф., Музичук В. І., П'ясецький А. А., Рябошапка В. Вінниця: ВНАУ, 2012. 134с.
3. Мельниченко В.И. Улучшение топливной экономичности и снижение дымности тракторного дизеля применением двухрежимно-всережимного регулятора.- Дис. ... канд. техн. наук.- Днепропетровск: ДГАУ, 1991. 289 с.
4. Мельниченко В.І. Поліпшення потужнісних, паливних і екологічних показників сільськогосподарського трактора тягового класу 30 кН: монографія. Дніпро: ТОВ «ЕНЕМ», 2023. 463 с.
5. Мельниченко В.І. Способи поліпшення екологічних, паливних та потужнісних показників трактора Т-150К в умовах рядової експлуатації. *Геотехнічна механіка*. 2005. Вип. 60. С.183-186.
6. Самойленко Д.Є. Поліпшення техніко-економічних показників автотракторного дизеля шляхом регулювання турбонаддуву: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.05.03. Харків, 2008. 20 с.
7. Анісімов В.Ф., Труханська О.О., Швець Л.В. Розпізнавання технічного стану автотракторних дизелів по малих відхиленнях параметрів: монографія. Вінниця: ТВОРИ, 2022. 176 с.
8. Рябошапка В.Б. Форсування потужності дизельного двигуна за рахунок використання турбонаддування. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2019. №4(103). С. 75 – 87.
9. Захарчук В.І. Всережимно-однорежимний регулятор на автомобільному дизелі. *Удосконалення конструктивних та експлуатаційних показників автомобілів і дорожніх машин*. К.: УТУ. 1998. С. 160–161.
10. Аулін В.В., Тихий А.А. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості і надійності робочих органів ґрунтообробних машин з різальними елементами : монографія. Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2017. 278 с.
11. Aulin, V., Hrynkiv, A., Lysenko, S., Dykha, A., Zamota, T., & Dzyura, V. (2019). Exploring a possibility to control the stressed-strained state of cylinder liners in diesel engines by the tribotechnology of alignment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(12), 6–16.
12. Гавриш В.І. Забезпечення ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів у аграрному секторі економіки: монографія. Миколаїв: МДАУ, 2007. 283 с.

References

1. Yakovenko, A., Makarchuk, V. & Serbinov, V. (2019). Vybir rezhymu roboty mashynno-traktornykh ahrehativ [Choosing the operating mode of machine-tractor units]. *Ahrarnyj visnyk Prychornomor'ia – Agrarian Bulletin of the Black Sea Region*, 94, 117-121 [in Ukrainian].
2. Anisimov, V.F., Muzychuk, V. I., P'iasets'kyj, A. A. & Riaboshapka, V. (2012). *Shliakhy i metody pidvyschennia dovhovichnosti i nadijnosti roboty palyvnoi aparatury avtotraktornykh dyvuhuniv [Ways and methods of increasing the durability and reliability of fuel equipment of tractor engines]*. Vinnytsia: VNAU [in Ukrainian].
3. Melnichenko, V.I. (1991). Uluchshenie toplivnoj ekonomichnosti i snizhenie dymnosti traktornogo dizelya primeneniem dvuhrezhimno-vserezhimnogo reguljatora [Improving fuel efficiency and reducing the smoke of a tractor diesel engine using a dual-mode-all-mode regulator]. *Candidate's thesis*. Dnepropetrovsk [in Russian].
4. Mel'nychenko, V.I. (2023). *Polipshennia potuzhnistnykh, palyvnykh i ekolohichnykh pokaznykiv sil's'kohospodars'koho traktora tiahovoho klasu 30 kN [Improvement of power, fuel and environmental indicators of the 30 kN traction class agricultural tractor]*. Dnipro: TOV «ENEM» [in Ukrainian].
5. Mel'nychenko, V.I. (2005). *Sposoby polipshennia ekolohichnykh, palyvnykh ta potuzhnisnykh pokaznykiv traktora T-150K v umovakh riadovoi ekspluatatsii [Ways to improve the environmental,*

- fuel and power performance of the T-150K tractor in normal operation]. *Heotekhnichna mekhanika - Geotechnical mechanics*, 60, 183-186 [in Ukrainian].
6. Samojlenko, D.Ye. (2008). Polipshennia tekhniko-ekonomichnykh pokaznykiv avtotraktornoho dyzelia shliakhom rehuliuвання turbonadduvu [Improvement of the technical and economic indicators of the tractor diesel engine by adjusting the turbocharger]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kharkiv [in Ukrainian].
 7. Anisimov, V.F., Trukhans'ka, O.O. & Shvets', L.V. (2022) *Rozpiznavannia tekhnichnoho stanu avtotraktornykh dyzeliv po malykh vidkhylenniakh parametriv [Recognition of the technical condition of auto-tractor diesels by small deviations of parameters]*. Vinnytsia: TVORY [in Ukrainian].
 8. Riaboshapka, V.B. (2019). Forsuvannia potuzhnosti dyzel'noho dyvhuna za rakhunok vykorystannia turbonadduvannia [Boosting the power of a diesel engine through the use of turbocharging]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK - Technology, energy, transport of agricultural industry*, 4(103), 75-87 [in Ukrainian].
 9. Zakharchuk, V.I. (1998). Vserezhymno-odnoredzhymnyi rehuliator na avtomobilnomu dyzeli [All-mode-single-mode regulator on a car diesel engine]. *Udoskonalennia konstruktyvnykh ta ekspluatatsiinykh pokaznykiv avtomobiliv i dorozhnykh mashyn - Improvement of structural and operational indicators of cars and road vehicles*, 160-161 [in Ukrainian].
 10. Aulin, V.V. & Tykhyj, A.A. (2017). *Trybofizychni osnovy pidvyschennia znosostijkosti i nadijnosti robochykh orhaniv gruntoobrobnykh mashyn z ryzal'nymy elementamy [Tribophysical basics of increasing the wear resistance and reliability of the working bodies of tillage machines with cutting elements]*. Kropyvnyts'kyj: Lysenko V.F. [in Ukrainian].
 11. Aulin, V., Hrynkiv, A., Lysenko, S., Dykha, A., Zamota, T., & Dzyura, V. (2019). Exploring a possibility to control the stressed-strained state of cylinder liners in diesel engines by the tribotechnology of alignment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(12), 6–16 [in English].
 12. Havrysh, V.I. (2007). *Zabezpechennia efektyvnoho vykorystannia palyvno-enerhetychnykh resursiv u ahrarnomu sektori ekonomiky [Ensuring effective use of fuel and energy resources in the agricultural sector of the economy]*. Mykolaiv: MDAU [in Ukrainian].

Andrii Pugach, prof., Dr. state manager, PhD tech. sci.

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Viktor Aulin, Prof., Dr. tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnyts'kyi, Ukraine

Vasyl Melnychenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksii Derkach**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Volodymyr Teslia, PhD tech. sci.

Ternopil Ivan Puluji National Technical University, Ternopil, Ukraine

Ways to increase the indicators of diesel engines of tractors and cars in the conditions of ordinary operation

It has been established that when the diesel engine is overloaded, the smokiness of the exhaust gases increases. This indicator is affected by the configuration of the unit, incorrectly selected operating mode, existing violations in the regulation and operation of the fuel equipment.

The results of a comparative analysis of ways to increase the indicators of domestic and foreign-made diesel engines of tractors and cars, which are in the conditions of ordinary operation of Ukrainian enterprises of various forms of ownership, are presented. Changes in fuel efficiency indicators and environmental indicators of diesel tractors and machine-tractor units were analyzed. As an example, the operation of the ND-22/6B4 high-pressure fuel pump, the SMD-62 diesel engine, and the T-150K tractor was considered. Research and observation of the technique was carried out over a long period.

The historical aspect of the development of this topic is given to show the dynamics and focus attention on more effective ways of increasing the indicators of tractors and cars in ordinary conditions of operation and their use. The mentioned questions about the analysis of the design and functioning of modern tractors of foreign production are considered.

It was found that the increased smoke of exhaust gases also occurs when the diesel engine is boosted by excessive fuel supply. To reduce smoke, it is possible to use modernized regulators of high-pressure fuel pumps. Methods of regulating the number of revolutions of auto-tractor diesels are proposed by introducing into the design of the fuel pump regulator two-mode, all-mode and single-mode regulators with correction of intermediate characteristics in pairs or jointly with a smoke limiter and a negative corrector.

diesel, high-pressure fuel pump, regulator, fuel efficiency, exhaust gas smoke, experimental universal regulator, smoke limiter, negative corrector

Одержано (Received) 30.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 24.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 631.356.4

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.134-143](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.134-143)**І.В. Головецький**, асп., **А.В.Бабій**, проф., д-р техн. наук*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна**e-mail: goloveckijivan@gmail.com*

Конструктивні особливості та ефективність роботи мінікартоплекопачів

У роботі виконано статистичний аналіз площ, на яких вирощують картоплю в Україні, встановлено питомі частки виробництва цієї культури у підсобних господарствах населення. Відповідно до величини оброблюваних площ окреслено техніку, якою здійснюється технологічна операція збирання. Для зразків картоплезбиральної мінітехніки виконано аналіз її функціональної та конструктивної ефективності. Охарактеризовано здатності картоплекопачів до підкопування бульбоносного пласту ґрунту, його первинної та основної сепарації при використанні різних типів робочих органів. Зроблено акцент на ефективності роботи такої техніки на засмічених бур'янами ґрунтах. У підсумку вказано на тенденції розвитку мінікартоплезбиральних машин для невеликих фермерських господарств.

картопля, ґрунт, бульбоносний пласт, вібраційний леміш, картоплекопач, підкопування, сепарація, робочий орган, транспортер, сепарувальний барабан

Постановка проблеми. Виробництво картоплі в Україні було і залишається на високому рівні. Наша держава у трійці лідерів світових виробників картоплі. За статистичними даними з бази FAOSTAT [22] Україна у 2021-2022 роках втримує почесне третє місце у цьому рейтингу, рис. 1.

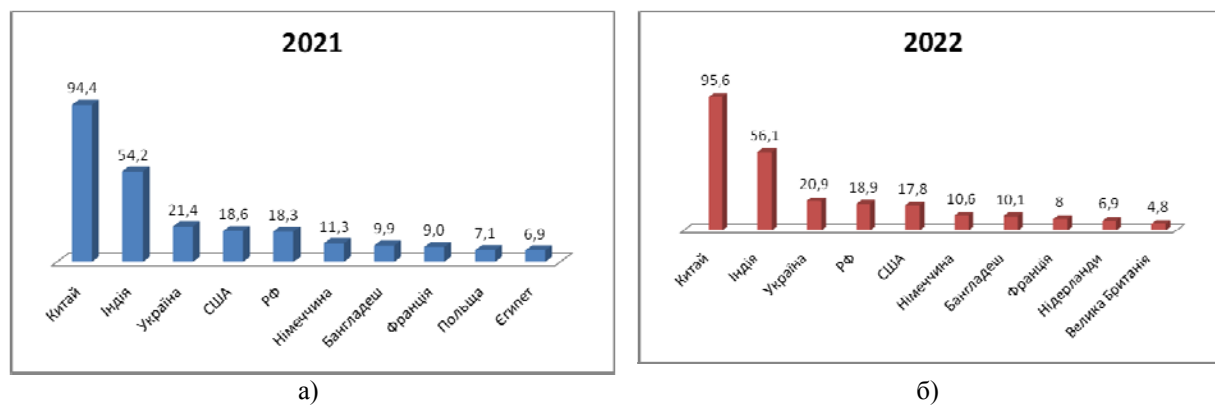


Рисунок 1 – Статистика валового збору картоплі світовими виробниками, млн.т

Джерело: [22]

Площі (тис. га) під посадкою картоплі, що розподілені за регіонами України, рис. 2 [11].

Серед наведеної статистики вражає те, що ця культура майже повністю вирощується у господарствах населення [15]. Якщо в багатьох працях приводяться якісь узагальнені числа часток виробленої продукції у таких господарствах [9, 10], то тут, користуючись офіційною статистикою, можна констатувати наведене співвідношення, рис. 2.

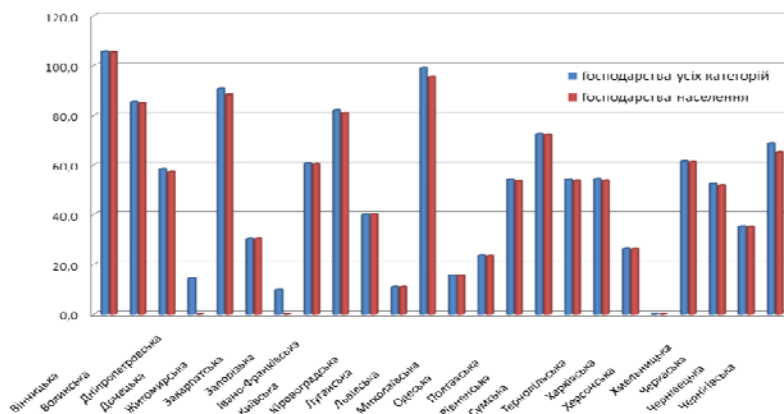


Рисунок 2 – Розподіл площ (тис.га) у 2022 році під посадкою картоплі відповідно до регіонів України

Джерело: [11]

До прикладу, в областях західного регіону України ця частка є близькою до 100%, рис.3.

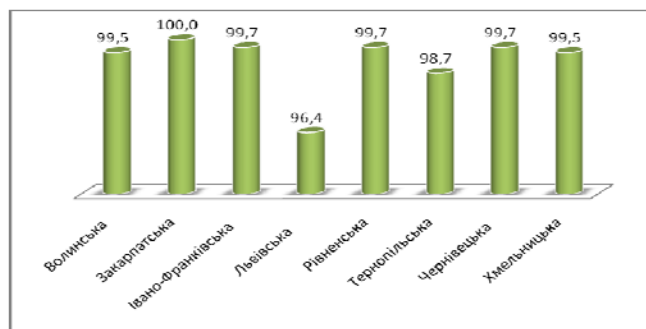


Рисунок 3 – Відсоткова частка виробленої картоплі в областях західного регіону України від загального валового збору картоплі у цих областях

Джерело: розроблено авторами

Тенденція такого високого відсотку виробництва картоплі у невеликих підсобних господарствах зберігається у всіх регіонах України [21]. Навіть, якщо відкинути господарства, що мають площі, які обробляють високотехнологічними сільськогосподарськими машинами та агрегують з тракторами тягового класу 1,4 і вище, залишається значна частка угідь, які слабомеханізовані або багато процесів взагалі виконують вручну. У переважній більшості таких господарств використовують мінітехніку, яка потребує постійного удосконалення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вирощування картоплі – це досить трудомісткий процес, особливо при виконанні технологічної операції збирання. Для невеликих підсобних господарств (від 0,1 га до 2 га (градація умовна)) на ринку є досить багато зразків малогабаритної техніки, багато патентних розробок тощо. Проте, теоретичні описи процесів таких машин є досить обмеженими.

Основні проблеми, що розглядаються в такого класу картоплезбиральних машин пов'язані з підкопуванням та сепарацією із транспортуванням бульбоносного пласту [2, 4, 5]. Окреслена проблематика ускладнюється тим, що її вирішення повинне бути реалізованим в конструкціях мінікопачів, де обмеженими є габарити, маса, споживана потужність, вартість тощо. Тому є необхідність розвивати даний напрям досліджень для отримання конструкції високоефективного мінікартоплекопача, який повинен базуватися на існуючому досвіді вже реалізованих на практиці машин-аналогів.

Постановка завдання. Метою проведеного дослідження є виявлення основних підходів до побудови та конструктивні особливості машин і знарядь, що використовуються для викопування картоплі у вказаних невеликих господарствах, щоб удосконалити картоплезбиральну техніку та теоретично обґрунтувати її конструктивно-технологічні параметри.

Особлива увага повинна бути загострена на процесах підкопування та сепарації бульбоносного пласту.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо основні типи таких робочих машин – від найпростіших лап-підкопувачів до картоплекопачів, які агрегатуються з мінітракторами чи мотоблоками.

Найпростішим робочим органом для механізованого підкопування картопляних грядок є лапа-підкопувач, рис. 4.



Рисунок 4 – Лапа-підкопувач
Джерело: розроблено авторами

На рис. 4 показано один із варіантів лап-підкопувачів, які виготовляють як сільські умільці, так і в подібному вигляді – промислові виробники. Це пасивний робочий орган, який виготовлений на основі стандартної стрічатої лапи, до якої приварені пруткові подовжувачі. Принцип роботи такого підкопувача полягає у тому, що лапа рухається по осі рядка картоплі, піднімає бульбоносний пласт ґрунту, який ковзає по її поверхні та переходить на подовжувачі, де частково просівається, а картопля йде сходом, рис. 5.

Така лапа-підкопувач може використовуватися для підкопування одного рядка або одночасного підкопування двох

рядків, як показано на рис. 5, б.



а)



б)

Рисунок 5 – Робота лапи-підкопувача

Джерело: розроблено авторами

До переваг такого робочого органу варто віднести: нескладна і надійна конструкція; невисока вартість; простота використання. Найкраще такі робочі органи застосовувати на незабур'ячених та малозв'язаних ґрунтах. Недоліки: низька

сепарувальна здатність при дещо забур'яненних та грудкуватих ґрунтах (рис. 5, а); при розкритті гребеня під час підкопування відбувається значне присипання картоплин, що утруднює ручне підбирання та збільшує втрати урожаю. Підкопування таким способом вимагає додаткової ручної операції – перевірки поверхневого шару викопаного рядка на наявність присипаних картоплин. Але разом з тим, у порівнянні з ручним способом викопування картоплі, наведений робочий орган значно полегшує ручну працю та підвищує продуктивність роботи.

Далі більш ефективною є вібролапа (картоплекопалка трясучна для мотоблока однорядна Бут [13]), рис. 6.



Рисунок 6 – Вібролапа

Джерело: [10, 13]

Дана конструкція у порівнянні з пасивною лапою-підкопувачем має зменшений тяговий опір та покращену сепарацію. Але тут зрозуміло, що сепарувальна здатність наведеної конструкції є досить примітивною і говорити про якість її роботи на забур'яненних площах є недоречним. Така вібролапа ефективно може себе зарекомендувати на чистих легких ґрунтах, де картоплю потрібно підняти тільки на поверхню поля [10].

Зрозумілим є те, що для підвищення ефективності картоплезбиральної машини у відносно важчих умовах роботи є ускладнення її конструкції і цей чинник неможливо оминути. Звичайно, що має бути розумне поєднання складність-ефективність роботи (це опосередковано є вартістю машини).

Найбільш популярними, судячи з пропозицій на ринку, стали картоплекопалки, які поєднують у собі вібраційний леміш та сепарувально-транспортуючий грохот. Варіанти виконання таких машин є досить різноманітними, зберігаючи вказані принципи. Наведемо кілька світлин таких машин, які можна купити у виробників, рис. 7.

Якщо розглядати конструкції машин, то чи не найпопулярнішим з виробників мінітехніки в Україні є компанія «Крючков» з м. Полтави. Їх розробки широко представлені в інтернет-магазинах, багато є роликів з випробувань у відкритих джерелах і т.д. Виробник таким чином здобуває довіру до покупця.

Продовжуючи аналіз картоплекопачів, на рис. 7, а представлена одна із моделей картоплекопачів цієї компанії – картоплекопач вібраційний 2-ексцентриковий ZIRKA-61 (KK8) [6].



Рисунок 7 – Картоплекопачі з вібраційним лемешем та сепарувально-транспортуючим грохотом
Джерело: [6, 16, 17, 20]

На рис. 7, б такого ж типу картоплекопач для мотоблоку «Мотор Січ КВ-1» від виробника «Агромарка» [16].

Аналізуючи такого класу машини на закордонному ринку, можна побачити аналогічні конструкції: картоплекопач вібраційний Ursa від компанії Vomet (рис. 7, в) польського виробника сільськогосподарських машин [17]; однорядний картоплекопач Imac SPP 50V (Італія), рис. 7, г [20].

Це прості та надійні мінікопачі, вони добре себе зарекомендували на неважких та малозв'язаних ґрунтах, де процес сепарації бульбоносного пласту не потребує значної інтенсифікації. Проте, якщо їх використовувати у більш складних умовах збирання картоплі – більш зв'язані ґрунти із певною грудкуватістю, наявність кореневищ бур'янів і т.д., то їх ефективність дещо знижується.

Тоді виявляється як недолік те, що вони нездатні підкопаний бульбоносний пласт, за рахунок вібраційних рухів лемеша, направити на подальший сепарувальний орган – грохот в даному випадку. Тобто із-за такого конструктивного виконання шарнірного приєднання вібраційного лемеша до рами машини неможливо забезпечити заданий закон руху з метою отримання направленого руху бульбоносного пласта. Крім того, питання динамічної зрівноваженості таких механізмів тут вирішуються тільки шляхом приєднання приводу грохота у протифазі до ходу лемеша, але це не завжди дає бажаний ефект. Оскільки, якщо досягаємо задовільного ефекту зрівноваження, то

втрачаємо на тому, що закон руху площини грохота не є настільки ефективним при сепарації та створенні направленої руху бульбоносного пласта. Інших елементів чи механізмів для зменшення вібрацій таких мінікопачів не передбачено у вказаних конструкціях.

Крім наведених зразків картоплекопачів на ринку багато копачів картоплі транспортерного типу, рис. 8.

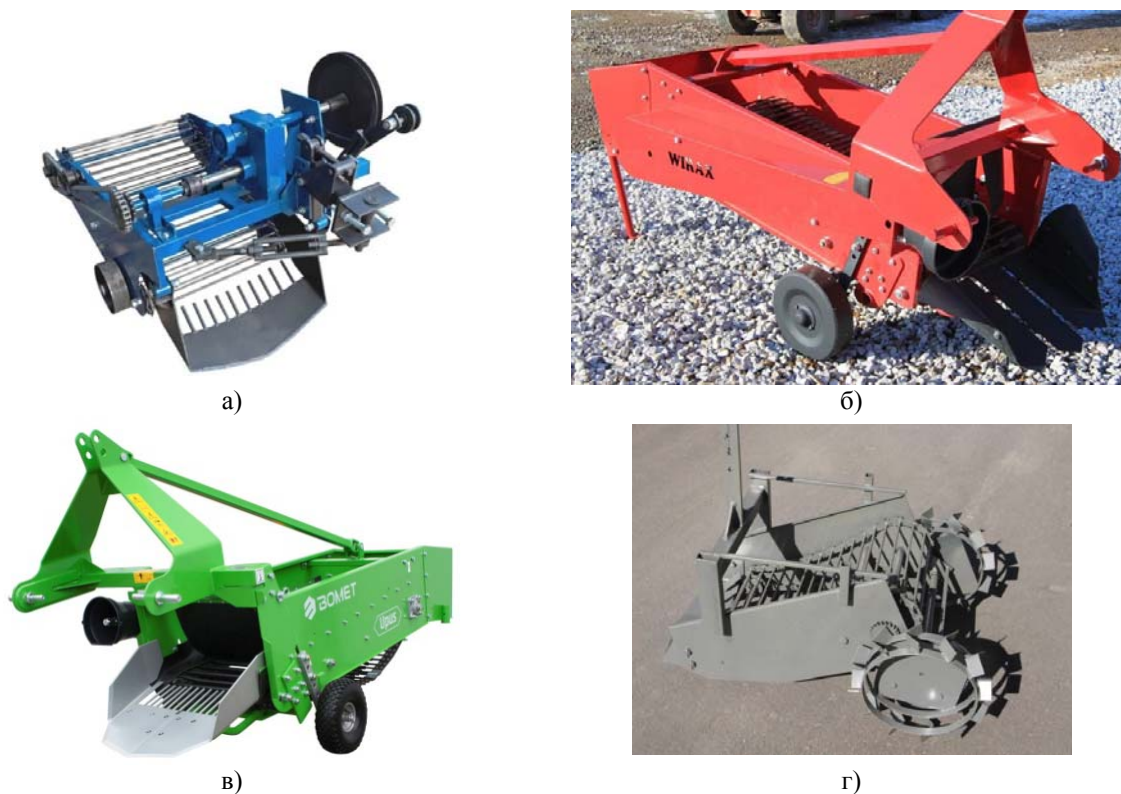


Рисунок 8 – Картоплекопачі транспортерного типу

Джерело: [1, 7, 8, 18]

На рис. 8, а картоплекопач вібраційний транспортерний (зі зміщенням причепа) під мототрактор з гідравлікою (Скаут) (КК22) фірми Крючков [7]. Далі представлено картоплекопач однорядний транспортерний «Wimax» (Польща) [8], рис. 8, б. Наступна наведена модель картоплекопача конвеєрного однорядного Urus, компанії Bomet (Польща) [18], рис. 8, в. І ще одна конструкція картоплекопача транспортерного універсального АгроСад для мотоблоків, рис. 8, г [1]. Представлені конструкції вибрані серед топових пропозицій на ринку таких машин. Це якраз свідчить про їх ефективність, оскільки є відповідний попит та пропозиція. Разом з тим, аналізуючи наведені конструкції мінікартоплекопачів, їх виконання має класичну схему. Наприклад, на рис. 8, а копач компанії Крючков має вібраційний леміш, що в передній частині шарнірно приєднаний до рами машини, а в задній – через систему важелів з'єднаний з кривошипом, що приводиться в дію від ВВП мінітрактора чи мотоблока і таким чином створюються вібраційні рухи. Форма таких рухів для окремої точки різального леза – це рух по дузі кола. Величина центрального кута (амплітуда), на який відхиляється леміш, встановлюється радіусом кривошипа. Частота коливань залежить від частоти обертання приводного механізму.

На рис. 8, б-г лемеші пасивні; приводи пруткового транспортера для конструкцій на рис. 8, б і в – від ВВП енергозасобу, а для конструкції на рис. 8, г – від опорно-приводних коліс. Крайня конструкція картоплекопача цікава тим, що для виконання

технологічного процесу викопування енергетичний засіб, який приводить його в дію, може бути найпростішим, оскільки тут немає необхідності у використанні ВВП. Але є небезпека в тому, що при накопиченні маси бульбоносного пласту на транспортері зростають моменти для його приводу, а це може призвести, в свою чергу, до пробуксовування опорно-приводних коліс. За таких умов мусить бути надійне зчеплення коліс з ґрунтом, інакше це негативно позначиться на технологічному процесі.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 9 – Інші типи картоплекопачів для мініенергозасобів

Джерело: [3, 12, 14,19]

Картоплекопач КТН-1Б, що продається МПП «ЛИБІДЬ» (рис. 9, а), це машина, що агрегатуються з тракторами класу 0,6-1,4 [19]. Її робочий орган обертаючись, лопотями діє на бульбоносний пласт, який знаходиться на пасивному лемеші, розриває його та розкидає частинки (картоплю, ґрунт, рослинні рештки) по поверхні поля на 1-2 м. Така машина проста та надійна в роботі, але її суттєвим недоліком є те, що виникає великий розкид картоплин по поверхні поля та значне їх присипання ґрунтом, що значно ускладнює наступне підбирання плодів. Крім того, є велика ймовірність пошкодження бульб при їх взаємодії з робочим органом.

Існує досить багато інших типів картоплекопачів до мінітехніки, але промислового випуску важко спостерігати, на ринку такі конструкції практично відсутні. На противагу цьому, умільці у своїх майстернях все ж намагаються знайти оптимальні конструкції картоплекопачів для конкретних умов та об'ємів збирання.

Відомі конструкції картоплекопачів з барабаними сепараторами, які працюють на полях окремих власників, рис. 9, б-г.

Наприклад, на рис. 9, б [14] наведено картоплекопач із сепаратором барабанного типу до важкого мотоблока. Ця конструкція має багато цікавих рішень, але її використання дещо обмежується умовами стану ґрунту – грудкуватістю, наявністю рослинних решток і кореневищ. Недоліком барабаних сепараторів є їх здатність до

забивання, що різко знижує рівень сепарації.

Інше цікаве рішення запропоновано у публікації [12]. Тут автор пропонує розробку мінікомбайна для збирання картоплі. Конструкція є досить вдалою, але і досить складною, а відповідно для промислового виробництва – вартісною.

Також у публікації [3] автор пропонує свою конструкцію картоплезбирального мінікомбайна. Наведені рішення є невичерпними, але їх тут об'єднує можливість одночасного викопування картоплі зі збиранням її у ящики чи інші контейнери, виключаючи додаткову операцію ручного підбирання.

Висновки. Реалізація такої ідеї можлива за умови якісної сепарації підкопаного бульбоносного пласту та мінімального засмічення бульб ґрунтовими грудками, рослинними рештками, кореневищами тощо. Тому постає серйозне питання підвищення ефективності сепарації на всіх стадіях руху підкопаного бульбоносного пласту для наведених конструкцій простих мінікопачів, що агрегуються з енергозасобами малої потужності. Тут обмеженням є відносно невеликий шлях руху бульбоносного пласту площинами підкопуючих та сепаруючих робочих органів. А тому від ефективності сепарації ґрунту та сторонніх решток залежить можливість збору бульб в певні місткості. Реалізація цієї ідеї суттєво зменшить трудомісткість збиральної операції картоплі в цілому і це дасть суттєві переваги такій машині на ринку щодо її конкурентної привабливості у порівнянні з аналогами.

Список літератури

1. Agrosad. Картоплекопач транспортерний для мотоблоків універсальний. URL: https://agrosad.com.ua/product/kartofelekopalka_transporternaya_dlya_motoblokov_universaljnaya.
2. Bulgakov V., Nikolaenko S., Adamchuk V., Z. and Olt J. Theory of impact interaction between potato bodies and rebounding conveyor. *Agronomy Research*. 2018. 16(1). pp. 52-63.
3. Digging potatoes 2019. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=xwdaXoPzeDY&t=138s>.
4. Firman Yu. & Hrushetsky S., (2015). Investigation and substantiation of the parameters of the potato digger with a drum separator of potato tubers and residues, *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, Vol. 17, No 1, pp. 17-26.
5. Hrushetsky S.M., Yaropud V.M., Duganets V.I., Duganets V.I., Pryshliak, V.L. Kurylo V.M. Research of constructive and regulatory parameters of the assembly working organs for the potato's harvesting machines. *INMATEH-Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 59. № 3. pp. 101-110.
6. Kruchkov fabrikando fabrikamur. Картоплекопач вібраційний 2-ексцентриковий Zirka-61 (KK8). URL : Картоплекопач вібраційний 2-ексцентриковий Zirka-61 (KK8).
7. Kruchkov fabrikando fabrikamur. Картоплекопач вібраційний транспортерний (зі зміщенням причіпного) під мототрактор з гідравлікою (Скаут) (KK22). URL: <https://kruchkov.com.ua/kartoplekopach/kartoplekopach-vibratsijnij-transporternij-zi-zmischennyam-prichipnogo-pid-mototraktor-z-gidravlikoyu-skaut-kk22> .
8. WIRAX. Картоплекопач однорядний. URL: Картоплекопач однорядний - WIRAX Tuchomie - Косарки, плуги, борони, сільгосптехніка.
9. Бабій А.В., Головецький І.В., Гладь Ю.Б. Дослідження кінематичних параметрів вібраційного лемеша картоплекопача з використанням комп'ютерної програми. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. "Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин"*, 2023. Вип. 53. С.227-236.
10. Головецький І.В., Бабій А.В. Аналіз конструктивних особливостей найпростіших картоплекопачів. *«Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики»: матеріали Міжнар. наук.-практ. конфі. 29-30 вересня 2022*. Тернопіль: С.49-50.
11. Державна служба статистики України. URL : Площі, валові збори та урожайність сільськогосподарських культур за їх видами та по регіонах (ukrstat.gov.ua).
12. Картоплезбиральний комбайн до мотоблока. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=FV82skYaG44>.
13. Картоплекопалка трясушка до мотоблока однорядна Бут (вібролапа). URL: <https://asmoto.pro/products/navisne-motoblok-kartoplekopalky-vibrolapa-but>.
14. Картоплекопач барабанного типу до важкого мотоблока. URL:

- <https://www.youtube.com/watch?v=MVZ5dmaG51s&t=13s>.
15. Картопля в Україні: яким був сезон-2023. URL: Українська картопля: яким був сезон-2023 (zemliak.com).
 16. Компанія «Агромарка». URL:<https://agromarka.ua/ru/kartofelekopalka-grohotnaya-motor-sich-kvg-1-amg-74020/>.
 17. Компанія Bomet. Картоплекопач вібраційний Ursa з викидом назад. URL: bomet.pl.
 18. Компанія Bomet. Картоплекопач конвеєрний однорядний Urus. URL: Картоплекопач конвеєрний однорядний Urus (bomet.pl).
 19. МПП «ЛИБІДЬ». Картоплекопалка КТН-1Б. URL: http://www.selhozpostavka.com.ua/cat.processing_potatoes/434.html.
 20. Однорядний картоплекопач Imac SPP 50V. URL: <https://uvc.com.ua/product/imac-spp-50v/>.
 21. Перспективи картоплярства: AgroTimes. URL: Перспективи картоплярства - AgroTimes.
 22. Статистичний щорічник WORLD FOOD AND AGRICULTURE 2023. URL: <https://www.fao.org/3/cc8166en/online/cc8166en.html>.

References

1. Agrosad. Kartoplekopach transporternyj dlia motoblokov universal'nyj [The transportable potato digger for walk-behind tractors is universal]. Retrieved from URL: https://agrosad.com.ua/product/kartofelekopalka_transporternaya_dlya_motoblokov_universaljnaya [in Ukrainian].
2. Bulgakov, V., Nikolaenko, S., Adamchuk, V., Z. & Olt, J.(2018). Theory of impact interaction between potato bodies and rebounding conveyor. *Agronomy Research*, 16(1), pp. 52-63 [in English].
3. Digging potatoes 2019. Retrieved from URL: <https://www.youtube.com/watch?v=xwdaXoPzeDY&t=138s> [in Ukrainian].
4. Firman, Yu. & Hrushetsky, S., (2015). Investigation and substantiation of the parameters of the potato digger with a drum separator of potato tubers and residues, *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, Vol. 17, No 1*, pp. 17-26 [in English].
5. Hrushetsky, S.M., Yaropud, V.M., Duganets, V.I., Duganets, V.I., Pryshliak, V.L. & Kurylo, V.M. (2019). Research of constructive and regulatory parameters of the assembly working organs for the potato's harvesting machines. *INMATEH-Agricultural Engineering, Vol. 59, № 3*, pp. 101-110 [in English].
6. Kruchkov fabrikando fabrikamur. Kartoplekopach vibratsiyni 2-ekstsentrykovyi Zirka-61 (KK8). Retrieved from URL : Картоплекопач вібраційний 2-ексцентриковий Zirka-61 (KK8) [in Ukrainian].
7. Kruchkov fabrikando fabrikamur. Kartoplekopach vibratsiyni transporterni (zi zmishchenniam prychipnoho) pid mototraktor z hidravlikoiu (Skaut) (KK22). Retrieved from URL: <https://kruchkov.com.ua/kartoplekopach/kartoplekopach-vibratsiynij-transporternij-zi-zmischennyam-prychipnogo-pid-mototraktor-z-gidravlikoyu-skaut-kk22> [in Ukrainian].
8. WIRAX. Kartoplekopach odnoriadny. Retrieved from URL: Картоплекопач однорядний - WIRAX Tuchomie - Косарки, плуги, борони, сільгосптехніка [in Ukrainian].
9. Babij, A.V., Holovets'kyj, I.V. & Hlad'o, Yu.B. (2023). Doslidzhennia kinematychnykh parametriv vibratsiynoho lemesha kartoplekopacha z vykorystanniam komp'iuternoї prohramy [Investigation of kinematic parameters of vibratory ploughshare of potato digger using computer program]. *Zahal'noderzhavnyj mizhvidomchyj naukovo-tekhnichnyj zbirnyk. "Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil's'kohospodars'kykh mashyn" - All-state interdepartmental scientific and technical collection. "Design, production and operation of agricultural machines", 227-236* [in Ukrainian].
10. Holovets'kyj, I.V. & Babij, A.V. (2022). Analiz konstruktyvnykh osoblyvostej najprostishykh kartoplekopachiv [Analysis of the design features of the simplest potato diggers]. Processes, machines and equipment of agro-industrial production: problems of theory and practice: *Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (29-30 veresnia 2022) - International science and practice conference (p.p. 49-50)*. Ternopil. [in Ukrainian].
11. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy [State Statistics Service of Ukraine]. Retrieved from URL: Площі, валові збори та урожайність сільськогосподарських культур за їх видами та по регіонах (ukrstat.gov.ua) [in Ukrainian].
12. Kartoplezbyral'nyj kombajn do motobloka [Potato harvester for a walk-behind tractor]. Retrieved from URL: <https://www.youtube.com/watch?v=FV82skYaG44> [in Ukrainian].
13. Kartoplekopalka triasuchka do motobloka odnoriadna But (vibrolapa) [Potato peeler shaker for walk-behind tractor single-row Booth (vibrating foot)]. Retrieved from URL: <https://asmoto.pro/products/navisne-motoblok-kartoplekopalky-vibrolapa-but> [in Ukrainian].
14. Kartoplekopach barabannoho typu do vazhkoho motobloka [Drum-type potato digger for a heavy walk-behind tractor]. Retrieved from URL: <https://www.youtube.com/watch?v=MVZ5dmaG51s&t=13s> [in Ukrainian].

15. Kartoplia v Ukraini: iakym був сезон-2023 [Potatoes in Ukraine: how was the 2023 season]. Retrieved from URL: Українська картопля: яким був сезон-2023 (zemliak.com) [in Ukrainian].
16. Kompaniia «Ahromarka». ["Agromarka" company]. Retrieved from URL: <https://agromarka.ua/ru/kartofelekopalka-grohotnaya-motor-sich-kvg-1-amg-74020/> [in Ukrainian].
17. Kompaniia Bomet. Kartoplekopach vibratsijnyj Ursa z vykydom nazad [Bomet Company. Ursa vibrating potato digger with rear discharge]. Retrieved from URL: bomet.pl [in Poland].
18. Kompaniia Bomet. Kartoplekopach konveiernyj odnoriadnyj Upus [Bomet Company. Upus single-row conveyor potato digger]. Retrieved from URL: Картоплекопач конвеєрний однорядний Upus (bomet.pl) [in Poland].
19. MPP «LYBID'». Kartoplekopalka KTN-1B [MPP "LYBID". Potato peeler KTN-1B]. Retrieved from URL: http://www.selhozpostavka.com.ua/cat.processing_potatoes/434.html [in Ukrainian].
20. Odnoriadnyj kartoplekopach Imac SPP 50V [Single row potato digger]. Retrieved from URL: <https://uvc.com.ua/product/imac-spp-50v/> [in Ukrainian].
21. Perspektyvy kartopliarstva: AgroTimes [Prospects of potato growing: AgroTimes]. URL: Перспективи картоплярства - AgroTimes [in Ukrainian].
22. Statystychnyj schorichnyk WORLD FOOD AND AGRICULTURE 2023 [Statistical yearbook WORLD FOOD AND AGRICULTURE 2023]. Retrieved from URL: <https://www.fao.org/3/cc8166en/online/cc8166en.html> [in English].

Ivan Holovetskyi, post-graduate, **Andrii Babii**, Prof., DSc.

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

Design features and work efficiency of mini potato diggers

The purpose of the study is to identify the main approaches to the construction and design features of machines and tools used to dig potatoes in the areas of small farms in order to improve potato

harvesting equipment and theoretically justify its design and technological parameters. Particular attention is focused on the processes of digging and separation of the tuberous layer.

The statistical analysis of the areas where potatoes are grown in Ukraine is carried out, specific shares of production of this crop in subsistence farms of the population are established. In accordance with the value of the treated areas, the technique by which the technological assembly operation is carried out is outlined. For samples of potato harvesting minitechnics, its functional and constructive efficiency was analyzed. The ability of potato diggers to dig a tuberous layer of soil, its primary and main separation using different types of working bodies is characterized. Emphasis is placed on the work efficiency of such equipment on weed-clogged soils.

As a result, it is outlined that it is promising to develop a potato harvesting minicomcombine or other potato digger capable of fully or partially accumulating the collected potatoes in boxes or other containers, excluding the laying of fruits on the surface of the field. The implementation of such an idea is possible under the condition of qualitative separation of the buried tuberous layer and minimal clogging of tubers with lumps of soil, plant remains, rhizomes etc. Therefore, there is a serious issue of increasing the efficiency of separation at all stages of the movement of the digged tuberous layer for the structures of simple mini-diggers above that are aggregated with low-power energy tools. The limitation here is the relatively short path of movement of the tuberous layer between the planes of the digging and separating working elements. Also the effectiveness of the separation of soil and foreign residues depends on the possibility of collecting seeds in certain containers. The implementation of this idea will significantly reduce the complexity of the harvesting operation of potatoes as a whole. This will give significant advantages to such a machine on the market in terms of its competitive attractiveness compared to analogues.

potato, soil, tuberous layer, vibrating ploughshare, potato digger, digging, separation, working body, conveyor, separation cylinder

Одержано (Received) 30.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 30.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

UDC 629.083

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.144-149](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.144-149)

Andrii Molodan, Prof., DSc., **Oleksandr Polianskyi**, Prof., DSc., **Yevhen Dubinin**, Prof., DSc., **Oleh Sokolovskyi**, post-graduate, **Maksym Krasnokutskyi**, post-graduate
Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine
e-mail: tmirm@ukr.net

Theoretical calculations of the relative additional fuel consumed when shutting down the cylinder

Cylinder deactivation is a technique used to improve the efficiency of an engine by shutting down a certain number of engine cylinders. Cylinder deactivation allows the remaining cylinders to operate more efficiently, increasing their load and improving efficiency. This technique has gained interest both domestically and internationally, particularly for automotive engines, as it helps improve fuel economy at idle and light loads. The process of calculating effective cylinder deactivation in a multi-cylinder engine and its effect on additional fuel consumption is discussed. The need to improve engine efficiency in various speed and load modes is driven by requirements for fuel economy, reduced exhaust toxicity, and the need to improve engine transients while maintaining other characteristics. In order to effectively utilize engine power and maintain performance, the fuel supply to operating cylinders must be increased. However, deactivating cylinders during engine operation results in a decrease in engine power, which in turn reduces crankshaft speed and torque. In summary, cylinder deactivation is a technique that has the potential to improve the economic performance of engines, particularly at idle and light loads.

A method for effectively deactivating cylinders in multi-cylinder engines has been developed based on the dependence of indicator efficiency on load changes. The study examined the effect of cylinder deactivation on mechanical losses and efficiency when load is reduced from 100% to 30%. The results showed that it is possible to use only two cylinders of a four-cylinder engine at 30% load, resulting in reduced mechanical losses and improved efficiency. A proposed method for determining the relative additional fuel consumption when cylinders are deactivated is presented. Deactivated cylinders do not supply air to the exhaust manifold, which reduces pumping losses and creates less rolling resistance, resulting in up to a 25% reduction in fuel consumption. This reduction is especially noticeable in urban driving.

car, deactivated cylinders, fuel consumption, engine irregularity, dynamics

Formulation of the problem. The need to improve the efficiency of engine operation in a wide range of speed and load modes stimulates both the search for new technical solutions and the development of already known and proven ones. It is connected, first of all, with stricter requirements for fuel efficiency and toxicity of exhaust gases (EG) and, in some cases, with the necessity to improve transient processes (TP) in the engine while maintaining other characteristics at the same level or even improving them.

Significant time in the operation of engines of vehicles and power plants are idle (EI), low load and unsteady modes (URM). One of the ways to improve engine operation in these modes is the method of cylinder deactivation.

Analysis of recent research and publications. A considerable amount of scientific research is devoted to the problem of reducing fuel consumption and toxicity of exhaust gases of automobiles. A significant contribution to the solution of this problem was made by N.Y. Govorushchenko. One of the first energetic approaches to evaluating the efficiency of cars was proposed by P.M. Gashchuk. This approach

was developed in the works of P.P. Evseev. From foreign sources we should also mention the work of Y. Matskerle [1–5]. The emergence of new, alternative power units (electric motors, hydrogen internal combustion engines, hybrid power units, etc.), energy sources (accumulators, flywheels) [6] has led to the need to expand the concept (operational property) of "fuel efficiency" by including in it the expenditure of not only thermal energy of fuel, but also energy of other types (electrical and mechanical). In [7] it is proposed to introduce the concept of "energy efficiency of a car" and to consider possible criteria for its evaluation.

The influence of the non-uniformity of the torque of the combustion engine on the traction force on the driving wheels is studied in [5]. In [8], using the harmonic law of variation of the total traction force on the driving wheels $P_k = \overline{P}_k + A_p \sin(\Omega t)$, it was determined that additional energy losses are caused by the non-uniformity of the traction force, where: \overline{P}_k – is the mean value of the traction force; A_p – is the amplitude of the traction force oscillations; Ω – is the circular frequency of oscillations of the engine torque and the traction force on the wheels; t – is the time.

Setting objectives. Justification of the possibility of improving the fuel efficiency at idle and low load modes by switching off (switching on) the fuel supply in a part of cylinders of a multi-cylinder automotive engine.

In order to achieve the given goal, it is necessary to solve the following tasks:

- to present the method of calculation of the effective cylinder cut-off in a multi-cylinder engine and its effect on the relative additional fuel consumption;
- to determine the relative additional fuel consumption at cylinder deactivation in multi-cylinder engines.

Presenting main material. To answer the question of how many engine cylinders should be shut down in order to efficiently utilize engine power and keep the operating cylinders at the same level, it is necessary to increase the cycle fuel delivery. With a higher cycle flow, the average indication pressure in the cylinders increases and the combustion process improves. When some of the engine cylinders are shut down during operation, the engine's indicated power decreases, resulting in a decrease in crankshaft speed and engine torque.

In order to realize the set task, it is necessary to solve the following problem to determine the additional energy and fuel consumption for the car movement when using mechanical drive of driving wheels.

Additional energy consumption due to fluctuations in traction force [5, 8]

$$\Delta W = \frac{A_p}{\pi} \cdot S, \quad (1)$$

where A_p – amplitude of tractive force oscillations;

S – vehicle mileage.

Amplitude of the oscillations of the tractive force of the vehicle

$$A_p = \frac{A_{mi} \cdot j_m \cdot j_{tr} \cdot u_k \cdot u_0}{r_d}, \quad (2)$$

where A_{mi} – amplitude of oscillations of the torque indicator [5, 8];

r_d – dynamic radius of the driving wheels.

$$A_{mi} = 0,5 \cdot \overline{M}_i \cdot k_1, \quad (3)$$

where \overline{M}_i – the average value of the indicator torque is determined by the external load applied to the vehicle;

k_1 – torque inhomogeneity factor of the internal combustion engine [3, 5, 8];

$$k_1 = 0,08 + \frac{14,44}{i_{cyl}}, \quad (4)$$

where i_{cyl} – the number of cylinders in the internal combustion engine that have failed.
Engine torque indicator on all working cylinders of the internal combustion engine [8]

$$M'_i = \overline{M}_i + 0,5 \cdot \overline{M}_i \cdot k'_1 \cdot \sin\left(\frac{\overline{\omega}_e}{2} \cdot i'_{cyl} \cdot t\right), \quad (5)$$

where $\overline{\omega}_e$ – average crankshaft speed;

i'_{cyl} – number of all internal combustion engine cylinders.

When some of the cylinders are disabled (failure)

$$M''_i = \overline{M}_i + 0,5 \cdot \overline{M}_i \cdot k''_1 \cdot \sin\left(\frac{\overline{\omega}_e}{2} \cdot i''_{cyl} \cdot t\right), \quad (6)$$

where i''_{cyl} – number of cylinders in use.

Then $\overline{M}'_i = \overline{M}''_i = \overline{M}_i$, the amplitudes of the oscillations of the torque indicator are

$$A'_{mi} = 0,5 \cdot \overline{M}_i \cdot k'_1; \quad (7)$$

$$A''_{mi} = 0,5 \cdot \overline{M}_i \cdot k''_1; \quad (8)$$

$$k'_1 = 0,08 + \frac{14,44}{i'_{cyl}}; \quad (9)$$

$$k''_1 = 0,08 + \frac{14,44}{i''_{cyl}}. \quad (10)$$

Amplitudes of traction force oscillations

$$A'_p = \frac{A'_{mi} \cdot j_m \cdot j_{dp} \cdot u_k \cdot u_0}{r_d}; \quad (11)$$

$$A''_p = \frac{A''_{mi} \cdot j_m \cdot j_{dp} \cdot u_k \cdot u_0}{r_d}. \quad (12)$$

Relative increase in additional energy consumption when part of the cylinders are shut down (failure)

$$\Delta i_{cyl} = i'_{cyl} - i''_{cyl}; \quad (13)$$

$$\frac{\Delta W''}{\Delta W'} = \frac{A''_p}{A'_p} = \frac{k''_1}{k'_1} = \frac{0,08 + \frac{14,44}{i'_{cyl}}}{0,08 + \frac{14,44}{i'_{cyl} - \Delta i_{cyl}}} = \frac{i'_{cyl}}{i'_{cyl} - \Delta i_{cyl}} \left(1 - \frac{\Delta i_{cyl}}{i'_{cyl} + 180,5}\right), \quad (14)$$

or

$$k_w = \frac{\Delta W''}{\Delta W'} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta i_{cyl}}{i'_{cyl}}} \left(1 - \frac{\frac{\Delta i_{cyl}}{i'_{cyl}}}{1 + \frac{180,5}{i'_{cyl}}} \right) \quad (15)$$

Table 1 shows the calculation of the relative additional fuel consumption k_w when a portion of the engine cylinders are shut down (failure).

Table 1 – Results of relative additional fuel consumption calculation

i'_{cyl}	Δi_{cyl}											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
6	1,19	1,48	1,97	2,94	5,84	-	-	-	-	-	-	-
8	1,14	1,32	1,57	1,96	2,60	3,87	7,70	-	-	-	-	-
10	1,11	1,24	1,41	1,63	1,95	2,42	3,21	4,79	9,53	-	-	-
12	1,09	1,19	1,31	1,47	1,67	1,94	2,31	2,88	3,81	5,69	11,31	-

Source: developed by the author

The peculiarity of tractor engine operation is a wide range of speed and load modes of operation when the wheeled vehicle is moving, including traction, when the engine transmits torque M_k to the transmission, and braking, when the engine receives braking torque from the transmission and brakes the vehicle. For movements at very low speeds, it is possible to operate the engine with a slipping clutch at low crankshaft speeds and torques, both positive and negative, close to zero, for example, when maneuvering in tight spaces, approaching for loading and unloading, coupling to a trailer device, and other such cases.

These features make it practically impossible to exclude modes in which the cylinders are switched off and then on from the working area. At the same time, these modes of operation require professional vehicle handling. Unexpected cylinder cycling can lead to loss of control. Therefore, the process of shutting down and restarting the cylinders of a tractor engine should not be abrupt, but gradual, and this should be considered and ensured in the design of a cylinder shutdown device.

When some of the engine cylinders are shut off during operation, the engine's indicated power decreases, resulting in a decrease in crankshaft speed and engine torque. To maintain them at the same level, it is necessary to increase the cyclic fuel supply to the operating cylinders. With a higher cyclic fuel supply to the working cylinders, the average indication pressure increases and the combustion process improves.

Conclusions.

1. It is demonstrated that the fuel consumption at idle and low loads with partial cylinder deactivation is determined by the dependence of the indicator efficiency on the load variation. The method of calculating the effective cylinder deactivation in a multi-cylinder engine and its effect on the relative additional fuel consumption is presented.

2. When the engine load is reduced from 100% to 30%, the percentage of mechanical losses in indicator operation increases from 12% to 33%, and the mechanical efficiency decreases from 88% to 67%. A power output equal to 30% of the maximum can be achieved with only two cylinders of a four-cylinder engine.

3. A method for determining the relative additional fuel consumption at cylinder deactivation in multi-cylinder engines is proposed.

4. The disabled cylinders have no pumping losses as they do not supply air to the

exhaust manifold, and they create much less resistance when rolling. As a result, fuel consumption can be reduced by up to 25%, with a particularly noticeable difference in city driving.

List of references

1. Куций П. В. Поліпшення експлуатаційних показників транспортних засобів в неусталених режимах оптимізацією способу регулювання дизелів : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.22.20 / НТУ. Київ, 2015. 206 с. http://diser.ntu.edu.ua/Kutsyi_dis.pdf
2. Молодан А. О. Економія палива за рахунок визначення раціонального відключення циліндрів в двигуні. *Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті і при підготовці фахівців: наукові праці міжнародної науково-практичної та науково-методичної конференції присвяченої 85-річчю кафедри автомобілів та 100-річчю з Дня народження професора А.Б. Гредескула, 20-21 жовтня 2016 р.* Харків : ХНАДУ, 2016. С. 149-150.
3. Molodan A. , Polyanskiy O. , Potapov M. Change of power and mechanical losses of a wheel vehicle engine with cylinders cutout. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture.* 2018. Vol.20. Issue 1, P. 99-103.
4. Molodan A., Polyanskii A., Potapov N. Cause and investigative failure analysis in nominal engine operation and partial disabling of cylinders. *Транспорт, екологія – устойчиво развитие. Сборник доклады XXVI научно –техническа конференция с международно участие, 8-10 Октомври 2020.* Варна: Технически университет, 2020. Vol. 1, No.. 27. P. 132-137.
5. Молодан А. О. Наукові основи забезпечення надійності і функціональної стабільності колісних машин в режимі відключення частини циліндрів : дис. на здобуття наук. ступеня д-р техн. наук : 05.22.20 / ХНАДУ: Харків, 2021. 387 с. https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_Vchena_rada/VR_64_059_02/dis_Molodan.pdf
6. Бажинов О. В., Смирнов О. П., Серіков С. А. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика. Харків: ХНАДУ, 2011. 236 с.
7. Кайдалов Р. О. Дослідження можливості зниження енергетичних втрат автомобіля при використанні гібридного електромеханічного приводу ведучих коліс. *Системи обробки інформації.* 2016. Вип. 9 (146). С. 13-17.
8. Polyanskiy A., Molodan A., Potapov M. New approach to technical maintenance and repair of autotractor technics . *Транспорт, екологія – устойчиво развитие. Сборник доклады XXIV научно-техническа конференция с международно участие, 14-16 Юни 2018.* Варна: Технически университет, 2018. № 25. P. 109-115.
9. Молодан А. О. Підвищення енергетичної ефективності колісних машин методом відключення циліндрів в автотракторному двигуні. *Вісник машинобудування та транспорту.* 2019. №2(10). С. 48-53.
10. Молодан А. О. Діагностування потужності окремих циліндрів автотракторних двигунів методом їх відключення . *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки.* 2019. № 198. С. 130-136.

References

1. Kutsiy, P. V. (2015). Polipshennia ekspluatatsijnykh pokaznykiv transportnykh zasobiv v neustalenykh rezhymakh optymizatsiieiu sposobu rehuliuвання dyzeliv [Improvement of operational indicators of vehicles in unstable modes by optimizing the method of regulating diesel engines]. *Candidate's thesis* [in Ukrainian]. http://diser.ntu.edu.ua/Kutsyi_dis.pdf
2. Molodan, A. O. (2016). Ekonomiiia palyva za rakhunok vyznachennia ratsional'noho vidkliuchennia tsylindriv v dvyhuni [Fuel savings due to the determination of the rational shutdown of cylinders in the engine]. The latest technologies in the automotive industry, transport and in the training of specialists: *naukovi pratsi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi ta naukovo-metodychnoi konferentsii prysviachenoї 85-richchiu kafedry avtomobiliv ta 100-richchiu z Dnia narodzhennia profesora A.B. Hredeskula – scientific works of the international scientific-practical and scientific-methodological conference dedicated to the 85th anniversary of the automobile department and the 100th anniversary of the birthday of professor A.B. Gredeskula* (с. 149–150) [in Ukrainian].
3. Molodan, A. O., Polyanskiy, O. S., & Potapov, M. M. (2018). Change of power and mechanical losses of a wheel vehicle engine with cylinders cutout. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, Vol.20, Issue 1*, P. 99-103 [in English].
4. Molodan, A. O., Polyanskiy, O. S., & Potapov, M. M. (2020). Cause and investigative failure analysis in nominal engine operation and partial disabling of cylinders. *Транспорт, екологія – устойчиво развитие.*

- Сборник доклади XXVI научно –техніческа конференция с международно участие, 8-10 Октомври 2020. Варна: Технически университет, 2020. Vol. 1, No.. 27. P. 132-137 [in English].
5. Molodan, A. (2021). Naukovi osnovy zabezpechennia nadijnosti i funktsional'noi stabil'nosti kolisnykh mashyn v rezhymi vidkliuchennia chastyny tsylindriv [Scientific bases of ensuring the reliability and functional stability of wheeled machines in the mode of disconnection of part of the cylinders]. *Doctor's thesis* [in Ukrainian]. https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_Vchena_rada/VR_64_059_02/dis_Molodan.pdf
 6. Bazhynov, O., Smyrnov, O., & Sierikov, S. (2011). *Synerhetychnyj avtomobil. Teoriia i praktyka. [Synergistic car. Theory and practice]*. Kharkiv: KhNADU [in Ukrainian].
 7. Kaidalov, R. (2016). Doslidzhennia mozhlyvosti znyzhennia enerhetychnykh vtrat avtomobilia pry vykorystanni hibrydnogo elektromekhanichnogo pryvodu veduchykh kolis [Research on the possibility of reducing the car's energy losses when using a hybrid electromechanical drive of the driving wheels]. *Systemy obrobky informatsii – Information processing systems, 9(146)*, 13-17 [in Ukrainian].
 8. Molodan, A. O., Polyanskyi, O. S., & Potapov, M. M. (2018). New approach to technical maintenance and repair of autotractor technics. *Транспорт, екологія – устойчиво розвитие*. Сборник доклади XXIV научно-техніческа конференция с международно участие, 14-16 Юни 2018. Варна: Технически университет, № 25. P. 109-115 [in English].
 9. Molodan, A. O. (2019). Pidvyschennia enerhetychnoi efektyvnosti kolisnykh mashyn metodom vidkliuchennia tsylindriv v avtotraktornomu dvyhuni [Increasing the energy efficiency of wheeled vehicles by the method of turning off the cylinders in the tractor engine]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu – Herald of mechanical engineering and transport, 2(10)*, 48-53 [in Ukrainian].
 10. Molodan, A. O. (2019). Diahnostuvannia potuzhnosti okremykh tsylindriv avtotraktornykh dvyhuniv metodom ikh vidkliuchennia [Diagnostics of the power of individual cylinders of tractor engines by the method of their disconnection]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnogo universytetu sil'skoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka. Tekhnichni nauky – Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture. Technical sciences, 198*, 130-136 [in Ukrainian].

А.О. Молодан, проф., д-р техн. наук, **О.С. Полянський**, проф., д-р техн. наук, **Є.О. Дубінін**, проф., д-р техн. наук, **О.В. Соколовський**, асп., **М.В. Краснокутський**, асп.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

Теоретичні розрахунки відносної додаткової витрати палива при відключенні циліндра

У статті обговорюються переваги відключення циліндрів двигуна для ефективного використання його потужності. Збільшення циклічної подачі палива в робочі циліндри покращує процес згоряння і підвищує середній індикаторний тиск. Однак, коли циліндри відключаються, індикаторна потужність двигуна, частота обертання колінчастого валу та крутний момент знижуються. Необхідність підвищення ефективності в широкому діапазоні швидкостей і навантажень призвела до пошуку нових технічних рішень і розвитку існуючих. Деактивація циліндрів дозволяє циліндрам, що залишилися, працювати більш ефективно, збільшуючи їх навантаження і ККД. Цей підхід викликав інтерес з точки зору покращення економічних показників двигунів, зокрема автомобільних, на режимах холостого ходу та часткового навантаження. У тексті також представлено метод розрахунку відносної додаткової витрати палива при відключенні циліндрів у багатоциліндрових двигунах. Загалом, основна увага приділяється покращенню паливної економічності, зниженню токсичності вихлопних газів та покращенню експлуатаційних характеристик двигуна.

Розроблено метод ефективної деактивації циліндрів у багатоциліндрових двигунах, що базується на залежності індикаторного ККД від зміни навантаження. Досліджено вплив деактивації циліндрів на механічні втрати та механічний ККД при зниженні навантаження зі 100% до 30%. Встановлено, що за 30% навантаження можливе використання тільки двох циліндрів чотирициліндрового двигуна, що призводить до зниження механічних втрат і поліпшення ККД. Запропоновано метод визначення відносної додаткової витрати палива при деактивації циліндрів. Відключені циліндри не подають повітря у випускний колектор, що знижує насосні втрати і створює менший опір під час кочення, що в підсумку призводить до скорочення витрати палива до 25%, особливо помітного під час руху в міських умовах.

автомобіль, відключені циліндри, економія палива, нерівномірність роботи двигуна, динаміка

Одержано (Received) 18.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 28.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

UDC 629.083

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.150-158](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.150-158)

Andrii Molodan, Prof., DSc., **Oleksandr Polyanskyi**, Prof., DSc., **Yevhen Dubinin**, Prof., DSc.
Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine
e-mail: tmirm@ukr.net

Mykola Artomov, Prof., DSc., **Oleh Pushkarenko**, post-graduate
State University of Biotechnology, Kharkiv, Ukraine
e-mail: oleggranit10011987@ukr.net

Change in power and fuel consumption when engine cylinders are partially disabled in a wheeled vehicle

The provided calculation methodology enables the evaluation of how disconnected cylinders affect engine power, overall efficiency, and fuel consumption. The study establishes that disconnecting cylinders leads to a proportional decrease in engine power. This means that an engine generating 154,5 kW power reduces to 113,4 kW with two disabled cylinders and goes down to 70,3 kW when four cylinders are disconnected. Reducing fuel consumption is especially notable at idle, showing a 27% drop after disabling half of the cylinders. However, fuel efficiency declines as the engine load increases until it reaches zero at the engine load factor. Discrepancies between the experimental and calculated data on fuel consumption and power are minimal, at around 7-8% during maximum load. Diesel engines have the potential to improve efficiency by shutting down certain cylinders, but the actual fuel savings depend on several factors, including the number of active cylinders, engine configuration, load, and mechanical losses incurred by the shutdown cylinders.

A method for analyzing additional energy losses in the engine caused by forced and natural vibrations of motor-transmission systems in wheeled vehicles has been improved. The analysis utilizes the Meander function in the context of harmonic moment and Fourier series. This text describes a method for determining the power of mechanical losses and energy for pumping strokes, while considering changes in the temperature regime in disconnected engine cylinders at increased torque irregularity. It also determines the permissible number of disconnected cylinders, taking into account their effect on power and reliability of wheeled machines. This paper presents a method for evaluating the dependability of fundamental engine components in the context of increased torque irregularity resulting from the disconnection of some cylinders.

effective engine power, power change, engine, wheeled vehicle, cylinder shutdown, fuel consumption

Formulation of the problem. In road transportation, 25-30% of the transportation work volume is carried out with wheeled vehicles. During transportation operations, the duration of work reaches 50%. Waiting for a loading vehicle causes a downtime of 25-30% [1].

While performing transportation work, the wheeled vehicle engine operates mostly at low loads and in idle mode, resulting in low fuel combustion efficiency and low engine efficiency.

One way to enhance engine efficiency during low loads and idling is to deactivate certain engine cylinders [2, 3].

Analysis of recent research and publications. Upon reviewing the literature, it was determined that the claim that an engine can develop effective power equal to half of its rated value by turning off half of its cylinders without overloading the remaining cylinders is inaccurate. The power function's nonlinearity with respect to the number of operating cylinders is due to mechanical losses distributed among them. Disabled cylinders' losses are compensated by increasing the fuel supply to the operating cylinders.

V.V. Berezny developed a method to calculate an engine's effective power while operating with cylinder shutdown. This method determines the engine's ability to perform

without overloading the operating cylinders and the corresponding number of shutdown cylinders. The potential for increased efficiency by shutting down some cylinders is inherent in all diesel engines. [4] The actual fuel economy when operating based on the load characteristic relies on the number of operating cylinders, engine design and manufacturing features, load, and mechanical losses in the disabled cylinders [5].

Setting objectives. The purpose of this study is to enhance the performance of a motor-tractor engine by analyzing the power and fuel consumption when some cylinders are disconnected.

This entails completing the following objectives:

- developing the theoretical connections among the effective power, engine proficiency, and the number of disabled cylinders in a wheeled vehicle engine;
- determine the impact of disabled cylinders on the effective power of motor-tractor engines;
- identify the maximum reduction in fuel consumption resulting from disabled cylinders.

Presenting main material. When certain cylinders of the engine are deactivated during operation, the engine's indicator power decreases, leading to a reduction in both crankshaft speed and engine torque. To stabilize them at the same level, it is essential to boost the cyclic fuel supply to the active cylinders. With a higher fuel cycle supply in the active cylinders, the average indicator pressure increases and the combustion process is enhanced. It is crucial to determine the impact of cylinder shutdown on engine performance parameters without compromising crankshaft speed and load factor, specifically regarding:

- 1) engine power output;
- 2) fuel consumption at varying engine loads.

The hourly fuel consumption of an engine with partial cylinder shutdown $G_f^{i_{cyl}}$ can be calculated by considering the efficiency of the indicator $\eta_i^{i_{cyl}}$, effective power $N_e^{i_{cyl}}$, and mechanical loss power $N_{mlp}^{i_{cyl}}$.

$$G_f^{i_{cyl}} = \frac{3,6}{H_u \cdot \eta_i^{i_{cyl}}} \left(N_e^{i_{cyl}} + N_{mlp}^{i_{cyl}} \right), \text{ kg/h.} \quad (1)$$

The engine operates without cylinder shutdown based on the following parameters.

$$i_{cyl}^i = i_{cyl}^n + \Delta i_{cyl}, \quad (2)$$

where i_{cyl}^i – number of engine cylinders,

i_{cyl}^n – the number of operational engine cylinders when some of the others are inoperative;

Δi_{cyl} – number of disabled engine cylinders.

Indicator efficiency characterizes combustion in a cylinder. Changes in this efficiency can be determined by the engine's load characteristic without having to shut down the cylinders. This dependence $\eta_i = f(P_i)$ can be described accurately using a fourth-degree polynomial equation [6, 7].

$$\eta_i = a \cdot P_i^4 + b \cdot P_i^3 + c \cdot P_i^2 + d \cdot P_i + f, \quad (3)$$

where P_i – average indicator pressure, MPa;

a, b, c, d, f – empirical coefficients for a diesel engine at rated speed are determined as follows: $a = 0$; $b = 1,44$; $c = -2,02$; $d = 1,34$; $f = 0$.

According to the Abel-Ruffini theorem, algebraic equations with a degree of five or higher cannot be solved by radicals, but they can be solved by other means.

The theorem does not claim that a general equation of degree five does not have solutions. If we include complex solutions, the fundamental theorem of algebra assures us of the existence of solutions. The Abel-Ruffini theorem states that it is impossible to find a closed formula for solutions to equations of degree greater than four, meaning that any formula containing only arithmetic operations and roots of arbitrary degree cannot exist. However, it is possible to obtain solutions using numerical methods, specifically utilizing Newton's method, which allows for an accurate solution to be obtained to any degree.

The Abel-Ruffini theorem doesn't claim that a general equation with n greater than $n \geq 5$ has no solution. If complex solutions are considered, the basic algebraic theorem ensures the existence of solutions. The theorem's crux is that there's no closed formula for solutions, involving only arithmetic operations and arbitrary roots, for equations of degree more than four. Numerical methods, such as Newton's method, can provide precise solutions to these equations with any desired level of accuracy.

Expression (3) can be written in the following form.

$$n_i = b \cdot (P_i - x_1)(P_i - x_2), \quad (4)$$

where

$$x_1 = -\frac{\sqrt{c^2 - 4 \cdot a \cdot e \cdot b + c}}{2 \cdot b}; \quad (5)$$

$$x_2 = \frac{\sqrt{c^2 - 4 \cdot e \cdot b - c}}{2 \cdot b}. \quad (6)$$

The average indicator pressure equals the total of the averaged mechanical loss pressure and the averaged effective engine pressure

$$P_i = P_{mlp} + P_e, \quad (7)$$

where P_{mlp} – conditional average pressure of mechanical losses of the engine,

P_e – conditional average effective engine pressure.

The average pressure attributable to mechanical losses of the engine under conditions where some of the cylinders are disconnected can be calculated using the following method

$$P_{mlp}^{i'} = k_m \cdot P_{mII}^{i'} \frac{i'_{cyl}}{i''_{cyl}}, \text{ MPa}, \quad (8)$$

where k_m – coefficient change in mechanical losses when some cylinders are shut down,

$$k_m = \frac{i''_{cyl}}{i'_{cyl}} \cdot M_1 + \frac{\Delta i_{cyl}}{i'_{cyl}} \cdot M_2 \cdot \Delta_{mlp}, \quad (9)$$

where M_1 – the coefficient which considers the alterations in mechanical losses within operating cylinders (when the load on them increases because of the shutdown of certain cylinders);

M_2 – the coefficient considers the alteration in mechanical losses during cranking without fuel supply and characterizes the change in friction losses;

Δ_{mlp} – the coefficient reflects the proportionate shift in mechanical losses of disabled cylinders versus the mechanical loss capacity of engine cylinders without shutdowns. Cylinders can be disabled through different methods: disconnecting the fuel supply alone or

eliminating pumping losses in the cylinder-piston group (CPG) in addition to fuel supply shut-off. Fuel supply shutdowns alone can also disable cylinders.

$$\Delta_{mlp} = 1 - \Delta_{fp} - \Delta_t, \quad (10)$$

where Δ_{fp} – the percentage of mechanical losses that are used by the fuel pump drive;
 Δ_t – losses from changes in temperature balance.

When fuel is disconnected and pumping losses are eliminated in the CPG through the introduction of a bypass valve into the combustion chamber

$$\Delta_{mlp} = 1 - (\Delta_{fp} + \Delta_t + \Delta_{ps}), \quad (11)$$

where Δ_{ps} – share of losses on pumping strokes in a diesel engine $\Delta_{fp} = 3\%$, Δ_{HX} – up to 7% reduction in output per cylinder disabled, $\Delta_t = 10 - 15\%$.

When fuel is disconnected and pumping losses are eliminated by introducing a bypass valve into the combustion chamber and the engine design allows disconnecting the timing drive, the mechanical power losses of the disconnected cylinders will follow this distribution

$$\Delta_{mlp} = 1 - (\Delta_{fp} + \Delta_t + \Delta_{ps} + \Delta_{gdm}), \quad (12)$$

where Δ_{gdm} – the portion of losses attributed to the operation of the drive mechanism in gas distribution.

Let's introduce the name of the percentage of disabled cylinders

$$D_{cyl} = \frac{\Delta i_{cyl}}{i_{cyl}}; \quad (13)$$

$$\frac{i_{cyl}''}{i_{cyl}'} = 1 - D_{cyl}. \quad (14)$$

When determining the average pressure of mechanical losses, it is common to use only their dependence on speed [8, 9]

$$P_{mlp} = a + b \cdot n. \quad (15)$$

where a and b – empirical coefficients for each motor.

Let's make the following assumptions: $M_1 = 1$ i $M_2 = 1$, which is quite acceptable since we are studying engine operation at idle and light loads. The assumptions made mean that as the engine load increases, the power and average pressure of the mechanical losses are assumed to remain unchanged, so that when operating under load, the parameters of the mechanical losses are determined by the same relationships. Taking into account (13) and (14), we obtain

$$k_m = 1 - D_{cyl} (1 - \Delta_{mlp}). \quad (16)$$

Equation (16) shows that the coefficient of change of mechanical losses during cylinder shutdown is directly proportional to the fraction of cylinders shut down. The conditional mean pressure of mechanical losses during cylinder shutdown is obtained by substituting (14) into (8)

$$P_{mlp}^{i_{cyl}''} = \frac{P_{mlp}^{i_{cyl}'} \cdot k_m}{1 - D_{cyl}}. \quad (17)$$

The average effective pressure when a portion of the cylinders are shut down depends on the percentage of cylinders that are shut down

$$P_e^{i_{cyl}} = \frac{P_e^{i_{cyl}}}{1 - D_{cyl}}. \quad (18)$$

The average indication pressure of the motor, taking into account (17) and (18), is expressed as follows

$$P_e^{i_{cyl}} = \frac{P_e^{i_{cyl}} + P_{mlp}^{i_{cyl}} \cdot k_m}{1 - D_{cyl}}, \text{ MPa}. \quad (19)$$

The effective power of the motor can be expressed by the motor load factor K_z , the degree of change in the speed of rotation K_n and rated power

$$N_e = K \cdot K \cdot N \text{ kW}; \quad (20)$$

$$K_n = \frac{n}{n_{nom}}, \quad (21)$$

where n – the current value of the engine crankshaft speed,
 n_{nom} – rated speed of engine crankshaft.

$$K_z = \frac{M}{M_{nom}}, \quad (22)$$

where M – current value of motor torque,
 M_{nom} – motor torque value at rated operation.

To determine the maximum effective power of the engine with the cylinders shut off, it is suggested to use the coefficient of variation of the maximum effective power k_{PN}

$$k_{PN} = \frac{N_e^{i_{cyl} \max}}{N_e}, \quad (23)$$

where $N_e^{i_{cyl} \max}$ – maximum engine power achieved through partial cylinder shutdown while maintaining a constant speed and maximum fuel supply;

N_e – rated motor power.

Maximum engine power is achieved at maximum hourly fuel consumption. In this case, it is assumed that the indicated power of one operating cylinder does not change when part of the other cylinders are shut off. The effective engine power when part of the cylinders are shut off is expressed as

$$N_e^{i_{cyl}} = N_{in}^{i_{cyl}} \frac{i_{cyl}^n}{i_{cyl}^i} - N_{mlp}^{i_{cyl}} \cdot k_m. \quad (24)$$

The maximum effective power with partial shutdown depends on the rated horsepower of the engine

$$N_e^{i_{cyl} \max} = N_e \left(\frac{1 - D_{cyl}}{\eta_{m \max}^{i_{cyl}}} - k_m \left(\frac{1}{\eta_{m \max}^{i_{cyl}}} - 1 \right) \right). \quad (25)$$

The coefficient in brackets reflects the change in maximum effective power when the cylinders are deactivated

$$k_{PN} = \frac{1 - D_{cyl}}{\eta_{m \max}^{i_{cyl}}} - k_m \left(\frac{1}{\eta_{m \max}^{i_{cyl}}} - 1 \right). \quad (26)$$

Substituting equation (16) into equation (26), we obtain

$$k_{PN} = 1 - D_{cyl} \left(1 + \Delta_{mlp} \left(\frac{1}{\eta_{m \max}^{i_{cyl}}} - 1 \right) \right) \tag{27}$$

The maximum effective power of an engine can be determined by the proportion of excluded cylinders in relation to the coefficient of change in the maximum effective power k_{PN} , as shown in formula (24)

$$N_{e \max}^{i_{cyl}} = k_{PN} \cdot N_e \tag{28}$$

The formula (1) determines the fuel consumption when some of the cylinders are shut down. The hourly fuel consumption can be estimated when the engine cylinders are turned off by using the coefficient of change in hourly fuel consumption k_{G_f}

$$k_{G_f} = \frac{G_f^{i_{cyl}}}{G_f} \tag{29}$$

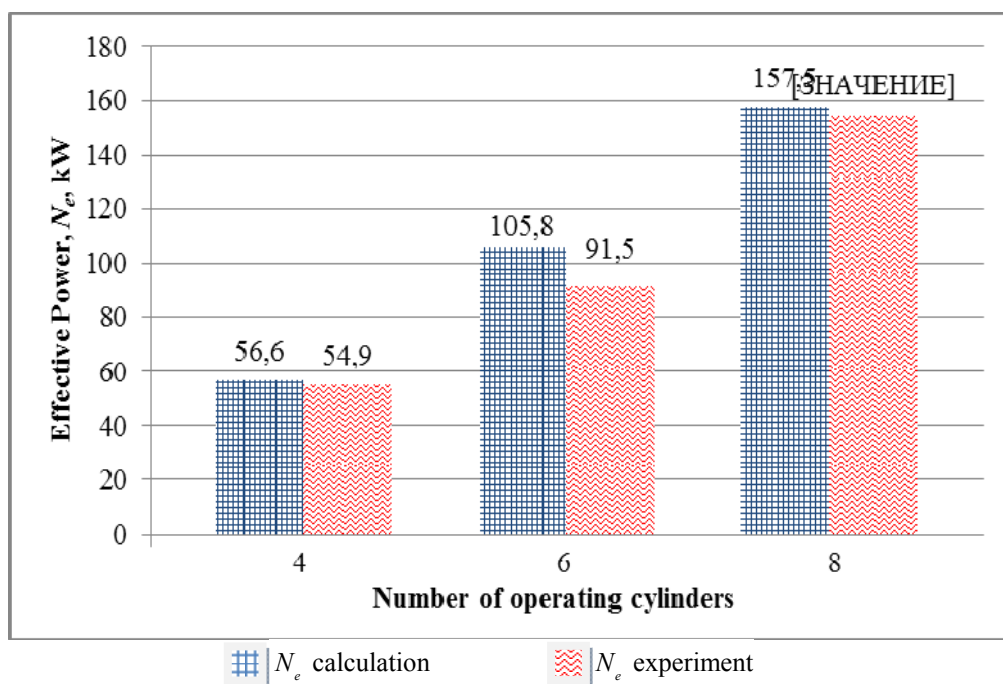


Figure 1 – Shows the comparison between calculated and experimental values for the maximum power of a diesel engine based on the number of operating cylinders
 Source: developed by the author

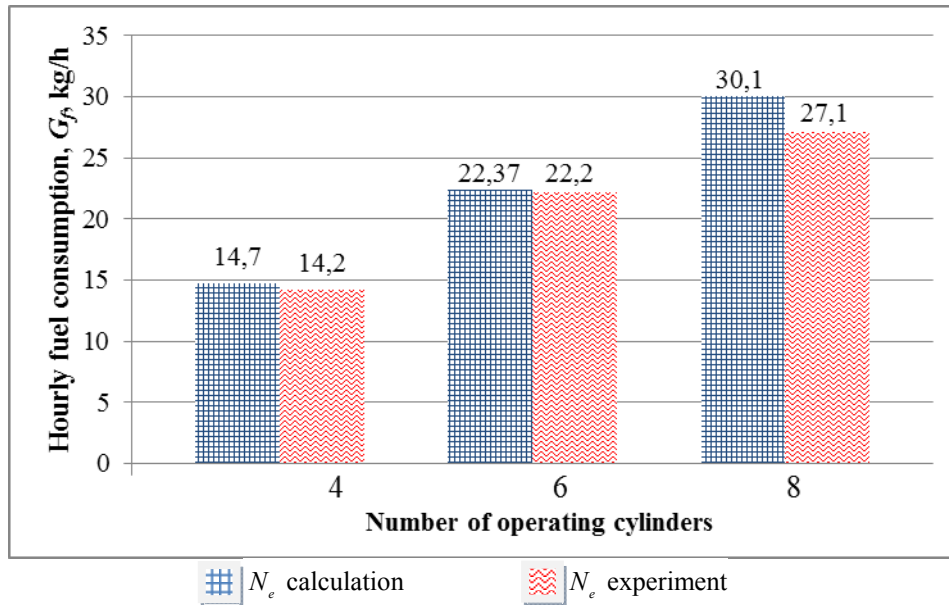


Figure 2 – Shows a comparison between the calculated and experimental data for hourly engine fuel consumption at maximum power with partial cylinder shutdown
 Source: developed by the author

As a result of transforming expression (29) with consideration for principles (1, 4, 5, 6, 21), we achieve the following improved text

$$k_{G_f} = \frac{(P_i - x_1)(P_i - x_2)}{\left(P_i - \frac{x_1}{k_{pi}}\right)\left(P_i - \frac{x_2}{k_{pi}}\right)} \cdot \frac{1 - D_{cyl}}{k_{pi}}, \quad (30)$$

where k_{pi} – an indicator pressure coefficient characterizes the change in pressure within operating cylinders while maintaining effective engine power.

$$k_{pi} = \frac{P_i^{i_{cyl}}}{P_i} = \frac{1 - D_{cyl} (1 - \Delta_{mlp}) (1 - \eta_m)}{1 - D_{cyl}}. \quad (31)$$

The fuel consumption when deactivating some of the cylinders is determined by an expression

$$G_f^{i_{cyl}} = G_f^{i_{cyl}} \cdot k_{G_f}. \quad (32)$$

Figure 1 displays the results of the analysis and testing to determine the maximum effective power with four engine cylinders deactivated. The data reveals a proportional decrease in power as the number of operating cylinders decreases.

Figure 2 displays fuel consumption data obtained from both calculated and experimental determinations when some cylinders are deactivated.

Based on the results presented in Figure 1, the average difference between experimental and calculated data for determining power and fuel consumption is no more than 7-8%.

Conclusions.

1. The calculation methodology developed enables the evaluation of engine power and fuel economy following the disconnection of any number of cylinders.

2. It has been determined that engine power diminishes correspondingly with the number of inactive cylinders. For a diesel engine, the power output drops from 154,5 kW to 113,4 kW when two cylinders are deactivated, and to 70,3 kW when four cylinders are deactivated.

3. The idle state records the highest reduction in fuel consumption, wherein 27% reduction occurs by disabling half the cylinders.

4. Fuel efficiency declines with increasing engine load and reaches zero at the engine load factor. The disparity between the fuel consumption and power calculated values and the experimental values is no more than 7-8% at full load.

List of references

1. Vinoth B., Univ A. Technology for Cylinder Deactivation. *Society of Automobile Engineers (SAE). College of Engineering, Guindy, Anna University*, 2005. Technical paper number: 2005-01-0077. P. 6. <https://doi.org/10.4271/2005-01-0077>
2. Cylinder cutout with sequential turbocharging gives 50 percent power increase. *II Modern power system*. 1982., Vol. 11, No. 3. P. 40-43.
3. Leone T. G., Pozar M. Fuel economy benefit of cylinder deactivation - sensitivity to vehicle application and operating constraints. *SAE Technical Paper*. The article 2001-01-3591.
4. Кущий П. В. Поліпшення експлуатаційних показників транспортних засобів в неусталених режимах оптимізацією способу регулювання дизелів : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.22.20 / НТУ. Київ, 2015. 206 с. http://diser.ntu.edu.ua/Kutsyi_dis.pdf
5. Molodan A., Polyanskii A., Potapov N. Cause and investigative failure analysis in nominal engine operation and partial disabling of cylinders. *Транспорт, екологія – устойчиво развитие: Сборник доклади XXVI научно –техническа конференция с международно участие, 8-10 Октомври 2020*. Варна: Технически университет, 2020. Vol. 1, No.. 27. С. 132-137.
6. Молодан А. О. Наукові основи забезпечення надійності і функціональної стабільності колісних машин в режимі відключення частини циліндрів : дис. на здобуття наук. ступеня д-р техн. наук : 05.22.20 / ХНАДУ: Харків, 2021. 387 с. https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_Vchena_rada/VR_64_059_02/dis_Molodan.pdf
7. Molodan A. , Polyanskyi O. , Potapov M. Change of power and mechanical losses of a wheel vehicle engine with cylinders cutout. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2018. Vol. 20, Issue 1, P. 99-103.
8. New Methods and Systems for Monitoring the Functional Stability Parameters of Wheel Machines Power Units / Podrigalo M. et al. *SAE Technical Paper*. The article 2020-01-2014. . <https://doi.org/10.4271/2020-01-2014>
9. Polyanskii A., Molodan A., Potapov M. Influence on the engine power and flow fuel of the wheel car of the cylinder parts disconnection. *Транспорт, екологія – устойчиво развитие: Сборник доклади XXV научно –техническа конференция с международно участие, 16-18 Май 2019*. Варна: Технически университет, 2019. Vol. 1, No. 26. P. 160-165.
10. Молодан А. О. Визначення потужності та роботи двигуна в процесі розгону колісної машини. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки*. 2019. Вип. 201. С. 202-208.

References

1. Vinoth, B. & Univ, A. (2005). Technology for Cylinder Deactivation. *Society of Automobile Engineers (SAE). College of Engineering, Guindy, Anna University*, Technical paper number: 2005-01-0077. P. 6 <https://doi.org/10.4271/2005-01-0077> [in English].
2. Cylinder cutout with sequential turbocharging gives 50 percent power increase. (1982). *II Modern power system. Vol. 11, No. 3*, P. 40-43 [in English].
3. Leone, T. G., & Pozar, M. (2001). Fuel economy benefit of cylinder deactivation - sensitivity to vehicle application and operating constraints. *SAE Technical Paper*. The article 2001-01-3591. <https://doi.org/10.4271/2001-01-3591> [in English].
4. Kutsiy, P. V. (2015). Polipshennia ekspluatatsijnykh pokaznykiv transportnykh zasobiv v neustalenykh rezhymakh optymizatsiieu sposobu rehulivannia dyzeliv [Improvement of operational indicators of

- vehicles in unstable modes by optimizing the method of regulating diesel engines]. *Candidate's thesis*. http://diser.ntu.edu.ua/Kutsyi_dis.pdf [in Ukrainian].
5. Molodan, A. O., Polyanskiy, O. S., & Potapov, M. M. (2020). Cause and investigative failure analysis in nominal engine operation and partial disabling of cylinders. *Транспорт, екологія – устойчиво розвитие: Сборник доклади XXVI науко –техніческа конференция с международно участие, 8-10 Октомври 2020*. Варна: Технически университет, *Vol. 1, No. 27*, P. 132-137 [in English].
 6. Molodan, A. (2021). *Naukovi osnovy zabezpechennia nadijnosti i funktsional'noi stabil'nosti kolisnykh mashyn v rezhymi vidkliuchennia chastyny tsylindriv* [Scientific bases of ensuring the reliability and functional stability of wheeled machines in the mode of disconnection of part of the cylinders]. *Doctor's thesis* https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_Vchena_rada/VR_64_059_02/dis_Molodan.pdf [in Ukrainian].
 7. Molodan, A. O., Polyanskiy, O. S., & Potapov, M. M. (2018). Change of power and mechanical losses of a wheel vehicle engine with cylinders cutout. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, Vol. 20, Issue 1*, P. 99-103 [in English].
 8. New Methods and Systems for Monitoring the Functional Stability Parameters of Wheel Machines Power Units (2020) / Podrigalo M. et al. *SAE Technical Paper*. The article 2020-01-2014. <https://doi.org/10.4271/2020-01-2014> [in English].
 9. Polyanskii, A., Molodan, A., & Potapov, M. (2019). Influence on the engine power and flow fuel of the wheel car of the cylinder parts disconnection. *Transport, ekologiya – ustoichyvo razvytye: Сборник доклади XXV науко –техніческа конференция с международно участие, 16-18 Май 2019*. Варна: Технически университет, *Vol. 1, No. 26*, P. 160-165 [in English].
 10. Molodan, A. (2019). *Vyznachennia potuzhnosti ta roboty dvyhuna v protsesi rozghonu kolisnoi mashyny* [Determination of engine power and operation in the process of acceleration of a wheeled machine]. *Visnyk Kharkivsk'oho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva imeni Petra Vasylenka. Tekhnichni nauky – Bulletin of the Petro Vasilenko Kharkiv National Technical University of Agriculture. Technical sciences, 201*, 202–208 [in Ukrainian].

А.О. Молодан, проф., д-р техн. наук, **О.С. Полянський**, проф., д-р техн. наук, **Є.О. Дубінін**, проф., д-р техн. наук

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

М.П. Артёмов, проф., д-р техн. наук, **О.Ю. Пушкаренко**, асп.

Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна

Зміна потужності та витрати палива при частковому відключенні циліндрів двигуна в колісному транспортному засобі

Наведена методика розрахунку дозволяє оцінити вплив відключених циліндрів на потужність двигуна, загальну ефективність та витрату палива. Дослідження показало, що відключення циліндрів призводить до пропорційного зниження потужності двигуна. Це означає, що потужність двигуна потужністю 154,5 кВт знижується до 113,4 кВт з двома відключеними циліндрами і падає до 70,3 кВт при відключенні чотирьох циліндрів. Зменшення споживання палива особливо помітне на холостому ході - на 27% після відключення половини циліндрів. Однак паливна ефективність знижується зі збільшенням навантаження на двигун, поки не досягає нуля при коефіцієнті завантаження двигуна. Розбіжності між експериментальними та розрахунковими даними по витраті палива та потужності мінімальні і становлять близько 7-8% при максимальному навантаженні. Дизельні двигуни мають потенціал для підвищення ефективності за рахунок відключення певних циліндрів, але фактична економія палива залежить від декількох факторів, включаючи кількість активних циліндрів, конфігурацію двигуна, навантаження і механічні втрати, що виникають у відключених циліндрах.

Розроблено вдосконалений метод аналізу додаткових енергетичних втрат у двигуні, спричинених впливом вимушених і власних коливань моторно-трансмісійних систем колісних транспортних засобів. Використано функцію Меандра в контексті гармонійного моменту та ряди Фур'є. Запроваджено метод визначення потужності механічних втрат та енергії на насосні ходи, що враховує зміни температурного режиму у відключених циліндрах двигуна за підвищеної нерівномірності крутного моменту. Визначено допустиму кількість відключених циліндрів, що враховує вплив на потужність і надійність роботи колісних машин. Представлено метод оцінювання надійності базових деталей двигуна в контексті збільшення нерівномірності крутного моменту при відключенні частини циліндрів.

ефективна потужність двигуна, зміна потужності, двигун, колісний транспортний засіб, відключення циліндрів, витрата палива

Одержано (Received) 20.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 30.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

Olexandr Polyanskyi, Prof., DSc., **Yevhen Dubinin**, Prof., DSc., **Andrii Korobko**, Assoc. Prof., DSc., **Vladyslava Baidala**, assistant
Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine
e-mail: dubinin-rmn@ukr.net

Improving the quality of wheeled vehicle stability assessment using constraint theory

The article considers the problem of assessing the stability of wheeled vehicles, which is an important characteristic that affects traffic safety and the economic performance of wheeled vehicles. The paper analyzes existing decision-making algorithms using the theory of constraints in assessing the stability of wheeled vehicles, considering five types of logic trees and establishing rules for their application to analyze the dynamic stability of vehicles. It was found that these algorithms have limited accuracy due to the lack of consideration of all factors that affect the stability of wheeled vehicles, or cannot take these factors into account with sufficient accuracy. Based on this, rules for using logical trees for a more accurate study of the stability of wheeled vehicles have been developed, which allow taking into account more factors that affect the stability of wheeled vehicles with greater accuracy.

Using the solutions obtained in this work, it is possible to significantly expand the scope of measurements, allowing for a more objective analysis of vehicle parameters in various operating conditions. A study was conducted to evaluate the accuracy of the developed rules using various data sets, which included information on the parameters of wheeled vehicles and the results of dynamic stability tests. The results of the study showed that the developed rules can significantly improve the accuracy of assessing the stability of wheeled vehicles.

Recommendations for improving the quality of tests for the dynamic stability of wheeled vehicles have been developed, which relate to the choice of test parameters and data processing methods. It is emphasized that the use of the theory of constraints can significantly improve the quality of tests for the dynamic stability of wheeled vehicles by providing appropriate approaches and methodologies to improve this process.

The research results presented in this article are important for improving traffic safety and economic efficiency of wheeled vehicles.

wheeled vehicle, theory of constraints, test improvement

Formulation of the problem. Much attention is being paid to improving the quality of vehicle stability tests. The application of constraint theory is becoming one of the key areas for achieving high standards in testing, which affects the safety and reliability of road transport. The theory of constraints, which is based on the identification and management of the main constraints in the system, allows to identify the critical aspects that determine the stability of the vehicle position. The research is aimed at considering the practical aspects of implementing high-precision test methods using constraint theory. This is a necessary step to increase the efficiency and reliability of vehicle testing, which is important in the context of rapid technological progress and development of the road transport industry.

Analysis of recent research and publications. In [1], the author argues that true quality improvement is impossible without in-depth knowledge based on an understanding of the theory of cognition, knowledge of variation, an understanding of psychology, and understanding of the system. The author of [2, 3] has developed an approach to continuous improvement called the Theory of Constraints (TOC), which demonstrates the application of TOC logical techniques. This approach allows analyzing the reasons that keep the system from developing and developing a plan for its improvement. The author of [4, 5] describes five sequential steps developed by Goldratt that help to focus efforts on what will allow the entire system to be reorganized as soon as possible. The author of [6] discusses the concept of the

theory and its principles, as well as examines the prescriptions, namely the five guiding steps.

Setting objectives. The aim of the work is to improve the algorithm for effective assessment of the stability of wheeled vehicles using the application of logical trees in the study of dynamic stability of vehicles.

Achieving this goal involves solving the following tasks:

- to analyze existing decision-making algorithms using the theory of constraints to assess the sustainability of wheeled vehicles;
- to establish clear and effective rules for the use of logic trees for a more accurate study of the stability of wheeled vehicles;
- to develop recommendations for improving the quality of tests for the dynamic stability of wheeled vehicles.

Presenting main material. In general, any system can be defined as a set of interconnected interdependent components or processes that interact, purposefully transforming the initial components (inputs) into a certain result (output). Systems influence the external environment and are subject to its influence. Obviously, quality (or lack thereof) does not exist in itself. Quality can only be discussed in the context of the system to which it is inherent. So, following Deming's reasoning, it is impossible to improve quality without a clear understanding of the system. He developed a 14-point "quality roadmap" that serves as a guide to achieve continuous improvement in process organizations. Many other theories based on the principle of continuous improvement also offer similar guidelines for success. It expands on the "...act to make the transformation happen" [1] by encouraging organizations to involve every employee, train everyone in the new philosophy, create a "critical mass" of like-minded people, and form initiative groups or teams to improve systems and processes.

TOC is a theory with recommendations, meaning that it can not only explain what factors keep a system from unlocking its potential, but also indicate how to act [2, 3]. Many theories answer the first question: what is the problem? Some can even provide specific advice, but usually these concepts focus exclusively on individual processes, not on the system as a whole. And they do not address the concept of system limitations at all.

Deming, using the term "transformation", actually means the introduction of significant changes in the functioning of the organization [7]. Goldratt's theory of constraints also focuses on changes and improvements. Following its principles, we can answer the three main questions it poses: What to change? (What is the limitation?); What to change to? (What to do with the limitation?); How to make changes? (How to get rid of the limitation?). It should be borne in mind that this question requires a systemic approach, not limited to looking at individual processes. While the answers may affect individual steps, they are formulated to identify where to focus efforts for overall system improvement. Processes have their place, but ultimately, the success or failure of organizations is driven largely by their functioning as a system as a whole.

It should be remembered that TOC and Total Quality Management (TQM [8]) are not mutually exclusive. Rather, TOC fills in the gaps that TQM has never paid due attention to: where to focus improvement efforts to achieve the maximum and fastest results. In other words, by using TOC in addition to TQM, the problem of waiting for results is solved. By effectively using TOC in conjunction with TQM, it is possible to find that TQM and quick results do not have to be mutually exclusive. Therefore, one should not abandon the TQM tools. In some cases, traditional quality management techniques can be very useful, as TOC will help decide when and how to use each of them most effectively.

Operational theories are usually divided into descriptive and prescriptive. Descriptive theories, such as the law of attraction, explain why a phenomenon occurs, but do not tell us what to do in this case. Prescriptive theories go further, not only describing but also advising

how to act. TOC is a prescriptive theory, but before we look at its prescriptive parts, let's look at its descriptive aspect. Goldratt argues that the basis for the prescriptive part of the theory is a set of several principles. Table 1 provides an extensive list of principles that are particularly important.

Table 1 – Some principles of TOC derived from the fundamental ideas of the theory of constraints [1]

1. When implementing transformations and resolving conflicts, it is better to rely on systemic thinking rather than analytical thinking.
2. The effectiveness of optimal system solutions decreases over time as the environment changes. A continuous improvement process is required to keep track of the relevance and effectiveness of the solution.
3. When the system as a whole is operating at its maximum efficiency, only one of its elements is operating at its maximum capacity. The fact that all parts of the system are operating at the limit of their capabilities does not mean that the entire system is operating efficiently. The optimal state of a system does not consist of the optimal states of its individual elements.
4. Systems are like chains. Every system has a weakest link, which ultimately reduces the effectiveness of the entire system.
5. Strengthening any non-restrictive element does not make the chain stronger.
6. In order to make deliberate, reasonable changes, it is necessary to understand the current state of the system, its goals and the nature of the existing problems.
7. Most undesirable phenomena in a system are caused by several genuine problems.
8. Real problems are usually implicit. They manifest themselves as a series of undesirable phenomena connected by cause and effect relationships.
9. Eliminating individual undesirable phenomena gives a false sense of security, while the real cause remains undetected. Solutions of this kind are short-lived. Solving the key problem simultaneously eliminates all related undesirable phenomena.
10. The key problems are usually exacerbated by the underlying hidden conflict. To solve the problem, it is necessary to identify the main causes of the conflict and get rid of at least one of them.
11. System limitations can be both physical and organizational. Physical limitations are relatively easy to identify and eliminate. Organizational constraints are usually more difficult to identify and remove, but their neutralization usually entails more significant and important changes than removing the physical constraints of the system.
12. Inertia is the worst enemy of continuous improvement. Decisions gradually become important, overgrown with a mass of auxiliary details, which hinders further transformations.
13. Ideas are not solutions.

Source: developed by the author

In TOC, the basic idea is to represent a system as a set of chains. This means that if the system functions as a chain, the weakest link can be identified and strengthened. Due to the interdependence and variability, optimization of individual elements does not guarantee optimal functioning of the system as a whole. Thus, the efficiency of each element of the system does not always reflect the efficiency of the system as a whole. Most of the constraints faced in systems have organizational rather than physical causes. Physical constraints are relatively easy to identify and eliminate, while organizational constraints are usually more difficult to identify and harder to remove. However, their elimination usually causes more visible and significant changes than getting rid of physical constraints.

There are five guiding steps of TOC, which begin the prescriptive part of the theory of constraints and help focus efforts on what will allow the entire system to be reorganized as quickly as possible [4, 9].

1) Find the system's limitations. What element of the system contains a weak link? Is it physical or organizational in nature?

2) Reduce the impact of the system limitation. What Goldratt means is that we should maximize the use of the link capacity that is currently the system constraint. In other words, to answer the question: "How can we squeeze the maximum out of the limiting element without significant additional costs and thereby mitigate the negative impact of the limitation on the operation of the entire system?"

3) Focus all efforts on the system's limiter. Once the constraint is found (step 1) and we decide what to do with it (step 2), we adjust the entire system so that the constraint works at maximum efficiency. We may need to slow down some parts of the system and speed up others. Then we analyze the results of our actions: do we find out whether this limitation still delays the work of the entire system? If not, we get rid of it and proceed to step 5. If so, the restriction still exists, and we move on to step 4.

4) Remove the restriction. If steps 2 and 3 are not enough to remove the restriction, then more radical measures are needed. Only at this stage can we realize the idea of large-scale changes to the existing system. This stage may require a significant investment of time, effort, money, and other resources, so we must be sure that it is not possible to get rid of the constraint in the first three steps. Removing the constraint implies that we will take any measures to remove the constraint. As a result, the limiting element will definitely be removed.

5) Return to the first step, keeping in mind the inertia of thinking. If the constraints are removed in steps 3 or 4, we must return to step 1 and start the cycle again. Our task is to identify the next element that holds the system back. This is exactly what happens in the production example (Fig. 1). The inertia warning reminds us that we should not be complacent and satisfied with what we have achieved: the cycle never ends. We should look for and eliminate constraints, constantly remembering that due to the interdependence and variability, every change we make to the system will have some impact on the constraints we have already gotten rid of earlier. It may be necessary to pay attention to them again and make appropriate adjustments.

The five guiding steps are directly related to the three questions about transformation (what to change, what to change to, how to implement the change) [9]. To understand what to change, we look for constraints (step 1). To figure out what changes are needed, we decide how best to weaken the constraint. We subject the entire system to our decision (steps 2 and 3). If this does not lead to improvement, we consider increasing the capacity of the weak link and removing the constraint entirely (step 4). In steps 3 and 4, we also specify "how to implement the change".

Most researchers ask themselves the following questions: "How do we know if the removal of a restriction has had a positive impact on the entire system?", which can be formulated differently: "How can we measure the impact of local solutions on the system as a whole?" In such cases, TOC is particularly effective.

Part of the answer is to identify the weakest link (limitation) and ignore, at least temporarily, what does not limit the elements [9]. For example, in the most serious laboratory studies, the effect caused by a change in one variable is measured, while holding the others constant as far as possible. This "sensitivity analysis" is particularly useful for determining how much a result depends on a particular cause. Doing the same thing in an organization (i.e., working only with the constraints), we win twice:

- Maximize system improvements with minimal resource expenditures;
- Know exactly how much the improvement of individual elements affects the entire system.

Goldratt has developed a simple method for assessing the effectiveness of a particular management decision aimed at achieving the overall goal of the entire system [9].

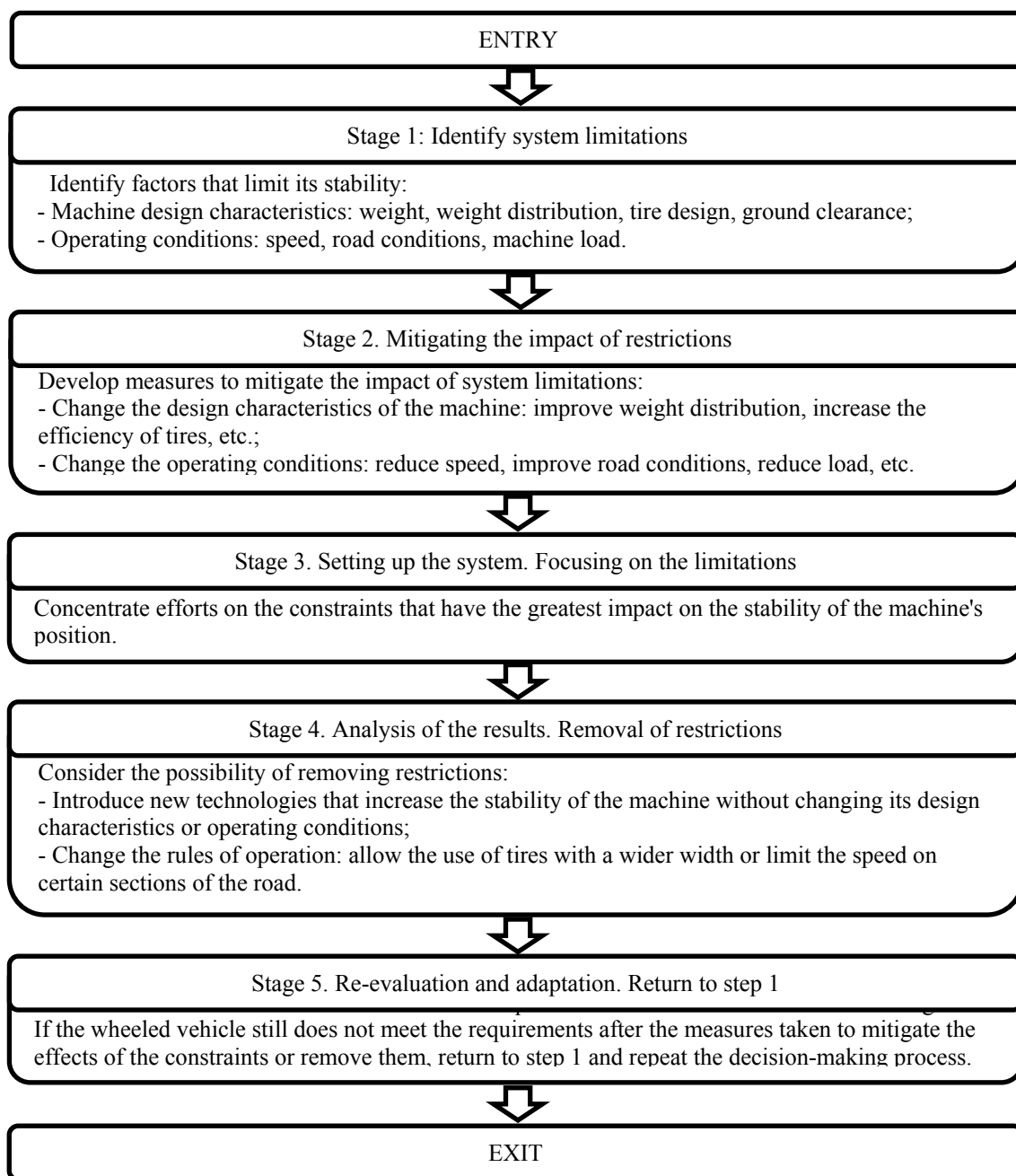


Figure 1 – Decision-making algorithm using the theory of constraints in assessing the stability of the position of wheeled vehicles

Source: developed by the authors

The theory of constraints is not only a theoretical concept, but a true paradigm and model that includes not only concepts that indicate the direction of recommendations and guidelines, but also its own methods and tools [6].

Initially, each TOC method is unique. Applying the theory to a new situation always leads to some unique solution. Often, some solutions become universal and are used as tools for transformation. The tools developed by Goldratt for the theory of constraints (TOC) are based on logical principles. They include five types of logic trees and rules that define their structure:

1) The Current Reality Tree (CRT) is a tool for analyzing problems. It can be used to study the cause-and-effect relationships that determine the current situation [11]. The CRT starts with identifying the existing undesirable phenomena in the system and helps to

determine the real causes or the key problem that caused all the undesirable phenomena we are facing. The key problem is usually the constraint that we try to find using the five guiding steps tactic. The CRT tells us what exactly needs to be reorganized – it identifies the smallest, simplest change in the system that will have the greatest positive effect.

In research to improve the stability of wheeled vehicles, it is possible to use this method as a tool for iterative analysis and improvement of the system, continuing to refine and test changes. For example, by using CRT to analyze the dynamic stability of a vehicle, undesirable phenomena such as instability during sharp turns can be identified, and factors that affect stability at different speeds can be identified. The branches of the tree can then be examined, representing possible causes of the phenomenon, and iterative changes to the system, such as suspension optimization or tire parameters, can be implemented and tested for their effectiveness to gradually improve dynamic stability.

2) The Conflict Resolution Chart (CRC) is a tool that allows visualizing a conflict to better understand its causes and possible solutions. It is designed to remove hidden conflicts that usually underlie long-standing "chronic" problems [12]. The CRC is based on the belief that most real problems are caused by some kind of opposition or conflict that prevents the problem from being solved in the usual way; otherwise, it would have been solved long ago. The CRC can also serve as a "creative engine" that allows us to generate new ideas that can provide a "breakthrough" in solving old problems.

The CRC allows systematizing and identifying hidden conflicts that may be the root cause of problems with the transverse dynamic stability of the vehicle, which helps to find creative solutions to solve them. For example, by applying CRC to analyze the dynamic stability of a vehicle, a conflict between the need for high maneuverability and the need for stability at high speeds can be identified. By analyzing the impact of various technical solutions, one can try to find the optimal balance between these requirements to improve the overall dynamic stability of the vehicle. For example, it is possible to: increase the stiffness of the suspension to improve stability at high speeds; install a stability control system to help prevent skidding; develop a new type of tire that can provide more traction. The choice of a particular solution depends on the specific requirements for the vehicle.

3) The Future Reality Tree (FRT) serves two purposes [13]: first, it allows us to make sure that the action we are going to take will really lead to the desired results, and second, this diagram makes it possible to determine what negative consequences our intended action may cause. These two points are very important and useful: we can logically "test" the effectiveness of the intended actions before we spend time, effort, or resources on them. This way, we can avoid worsening the situation. By confirming the effectiveness of the new configuration of our system, this tool answers the question "what should we change?". The FRT diagram can also be an invaluable tool for strategic planning.

FRT for sustainability studies can be used to effectively plan and avoid negative consequences of implementing selected actions and monitoring their results in real-world conditions. If problems arise, an iterative approach can be applied, making adjustments to the selected strategies. This approach will make it possible to systematically plan and solve the problems of dynamic stability of wheeled vehicles, avoid negative consequences and ensure effective and safe changes in the design or parameters of the vehicle. For example, by using it to plan improvements to vehicle dynamics, it can be determined that changes in suspension geometry can improve lateral stability. As these changes are implemented, monitoring can be used to collect data on the impact on agility and stability and adjustments can be made to optimize results if necessary.

4) A transition tree (TT) helps to implement a decision when a course of action is decided [10]. It identifies what may hinder our actions and how best to overcome these

obstacles. It also allows us to establish the sequence of actions required to achieve the goal. This diagram half-answers the question "how to make changes?".

The TT can be used to effectively implement decisions and overcome obstacles in improving the dynamic lateral stability of a wheeled vehicle. This approach helps to create a clear and systematic action plan to realize improvements in vehicle dynamics and overcome obstacles to achieving the goal. For example, using the TT, it is possible to identify an obstacle in the form of resource constraints for the introduction of a new suspension technology. Using this method, alternative solutions can be considered and strategies can be selected that will effectively overcome this obstacle and lead to an improvement in the vehicle's lateral dynamic stability.

5) A transformation plan [10] provides detailed step-by-step instructions on how to implement solutions and the logical justification for each step. In essence, it is a detailed roadmap for achieving a certain goal, which complements the answer to the question "how to implement changes?".

A transformation plan can provide a systematic and detailed approach to improving dynamic lateral stability, taking into account all aspects and possible risks. For example, using a conversion plan to improve the dynamic lateral stability of a wheeled vehicle, it may be determined that replacing certain suspension components can improve stability. The plan includes steps for selecting the optimal components, developing detailed instructions for their installation, and a logical justification for the impact of these changes on overall dynamic stability.

Criteria for verification of logical constructions (CLCC) are a "logical connection" that unites all the listed diagrams [4]. In fact, these are eight provisions that can be used to check, prove or refute the correctness of the constructed causal relationships: clarity; presence of an assertion; presence of a causal relationship; sufficiency of the reason given; checking for an alternative reason; inadmissibility of substituting a cause for an effect; search for a verifying consequence.

We use the CFCs when creating diagrams to make sure that our initial premises are logical. We use Boolean diagrams to understand the logic in a holistic way. Logic trees can also be used to analyze logic trees and, most importantly, they help to express constructive criticism to opponents and avoid conflicts, i.e., come to mutual understanding.

Goldratt's five logical tools can be used individually or collectively as a clearly organized process of logical thinking or "thought process" [14]. The three basic management questions about the change can be answered by using the five logic tools as a whole. Table 2 shows the relationship between these tools and the change management questions.

Table 2 – How logic tools relate to the three management questions about change

Stage of the change process	A suitable logical tool
What to change?	The tree of current reality
What to change to?	Diagram of conflict resolution, tree of future reality
How to make changes?	Transition tree, transformation plan

Source: developed by the authors

Figure 2 shows a general picture of the relationship of tools as elements of a single logical thinking process. Quantitatively complex problems that cannot be quantified should be subjected to logical analysis first.

Thus, the theory of constraints can help to improve the quality of wheeled vehicle dynamic stability tests by meeting the following criteria:

1. Using the search for optimal research parameters, which can be carried out using the theory of constraints. The main idea is to set constraints on various system parameters, such as suspension parameters and chassis geometry, and search for optimal values of these parameters that maximize the dynamic stability of the vehicle. This will allow important

parameters and constraints to be systematically considered to ensure optimal values, aimed at improving parameter quality definition.

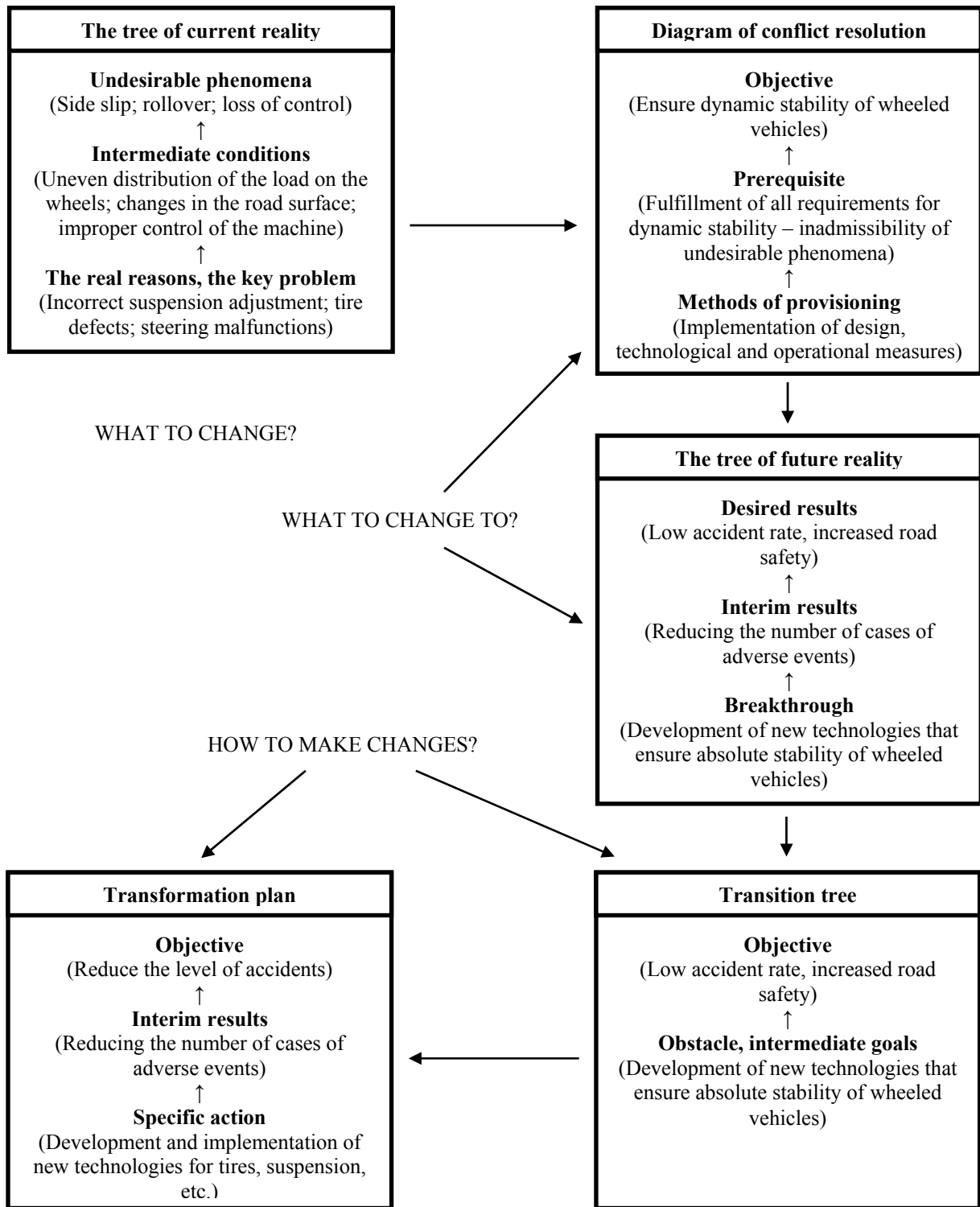


Figure 2 – Five logical tools as a single process of logical thinking

Source: developed by the authors

2. Modeling parameter variation, using an approach that will allow for parameter diversity and uncertainty in the study. Instead of fixing parameters to specific values, models allow them to vary within acceptable limits. This can be especially important in cases where parameters may change due to variations in production, different operating conditions, or other factors. This will allow for more realistic modeling of operating conditions, taking into account parameter variations that may occur in real-world conditions.

3. Development of a limited testing system, which, in combination with the use of the theory of constraints, involves the creation of a test method that takes into account the actual operating conditions of the vehicle and the limitations that may arise during its operation. This will allow for effective testing of vehicles conditions as close as possible to actual operation, ensuring compliance with restrictions and safety standards.

4. The use of innovative technologies, in particular the use of simulation and virtual testing in the field of vehicle stability research, which can greatly facilitate and improve the testing process. These are powerful tools for researching and improving the dynamic stability of vehicles.

5. Generalization of research results using the theory of constraints, which is important in order to draw conclusions that will be as characteristic as possible for real-world vehicle operating conditions. This approach will make the study more comprehensive and versatile, which in turn improves the quality of the results obtained and their application in real-world operating conditions.

Conclusions.

1. It is determined that the theory of constraints is an effective tool for improving the dynamic stability of wheeled vehicles. The methodology allows identifying system limitations, developing recommendations for their elimination or mitigation, and implementing these recommendations. Various measures can be used to improve the dynamic stability of wheeled vehicles, including: installation of directional stability systems, optimization of suspension stiffness, increasing track width, optimization of vehicle weight distribution, use of new materials and manufacturing technologies, and development of new vehicle dynamics control systems.

2. The application of the theory of constraints in the context of dynamic stability testing of wheeled vehicles can lead to such advantages as: improved test quality, increased test efficiency, and reduced test costs.

3. To improve the tests for dynamic stability of wheeled vehicles using the theory of constraints, the following measures can be used: using the search for optimal research parameters, modeling parameter variation, developing a limited testing system, using innovative technologies, and generalizing research results. Thus, the application of the theory of constraints can be an effective tool for improving the dynamic stability of wheeled vehicles, both in the design and production process and in the testing process.

List of references

1. Neave H. R. The Deming Dimension. SPC PRESS (Statistical Process Control); 1st Paperback Edition, 1990. 440 p. ISBN 978-0-945320-36-4.
2. Goldratt E. M., Cox J. The Goal: A Process of Ongoing Improvement. North River Press; 2nd Rev edition, 1992. 274 p. ISBN 0-88427-061-0.
3. Goldratt E. M. It's Not Luck. North River Press, 1994. 288 p. ISBN 0-88427-115-3.
4. Zosym M. Теорія обмежень. URL: <https://www.maxzosim.com/tieoriia-obmiezhien/>.
5. TOC (Theory of Constraints). DTU. URL: [http://wiki.doing-projects.org/index.php/TOC_\(Theory_of_Constraints\)](http://wiki.doing-projects.org/index.php/TOC_(Theory_of_Constraints)).
6. Колодізева Т. О. Використання принципів теорії обмежень при проектуванні логістичних систем. *Конкурентоспроможність та інновації: проблеми науки та практики: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*, 16 листоп. 2017 р. Харків: ФОП Лібуркіна Л.М., 2017. С. 145–148.
7. Thinking Processes as a Tool for Improving the Administrative Process / García-Vidal G. et al. *International Journal of Management Science and Business Administration*. 2016. Vol. 2, No. 7. P. 25–41.

- URL: <https://doi.org/10.18775/ijmsba.1849-5664-5419.2014.27.1003>.
8. Total Quality Management: Meaning, Concept, Process, Elements & Tools. *Economics Discussion*. URL: <https://www.economicsdiscussion.net/quality-management/total-quality-management/32329>.
 9. Dettmer W. H. Goldratt's Theory of Constraints: A Systems Approach to Continuous Improvement. Asq Pr; Later Printing edition, 1997. 378 p.
 10. Примостка О. Розумові процеси теорії обмежень Голдратта: системна методологія. *Науковий журнал «Економічний вісник Запорізької державної інженерної академії»*. 2017. № 5 (11). С. 31–36.
 11. Мороз Л. В. Нормативно-методичне забезпечення статистичного контролю виробничих процесів та якості продукції: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.01.02. Львів, 2016. 22 с.
 12. Діаграма конфлікту «Грозова хмара». *Громадська організація «Координаційно-правозахисна група «Zaslon»*. URL: <https://zaslon.at.ua/index/diagrama-konfliktu-grozova-khmara/0-62>.
 13. Problem-Solving With a Future Reality Tree. *Lucidspark*. URL: <https://lucidspark.com/blog/future-reality>.
 14. Theory of Constraints Concepts and Details. *Quality Assurance Solutions, Spreading the QA Word*. URL: <https://www.quality-assurance-solutions.com/Theory-of-Constraints.html>.

References

1. Neave, H. R. (1990). The Deming Dimension. SPC PRESS (Statistical Process Control); 1st Paperback Edition, 440 p. ISBN 978-0-945320-36-4 [in English].
2. Goldratt, E. M. & Cox J. (1992). The Goal: A Process of Ongoing Improvement. North River Press; 2nd Rev edition, 274 p. ISBN 0-88427-061-0 [in English].
3. Goldratt, E. M. (1994). It's Not Luck. North River Press, 288 p. ISBN 0-88427-115-3 [in English].
4. Zosym, M. (2023). Teoriia obmezhen' [Theory of constraints]. Retrieved from: <https://www.maxzosim.com/tieoriia-obmiezhien/> [in Ukrainian].
5. TOC (Theory of Constraints). *DTU*. Retrieved from: [http://wiki.doing-projects.org/index.php/TOC_\(Theory_of_Constraints\)](http://wiki.doing-projects.org/index.php/TOC_(Theory_of_Constraints)) [in English].
6. Kolodzieva, T. O. (2017). Vykorystannia pryntsyviv teorii obmezhen' pry proektuvanni lohistychnykh system [Using the principles of the theory of constraints in the design of logistics systems]. Competitiveness and innovation: problems of science and practice: *materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (16 lystopada 2017 roku) – materials of the International Scientific and Practical Conference*. (p.p. 145-148). Kharkiv: FOP Liburkina L.M. [in Ukrainian].
7. García-Vidal, G. et al. (2016). Thinking Processes as a Tool for Improving the Administrative Process. *International Journal of Management Science and Business Administratio*, Vol. 2, No. 7, P. 25-41. URL: <https://doi.org/10.18775/ijmsba.1849-5664-5419.2014.27.1003> [in English].
8. Total Quality Management: Meaning, Concept, Process, Elements & Tools. *Economics Discussion*. Retrieved from URL: <https://www.economicsdiscussion.net/quality-management/total-quality-management/32329> [in English].
9. Dettmer, W. H. (1997). Goldratt's Theory of Constraints: A Systems Approach to Continuous Improvement. Asq Pr; Later Printing edition, 378 p. [in English].
10. Prymostka, O. (2017). Rozumovi protsesy teorii obmezhen' Holdratta: systemna metodolohiia [Mental processes of Goldratt's theory of constraints: a systematic methodology]. *Naukovyi zhurnal «Ekonomicnyi visnyk Zaporizkoi derzhavnoi inzhenernoi akademii» – Scientific journal "Economic Bulletin of Zaporizhzhya State Engineering Academy"*, 5 (11), 31–36 [in Ukrainian].
11. Moroz, L. V. (2016). Normatyvno-metodychne zabezpechennia statystychnoho kontroliu vyrobnychykh protsesiv ta iakosti produktsii [Normative and methodical provision of statistical control of production processes and product quality]. *Candidate's thesis*. Lviv [in Ukrainian].
12. Diahrama konfliktu «Hrozova khmara» [Storm Cloud Conflict Diagram]. *Hromadska orhanizatsiia «Koordynatsiino-pravozakhysna hrupa «Zaslon» – Public organization "Coordinating and Human Rights Protection Group "Zaslon"*. Retrieved from URL: <https://zaslon.at.ua/index/diagrama-konfliktu-grozova-khmara/0-62> [in Ukrainian].
13. Problem-Solving With a Future Reality Tree. *Lucidspark*. Retrieved from URL: <https://lucidspark.com/blog/future-reality> [in English].
14. Theory of Constraints Concepts and Details. *Quality Assurance Solutions, Spreading the QA Word*. Retrieved from URL: <https://www.quality-assurance-solutions.com/Theory-of-Constraints.html> [in English].

О.С. Полянський, проф., д-р техн. наук, **Є.О. Дубінін**, проф., д-р техн. наук, **А.І. Коробко**, доц., д-р техн. наук, **В.Ю. Байдала**, асист.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

Підвищення якості оцінювання стійкості колісних машин використанням теорії обмежень

У статті розглянуто проблему оцінки стійкості колісних машин, яка є важливою характеристикою, що впливає на безпеку руху, а також на економічні показники експлуатації колісних машин. Проаналізовано існуючі алгоритми прийняття рішень за допомогою теорії обмежень при оцінці стійкості колісних машин, розглядаючи п'ять видів логічних дерев та встановлюючи правила їх застосування для аналізу динамічної стійкості транспортних засобів. Виявлено, що ці алгоритми мають обмежену точність, що пов'язано з відсутністю врахування усіх факторів, які впливають на стійкість колісних машин, або не можуть враховувати ці фактори з достатньою точністю. На основі цього розроблено правила застосування логічних дерев для більш точного дослідження стійкості колісних машин, що дозволяють враховувати більше факторів, які впливають на стійкість колісних машин, з більшою точністю.

Використовуючи отримані в роботі рішення, можна значно розширити обсяг вимірювань, дозволяючи здійснювати більш об'єктивний аналіз параметрів транспортних засобів у різних умовах експлуатації. Проведено дослідження для оцінки точності розроблених правил з використанням різних наборів даних, які включали інформацію про параметри колісних машин і результати випробувань на динамічну стійкість. Результати досліджень показали, що розроблені правила дозволяють істотно підвищити точність оцінки стійкості колісних машин.

Розроблено рекомендації для вдосконалення якості випробувань на динамічну стійкість колісних машин, які стосуються вибору параметрів випробувань і методів обробки даних. Підкреслено, що використання теорії обмежень може значно покращити якість випробувань на динамічну стійкість колісних транспортних засобів, надаючи відповідні підходи та методології для вдосконалення цього процесу.

Результати дослідження, представлені в статті, мають важливе значення для підвищення безпеки руху й економічної ефективності експлуатації колісних машин.

колісна машина, теорія обмежень, вдосконалення випробувань

Одержано (Received) 25.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 05.12.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 629.332

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.169-175](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.169-175)

Д.В. Абрамов, проф. д-р техн. наук

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

В.О. Тесля, канд. техн. наук, **А.Б. Гупка**, доц., канд. техн. наук, **М.Д. Сіправська**, асист.

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

e-mail: volodymyr_teslya@ukr.net

Вплив показників якості палива та технічний стан автомобіля під час руху

Досліджено вплив параметрів якості палива та технічного стану автомобіля в умовах експлуатації на стан двигуна та трансмісії. Виявлено, що ці фактори мають критичне значення під час маневру обгону, де недостатня потужність може вплинути на безпечність виконання даного процесу. Для боротьби з цими проблемами пропонується використовувати інтегральний коефіцієнт урахування технічного стану автомобіля та якості палива, який враховує різницю між новим, справним та автомобілем у поточному технічному стані. Запропонований коефіцієнт дасть можливість підвищити точність прогнозування потенційного прискорення автомобіля бортовою системою.

автомобіль, технічний стан, якість палива, інтегральний коефіцієнт врахування технічного стану, експлуатація, безпека руху

© Д.В. Абрамов, В.О. Тесля, А.Б. Гупка, М.Д. Сіправська, 2023

Постановка проблеми. Технічний стан автомобіля та якість палива враховують його динамічні характеристики, що мають ключове значення для безпеки руху на дорозі. В статті розглянуті аспекти впливу цих факторів на динаміку автомобіля під час проведення маневру обгону.

Стан двигуна та трансмісії автомобіля, а також якість використовуваного палива, мають безпосередній вплив на його динамічні характеристики. Під час виконання маневру обгону ці фактори стають критичними, оскільки недостатня потужність може перешкодити досягненню необхідного рівня прискорення, що є важливим для безпечного завершення маневру. У контексті роботи бортової системи запобігання зіткненню автомобілів, важливо враховувати ці зміни в динаміці руху, щоб підвищити точність оцінювання безпеки обгону, яка прогнозує максимально можливе прискорення автомобіля.

Розуміння причин, що впливають на зміну динамічних властивостей автомобіля, таких як використання палива неналежної якості та загальне погіршення технічного стану автомобіля, є критичним. Зниження динамічних характеристик може відбуватися поступово протягом тривалого періоду експлуатації або раптово у певний момент, залежно від таких факторів, як знос деталей, зміни у зазорах спряжень, або умов змащення. З іншого боку, використання палива низької якості зазвичай призводить до раптового зниження динамічних властивостей відразу після заправки. Таким чином, якщо бортова система контролю автомобіля фіксує зниження динамічних характеристик, необхідно перевірити чи не сталося це після різкого ступінчатого збільшення рівня палива у баку. Якщо таке збільшення мало місце, то ймовірно причиною зниження динаміки є використання палива низької якості. У протилежному випадку слід розглянути погіршення технічного стану автомобіля як основну причину.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження показників якості палива є важливим питанням яким займалися велика кількість науковців, вчених, інженерів та дослідників, таких як David A.G., Panagiotis A., Бажинов О.В., Мітков Б.В., Лебедев А.Т., Подригало М.А., Абрамов Д.В. та інші [1-5], які розглядали якість палива як параметр впливу на роботу двигуна, на ресурс деталей автомобіля, на динамічні показники, та показники напрацювання автомобіля. Також ряд провідних наукових центрів, університетів і автомобільних компаній проводять розширені дослідження, спрямовані на вивчення взаємодії між паливними характеристиками та технічним станом автомобілів. Також розроблені стандарти якості палива [6], які відображають відповідність екологічним та технічним вимогам. Встановленням параметрів якості займаються відповідні лабораторії та інститути [7, 8].

Багато наукових праць і публікацій присвячені аналізу впливу якості палива на роботу двигуна, ефективність споживання палива та загальний технічний стан автотранспорту. Дослідження включають аспекти зносу, забруднення системи живлення, вплив на викиди та інші аспекти. Дослідники часто аналізують фізичні та хімічні характеристики палива [2, 4-5]. Також науковці проводять дослідження, які включають оцінку ефективності згоряння палива, вивчення складу відпрацьованих газів та вплив їх на навколишнє середовище та на основі цих даних розробляють методи для поліпшення цього процесу, [1, 7-8].

Постановка завдання. Метою даної роботи є запропонування інтегрального коефіцієнта який враховує взаємозв'язок технічного стану автомобіля та якості палива. Цей коефіцієнт дає можливість покращити точність оцінки витрати палива на автомобілі при врахуванні технічного стану автомобіля та якості палива який полягає у покращенні точності розрахунку витрати палива автомобілем. Із врахуванням даного коефіцієнта у бортових системах можна досягти оптимізації витрат палива та із

врахуванням даних параметрів зменшити негативний вплив автотранспорту на навколишнє середовище.

Також запропонований коефіцієнт має допомогти більш точно визначати параметри автомобіля під час експлуатації, які допомогатимуть виконувати маневри автомобілем у транспортному потоці, особливо це стосується маневрів підвищеної небезпеки.

Виклад основного матеріалу. В умовах зростання цін на паливо і спільних зусиль спрямованих на зменшення викидів CO₂, вивчення впливу показників палива на роботу, технічний стан автомобілів стає ключовим для удосконалення енергоефективності.

Також дослідження впливу якості палива на роботу деталей та їх спрацювання, технічний стан та на збільшення тривалості служби транспортних засобів, може допомогти розробити стратегії для подовження терміну служби автомобільного парку.

Покращення якості палива дозволяє знизити викиди шкідливих речовин в атмосферу які призводять до забруднення повітря, кислотних дощів, парникового ефекту та інших проблем. Тому урахування якості палива та технічного стану автомобіля зведе до мінімуму кількість викидів шкідливих речовин та покращить якість екологічних показників автомобільного транспорту.

Інновації в паливній промисловості ведуть до зростання інтересу застосування альтернативних видів палива, що підкреслює актуальність вивчення впливу показників різних видів палива на технічний стан автомобілів. Вплив коефіцієнта запропонованого інтегрального коефіцієнта допоможе більш детально проводити визначення показників палива та технічного стану автомобіля.

Загальнонаціональні та міжнародні дослідження у цій галузі сприятимуть подальшому розвитку автомобільної техніки та створенню більш стійких і екологічно чистих транспортних засобів.

Для врахування технічного стану автомобіля та показників якості палива у роботі бортових систем автомобіля для виконання переміщення автомобіля у транспортному потоці та особливо при обгоні [9] рекомендується використовувати спеціальний коефіцієнт K_n . Цей коефіцієнт інтегрує оцінки технічного стану автомобіля та характеристик якості палива і може бути визначений як:

$$K_n = \frac{K_{n_n}}{K_{n_n}}, \quad (1)$$

де K_{n_n} – відношення загального споживання палива за визначений період часу T до обсягу роботи, виконаної двигуном нового автомобіля у справному технічному стані, який пройшов необхідну обкатку, використовуючи еталонне паливо, що відповідає всім критеріям та вимогам [6].

$$K_{n_n} = \frac{Q_n}{A_n}, \quad (2)$$

де Q_n – споживання еталонного палива протягом визначеного часового проміжку T автомобілем, який знаходиться в технічно справному стані та пройшов необхідний період обкатки;

A_n – обсяг роботи, здійсненої двигуном нового автомобіля в ідеальному технічному стані, який пройшов процес обкатки протягом визначеного часового періоду T при використанні еталонного палива;

K_{n_n} – співвідношення між загальним споживанням палива автомобілем в його поточному технічному стані протягом періоду часу T та обсягом роботи, яку виконав двигун, використовуючи заправлене паливо,

$$K_{n_n} = \frac{Q_n}{A_n}, \quad (3)$$

де Q_n – споживання палива протягом визначеного часового інтервалу T автомобілем у його поточному технічному стані;

A_n – обсяг роботи, виконаної двигуном автомобіля у поточному технічному стані протягом вказаного періоду часу T .

Якщо підставити вирази (2), (3) у формулу (1), отримаємо

$$K_n = \frac{Q_n \cdot A_n}{A_n \cdot N_n}. \quad (4)$$

Виходячи з припущення, що протягом короткого часового інтервалу ΔT потужність двигуна залишається незмінною $N_e = const$, роботу, яку виконав двигун протягом цього інтервалу, можна обчислити наступним чином [2, 5]:

$$\Delta A = N_e \cdot \Delta T. \quad (5)$$

Робота двигуна, що виконана за час T :

$$A_n = \Delta T \sum_{i=1}^{T/\Delta T} N_{e_{n_i}}; \quad (6)$$

$$A_n = \Delta T \sum_{i=1}^{T/\Delta T} N_{e_{n_i}}, \quad (7)$$

де $N_{e_{n_i}}$, $N_{e_{n_i}}$ – потужність двигуна, яка фіксується в i -тому інтервалі вимірювання ΔT , при використанні нового автомобіля в ідеальному технічному стані, який пройшов необхідний період обкатки і функціонує на еталонному паливі, а також при використанні автомобіля в його поточному технічному стані на заправленому паливі.

Отже, застосувавши вирази (6) та (7) до формули (4) і здійснивши необхідні перетворення, отримаємо рівняння для розрахунку коефіцієнта, який враховує технічний стан автомобіля та якість палива:

$$K_n = \frac{Q_n \cdot \sum_{i=1}^{T/\Delta T} N_{e_{n_i}}}{Q_n \cdot \sum_{i=1}^{T/\Delta T} N_{e_{n_i}}}. \quad (8)$$

Вибір часового проміжку T та інтервалу ΔT має відбуватися з урахуванням критеріїв мінімізації помилок у розрахунках. Оцінки потужностей $N_{e_{n_i}}$, $N_{e_{n_i}}$ – можна визначати за методикою, яка передбачає вимірювання з попереднім проведенням вибігу [10] або за методикою без попереднього проведення вибігу [11]. Величини Q_n та Q_n можна визначити за допомогою датчика миттєвого витрати палива, встановленого в паливній системі автомобіля [12].

В результаті аналізу виразів (4), (8) можна сформулювати наступне:

– якщо поточний технічний стан автомобіля збігається з станом нового, справного та обкатаного автомобіля, і якщо якість заправленого палива відповідає якості еталонного палива, тоді коефіцієнт K_n дорівнює одиниці ($K_n = 1$);

– якщо поточний технічний стан автомобіля є гіршим, ніж стан нового, технічно справного автомобіля після обкатки, і/або якщо якість заправленого палива не відповідає якості еталонного палива, тоді коефіцієнт K_n буде меншим одиниці ($K_n < 1$);

– якщо якість заправленого палива перевищує якість еталонного палива, при цьому технічний стан автомобіля залишається незмінним, коефіцієнт, що враховує технічний стан автомобіля та якість палива, може бути більше одиниці ($K_n > 1$).

Використання запропонованого інтегрального коефіцієнта K_n , який враховує технічний стан автомобіля та якість палива, сприятиме підвищенню точності прогнозування потенційного прискорення автомобіля бортовою системою запобігання зіткнень під час маневру обгону. Якщо бортова система фіксуватиме значне зниження коефіцієнта КТП незабаром після заправки, це може слугувати сигналом про невідповідність якості палива стандарту [6] і система може сповістити водія про необхідність прийняти відповідні заходи. У разі раптового падіння показника коефіцієнта K_n у моменти, не пов'язані з заправкою, бортова система може вказувати на погіршення технічного стану автомобіля та рекомендувати водієві провести більш глибоку діагностику транспортного засобу в сервісному центрі.

Висновки. 1. Розроблений коефіцієнт врахування технічного стану автомобіля та якості палива (K_n) є ефективним інструментом для підвищення точності оцінки технічного стану автомобіля, що дає можливість виконувати потрібні маневри під час руху.

2. Використання даного коефіцієнта може допомогти виявляти проблеми якості палива та зміни в технічному стані автомобіля, забезпечуючи водіїв та бортові системи достатньою інформацією для прийняття відповідних заходів. Запропонований коефіцієнт дасть можливість підвищити точність прогнозування потенційного прискорення автомобіля бортовою системою.

3. Дослідження в галузі якості палива спрямовані на удосконаленні технології виробництва, фільтрування та очищення палива.

Список літератури

1. Panagiotis Arkoudeas. Quality, Trends of Automotive Fuels. *Intech Open*. 2020. P. 97-119.
2. Бажинів О.В. Наукові основи оцінки ресурсу силових агрегатів транспортних машин з урахуванням умов експлуатації: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.22.20. Харків, 2001. 32с.
3. Ulberth-Buchgraber M., Charoud-Got J., Held A. Certified reference materials for effective automotive diesel fuel testing. *Fuel*. 2021. 286 (Part I). P. 119367.
4. Мітков Б.В., Мітков В.Б., Ігнат'єв Є.І., Лиса Ю.Ю. Вплив якості палива пропонуемого АЗС України на роботу двигунів внутрішнього згорання. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2013. Вип. 3, Т. 1. С. 40-50.
5. Тесля В.О. Підвищення безпеки використання автомобілів шляхом удосконалення методів оцінювання динамічних і енергетичних характеристик : автореф. дисертації на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.22.20. Харків, 2015. 20 с.
6. ДСТУ EN 14274:2014 Паливо автомобільне. Оцінювання якості бензину і дизельного палива. Система потокового контролювання якості палива (СПКЯП) (EN 14274:2003, IDT). [Чинний від 2015-04-01]. Київ, 2015. (Державний стандарт України).
7. Інститут споживчих експертиз. Інститут Споживчих Експертиз. URL: <https://expertise.in.ua/>.
8. Науково-дослідна лабораторія судових експертиз. Науково-Дослідна Лабораторія Судових Експертиз URL: <https://ndlse.com.ua/>.

9. Система запобігання зіткнення автомобілів при виконанні маневру обгону : пат. 86134 Україна, МПК G08G 1/16. № у 2013 09325 ; заявл. 25.07.2013 ; опубл. 10.12.2013, Бюл. № 23.
10. Спосіб визначення потужності двигуна автомобіля в експлуатації : пат. 80213 Україна, МПК G01L 5/13. № у 2012 07280 ; заявл. 15.06.2012; опубл. 27.05.2013 Бюл. № 10.
11. Спосіб визначення потужності двигуна автомобіля в експлуатації без попереднього проведення його вибігу : пат. 80214 Україна, МПК G01L 5/13. № у 2012 07283 ; заявл. 15.06.2012; опубл. 27.05.2013 Бюл. № 10.
12. Аналіз і класифікація засобів вимірювання витрати палива автотракторною технікою в умовах експлуатації / М.А. Подригало та ін. *Вісник СевНТУ. Збірник наукових праць. Серія: Машинобудування та транспорт.* 2011. Вип. 122. С. 73-77.

References

1. David Andrew Gauci & Panagiotis Arkoudeas. (2020). Quality and Trends of Automotive Fuels.. *Intech Open.* 97-119 [in English].
2. Bazhynov, O.V. (2001). Naukovi osnovy otsinky resursu sylovykh ahrehativ transportnykh mashyn z urakhuvanniam umov ekspluatatsii [Scientific bases of resource assessment of power units of transport vehicles taking into account operating conditions]. *Extended abstract of Doctor's thesis.* Kharkiv [in Ukrainian].
3. Ulberth-Buchgraber, M., Charoud-Got, J. & Held, A. (2021). Certified reference materials for effective automotive diesel fuel testing. *Fuel.* 286, 1, 119367 [in English].
4. Mitkov, B.V., Mitkov, V.B., Ihnat'iev, Ye.I. & Lysa, Yu.Yu. (2013). Vplyv iakosti palyva proponuiemoho AZS Ukrainy na robotu dvyhuniv vnutrishnoho zghorannia [The influence of the quality of fuel offered by gas stations of Ukraine on the operation of internal combustion engines]. *Naukovyj visnyk Tavrijs'koho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu Scientific bulletin of Tavriya State Agro-Technological University, 3,1,* 40-50 [in Ukrainian].
5. Teslia V.O. (2015). Pidvyshchennia bezpeky vykorystannia avtomobiliv shliakhom udoskonalennia metodiv otsiniuvannia dynamichnykh i enerhetychnykh kharakterystyk [Improving the safety of using cars by improving the methods of evaluating dynamic and energy characteristics]. *Extended abstract of Candidate's thesis.* Kharkiv [in Ukrainian].
6. Palyvo avtomobil'ne. Otsiniuvannia iakosti benzynu i dyzel'noho palyva. Systema potokovoho kontroliuvannia iakosti palyva (SPKYaP) [Automobile fuel. Assessment of the quality of gasoline and diesel fuel. Flow control system of fuel quality (SPKYaP)] (2015). *DSTU EN 14274:2014 from April 1, 2015.* Kyiv. Minregion Ukrainy [in Ukrainian].
7. Instytut spozhyvchykh ekspertyz. Instytut Spozhyvchykh Ekspertyz. Retrieved from URL: <https://expertise.in.ua/> [in Ukrainian].
8. Naukovo-doslidna laboratoriiia sudovykh ekspertyz. Naukovo-Doslidna Laboratoriia Sudovykh Ekspertyz. Retrieved from URL: <https://ndlse.com.ua/> [in Ukrainian].
9. Systema zapobihannia zitknennia avtomobiliv pry vykonanni manevru obhonu. (2013). *Patent no. 86134 Ukraina* [in Ukrainian].
10. Sposib vyznachennia potuzhnosti dvyhuna avtomobilia v ekspluatatsii (2013). *Patent no 80213 Ukraina* [in Ukrainian].
11. Sposib vyznachennia potuzhnosti dvyhuna avtomobilia v ekspluatatsii bez poperedn'oho provedennia joho vybihu (2013). *Patent no 80214 Ukraina* [in Ukrainian].
12. Podryhalo, M.A., Abramov, D.V. & Teslia V.O. (2011). Analiz i klasyfikatsiia zasobiv vymiriuvannia vytryaty palyva avtotraktornoiu tekhnikoju v umovakh ekspluatatsii [Analysis and classification of means of measuring fuel consumption by auto-tractor machinery in operating conditions]. *Visnyk SevNTU. Zbirnyk naukovykh prats'. Serii: Mashynobuduvannia ta transport - Bulletin of SevNTU. Collection of scientific papers. Series: Mechanical engineering and transport, 122,* 73-77 [in Ukrainian].

Abramov Dmytrii, Prof., DSc.,

Kharkiv National Automobile and Road University, Kharkiv, Ukraine

Volodymyr Teslia, PhD tech. sci., **Andriy Gupka**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Maria Sipravska**, assistant
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

Impact of Fuel Parameters on Vehicle Technical Condition During Operation

In this article, the importance of the interaction between fuel quality and the technical condition of the vehicle is examined to determine its dynamic characteristics and road safety. The research is based on the analysis of the impact of these factors on the vehicle during operation and maneuver execution, especially during overtaking maneuvers where having sufficient engine power reserve to achieve the required level of acceleration is crucial.

It is noted that understanding the reasons for changes in dynamic properties is critical, as a reduction in the engine power reserve of the vehicle can complicate the safe execution of overtaking maneuvers. The main focus of the work is placed on the necessity of considering these changes in the vehicle's mobility control systems.

The article also includes an analysis of recent research in the field of the interaction between fuel and the technical condition of the vehicle. Research in this area is aimed at understanding the interaction between fuel parameters and the technical characteristics of vehicles to make transportation more efficient, extend the service life of vehicles, and address environmental challenges.

The article concludes with findings that emphasize the effectiveness of the developed coefficient for considering the technical condition of the vehicle and fuel quality to enhance the accuracy of safety systems and predict the potential acceleration of the vehicle in traffic. The proposed coefficient will make it possible to increase the accuracy of predicting the potential acceleration of the car by the on-board system. Additionally, the possibility of using this coefficient to detect changes in fuel quality and the technical condition of the vehicle is discussed, providing drivers with information through onboard diagnostic systems and measurement complexes to take appropriate actions.

car, technical condition, fuel quality, integral factor taking into account technical condition, operation, traffic safety

Одержано (Received) 02.11.2023

Прорецензовано (Reviewed) 15.12.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 656.13

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.175-189](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.175-189)

В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: AulinVV@gmail.com

О.Л. Ляшук, проф., д-р техн. наук

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

e-mail: oleglashuk@ukr.net

А.В. Гриньків, ст. дослідник, канд. техн. наук, **С.В. Лисенко**, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Д.В. Міронов, доц., канд. техн. наук, **Л.М. Слободян**, доц., канд. техн. наук,

Р.М. Рогатинський, проф., д-р техн. наук

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

Оптимальний комплекс операцій технічного обслуговування і ремонту для підвищення надійності вузлів, систем та агрегатів мобільних машин

В роботі розглядаються удосконалення форм та методів організації систем технічного обслуговування і ремонту мобільних машин для підвищення їх надійності оптимізацією операцій діагностування та контролю технічного стану їх вузлів, систем і агрегатів.

В запропонованій централізованій системі технічного обслуговування і ремонту машин лежать принципи виробництва та характеризується широким використанням технологічних комплексів операцій системи технічного обслуговування і ремонту вузлів, систем, агрегатів і мобільних машин в цілому.

Здійснене порівняння методики реалізації запропонованої системи технічного обслуговування і ремонту та відомої у світі методики RCM (Reliability – centered Maintenance), орієнтованої на певний рівень надійності.

Наведено схеми технологічного процесу реалізації комплексу операцій технічного обслуговування і ремонту за одноетапним і багатоетапним контролем технічного стану вузлів, систем, агрегатів і мобільної машини в цілому.

© В.В. Аулін, О.Л. Ляшук, А.В. Гриньків, С.В. Лисенко, Д.В. Міронов, Л.М. Слободян, Р.М. Рогатинський, 2023

Розроблено алгоритм прийняття рішень для процесів комплексу операцій технічного обслуговування і ремонту. З'ясоване технологічне та інформаційне забезпечення комплексів операцій технічного обслуговування і ремонту вузлів, систем, агрегатів мобільних машин.

Виявлена роль оператора-діагноста щодо ймовірності отримання помилок 1-го і 2-го роду дефектів деталей, а також використання комп'ютеризованих робочих місць. Показано, як ці фактори впливають на рівень надійності вузлів, систем, агрегатів і мобільних машин в цілому.

надійність, мобільна машина, деталь, оптимізація, операція, технічне обслуговування і ремонт, діагностика, комп'ютеризоване робоче місце

Постановка проблеми. Ефективність використання мобільних машин (ММ) визначається методами підтримки їх вузлів, систем, агрегатів у працездатному стані в технологічному та транспортному режимах їх експлуатації. Необхідний рівень експлуатаційної надійності залежить від системи технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) [1-5].

На сьогодні існуючі форми та методи системи ТО і Р мобільних машин в Україні та за кордоном зводяться до наступних основних стратегій:

1. Планова система ТО і Р (Hard time maintenance and repair). Деталям, вузлам, системам, агрегатам ММ призначається встановлена межа напрацювання, яка обумовлює виконання операцій регламентного ТО або регламентного ремонту.

2. За технічним станом (On condition) – сутність даної стратегії ТО і Р полягає у підтримці ММ у справному стані в процесі періодичного або безперервного вимірювання і контролю параметрів. Величина відхилення їх від номінальних значень свідчить про характер несправностей вузлів, систем, агрегатів ММ. При цьому жорстких обмежень немає щодо їх напрацювання. Висновок про подальшу експлуатацію машин приймається за результатами контролю їх технічного стану.

3. За технічним станом та контролем рівня надійності (Condition monitoring). Дана стратегія ТО і Р включає комплекс заходів з управління надійністю, в який входять: аналіз відмов, конструктивні зміни, зміни у технології ремонтних робіт. За певним класом відмов ММ не допускається або знімається з експлуатації.

Планово-запобіжна система (ПЗС) ТО і Р прийнята в Україні, має високий рівень управління комплексами операцій ТО і Р. Вона відповідає наведеній вище стратегії Hard time maintenance and repair і є комплексом організаційно-технічних заходів, проведених за планом та спрямованих на забезпечення технічної справності та працездатності протягом терміну їхньої служби, за дотримання зазначених умов та режимів експлуатації ММ [6-8].

Відповідно до регламенту ПЗС, при попередженні відмов виконується комплекс технологічних операцій з ТО, а періодичність впливів по поточному ремонту (ПР) не планується, оскільки настання відмови носить імовірнісний характер.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Як свідчить практика, принципи ПЗС в технологічному і транспортному режимах експлуатації ММ працюють достатньо ефективно. В реальних умовах експлуатації спостерігається лінійна залежність між технічним станом ММ, їх вузлів, систем і агрегатів, і терміном експлуатації або напрацюванням на відмову (рис.1). Це можна твердити тільки для корозійних або ерозійних процесів, або при втомному зношуванні, тобто для поступових процесів спрацювання [9,10].

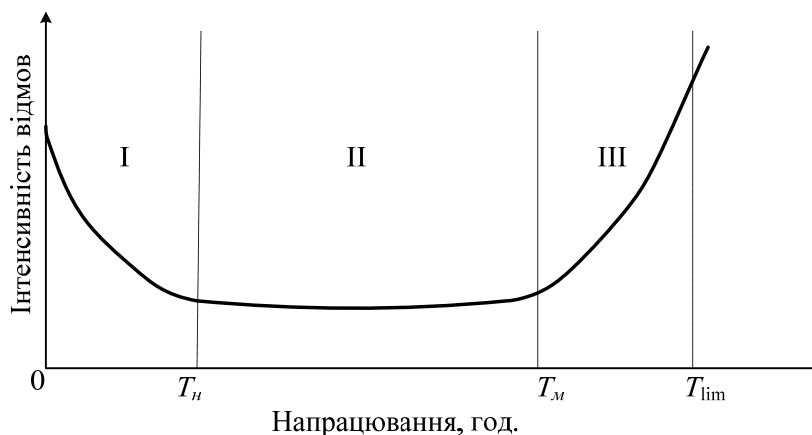


Рисунок 1 – Зміна параметра інтенсивності відмов вузла, системи, агрегату мобільних машин з напрацюванням на періодах припрацювання (I), нормальної експлуатації (II) та критичного зносу (III)
Джерело: розроблено авторами

Необґрунтоване розбирання спряжень деталей, вузлів, систем і агрегатів ММ, у процесі ремонту, зменшує реальний їх міжремонтний період на 15-30%. Це обумовлює скорочення ресурсу машин на 25...38% [11,12].

Статистична база значень показників надійності ММ свідчить про повторюваність номенклатури характерних відмов вузлів, систем і агрегатів та заміна їх ресурсовизначальних деталей. При цьому вибір стратегії очікування відмов значною мірою збільшує витрати на підтримку працездатності ММ. У агрегатах ММ, що надходять у капітальний ремонт, до 75...80% деталей мають допустимі для експлуатації рівні зносу [13,14].

Технічний стан ММ в процесі експлуатації змінюється і залишковий ресурс визначається тривалістю напрацювання або пробігом. Будь-яке спряження деталей, механізми ММ мають велику кількість допусків при проектуванні та конструюванні (проектно-конструкторські допуски), у виробництві (виробничо-технологічні допуски), а також допуски при експлуатації (експлуатаційні допуски). Це враховується під час ТО і Р проведення комплексу операцій. При реалізації процесів експлуатації вони мають різні параметри і характеристики та різні механізми. На експлуатаційні параметри і характеристики ММ, впливають наступні фактори: умови виготовлення; умови їх зберігання; умови транспортування; умови та режими експлуатації елементів і машин в цілому; технічне оснащення та кваліфікація обслуговуючих працівників; номенклатура та якість вироблених обслуговуючих і ремонтних впливів (сукупність процесів ТО і Р) [15,16].

Вузли, системи та агрегати ММ, що надходять до комплексу операцій ТО і Р, при однаковому напрацюванні в експлуатації можуть мати неоднакові залишкові ресурси. Це свідчить про те, що одночасність операцій ТО і Р є недоцільною [17].

Підтверджено, що, ПЗС є дуже витратною формою реалізації сукупності операцій ТО і Р, через відрядну систему оплати праці виконанням цих операцій. При цьому безпосередньо виконавці операцій ТО і Р зацікавлені у великих обсягах обслуговуючих і ремонтних впливів. Зазначене є суттєвою перешкодою для впровадження нових підходів до удосконалення системи ТО і Р [18,19].

З приходом ринкової економіки і появою приватних підприємств, ситуація з функціонуючим парком ММ навколо поглядів на комплекс операцій ТО і Р змінюється. Керівники приватних підприємств, після оцінки позитивних та негативних сторін ПЗС, починають шукати способи зниження витрат на комплекс операцій ТО і Р парку машин підприємства. При цьому до уваги беруться витрати та їх обґрунтованість з технічної,

технологічної та економічної точок зору. Також виникає необхідність у переході на більш ефективний і оптимальний комплекс операцій ТО і Р. Частково такий підхід використовується на підприємствах транспорту та агропромислового виробництва. На цих підприємствах формується стратегія ТО і Р за фактичним технічним станом і відповідає стратегії "On condition". Цей комплекс операцій ТО і Р є найбільш прийнятним варіантом, оскільки він базується на обсязі робіт, який визначається технічним станом вузлів, систем та агрегатів ММ. При впровадженні комплексу операцій ТО і Р ММ за фактичним технічним станом, економічний ефект може досягати 30% загальної вартості рухомого складу на підприємстві [20, 21].

В роботах [22,23] розкриваються основні принципи та особливості проектування комплексу технологічних операцій ТО і Р деталей, вузлів, систем і агрегатів ММ. За кордоном понад 20 років тому стали з'являтися системи, які являли собою цілісний автоматизований комплекс для підвищення ефективності завдань управління процесами ТО і Р на автотранспортних підприємствах (АТП).

В Німеччині в другій половині ХХ століття було відзначено спад обсягів виконуваних послуг з операцій ТО і Р ММ. В той час багато підприємств були змушені інтенсивно розширювати перелік послуг по виконанню комплексу операцій ТО і Р. Існуючі вільні авторемонтні підприємства (АРП), які, на відміну від фірмових, надавали послуги на виконання операцій ТО і Р автомобілів будь-яких марок [24]. На замовлення фірми Bosch розроблена система обробки бази даних по операціях ТО і Р та інформації, яка надійшла від вільних АРП. Ця система впроваджена на 300 підприємствах – партнерах фірми Bosch [24,25].

При розробці комплексу операцій ТО і Р, враховувалася потреба в тому, щоб система слугувала інструментом комунікації і надала великий обсяг інформації для АРП. Пакет програм інформаційної системи надавав доступ до бази даних і дозволяв створювати робочі листи, накладні, рахунки та інше. Крім того, користувач мав доступ до оновлюваного каталогу товарів фірми Bosch з вказанням цін. Якщо підприємство бажало співпрацювати з іншими компаніями, його дані також вносилися в інформаційну систему [26,27].

У Болгарії автоматизована система контролю (АСК), розроблена Софійським науково-дослідним технологічним інститутом автомобільного транспорту, була призначена для збору та обробки інформації з робочих постів щодо вимірювання контрольованих параметрів деталей, вузлів, систем та агрегатів мобільних машин (ММ). Інформаційна система підприємства передбачала підключення до одного комп'ютера восьми робочих постів. Кожен з цих постів мав можливість вимірювати до 16 контрольованих параметрів технічного стану вузлів, систем і агрегатів ММ. Відстань між постами становила приблизно 300 метрів, що відповідало вимогам щодо збору та обробки інформації. АРП регулярно здійснюють контроль технічного стану деталей ММ на ділянках дефектації та комплектації, а також під час ремонту, відновлення деталей та приймання нових деталей. [28,29].

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка методики підвищення рівня експлуатаційної надійності вузлів, систем, агрегатів та мобільних машин в цілому вибором оптимального комплексу операцій ТО і Р при одноетапному та багатоетапному контролі їх технічного стану та створенням комп'ютеризованих робочих місць на підприємстві при роботі ММ в технологічному і транспортному режимах.

Виклад основного матеріалу. Система ТО і Р ММ, в основі якої лежать принципи виробництва та характеризується широким використанням типових технологічних комплексів операцій, є централізованою системою ТО і Р за технічним

станом. Сутність системи ТО і Р полягає в наступному. За результатами діагностування, яке проводиться або до зняття вузлів, систем і агрегатів з ММ (перед його відправкою в ремонт), або на випробувальному стенді пропонується розроблений на підприємстві технологічний маршрут реалізації комплексу операцій (КО) ТО і Р. Звісно через невідповідність виявленого поєднання дефектів вузлів, систем і агрегатів ММ та номенклатури робіт технологічного маршруту КО, відбувається збільшення обсягів розбірно-складальних робіт. Збільшення обсягів комплексів операцій ТО і Р при цьому компенсується скороченням обсягу контрольних-діагностичних операцій (КДО) технічного стану вузлів систем і агрегатів ММ. Це обумовлюється тим, що не потрібно виявляти повний обсяг дефектів. Достатньо локалізувати або встановити відсутність тих дефектів, які визначатимуть технологічний маршрут КО ТО і Р.

Запропонована система ТО і Р, в основному, застосовується для підтримки ММ у технічно справному стані. Згідно цієї системи узгоджено управляють рядом операцій ТО і Р, логістичного сервісу, матеріально-технічного постачання, фінансами, якістю та трудовими ресурсами в межах єдиної стратегії ТО і Р, яка прийнята на підприємстві. Підприємства, в основному, орієнтуються на скорочення витрат на КО ТО і Р ММ без зниження рівня їх надійності. З іншої сторони здійснюється підвищення певних виробничих параметрів без збільшення витрат.

На підприємствах, які експлуатують і обслуговують ММ з'явився підхід інтегрованого управління операціями ТО і Р. Основне призначення зазначеного підходу і розроблених систем управління є планування діяльності персоналу, що займаються виконанням оптимального комплексу операцій ТО і Р та забезпеченням необхідними ресурсами. Крім того, ці системи вирішують ряд наступних завдань:

- управління тривалістю використання та функціонування ММ;
- оптимізація структури рухомого складу підприємства;
- характер зберігання інформації підприємства про технічний стан кожної ММ на сервері, їх відмови в процесі експлуатації, та виконаний обсяг операції ТО і Р;
- підтримка підрозділів підприємства, що реалізують маршрути КО ТО і Р ММ в межах єдиної стратегії ТО і Р.

В Україні і за кордоном у низці галузей промисловості, транспорту і агропромислового виробництва застосовуються технології інформаційної підтримки життєвого циклу ММ [30,31]. В основі яких лежать стандартизовані уявлення даних про ММ та передбачається фірмове сервісне гарантійне та післягарантійне обслуговування. Ці технології, як правило, включають наступні елементи системи управління надійністю ММ: збір відомостей про відмови; планові та аварійні ремонти; технічний стан деталей, вузлів, систем, агрегатів та ММ в цілому. Зазначене виявляється за допомогою спеціальних контрольних-діагностичних засобів.

Методи управління процесами і операціями ТО і Р ММ базуються на застосуванні методик технологічного обслуговування та ремонту, які орієнтовані на певний рівень надійності роботи ММ. Поряд з відомою в світі методикою RCM (Reliability - centered Maintenance) [22] пропонується методика підтримки ММ у працездатному стані, але головним при цьому є працездатність виробничої системи, або транспортної системи загалом, а не працездатність кожної її одиниці.

Даною методикою забезпечується надійне функціонування ресурсовизначальних елементів ММ, вихід з ладу яких спричинить негативні наслідки. Ці наслідки оцінюються за різними ризиками: зрив транспортно-виробничих планів; недотримання норм якості продукції та послуг; екологічні катастрофи та ін.

Запропонована методика реалізується наступними основними етапами:

1. Визначення меж підсистем, елементів між собою та в системі ТО і Р взагалі.

2. З'ясування функцій підсистем, елементів та системи ТО і Р.
3. Виявлення ресурсовизначальних елементів та підсистем за їх функціями.
4. З'ясування причин відмов в елементів, підсистем, систем та прогнозування і ймовірностей їх виникнення.
5. Побудова дерева вирішення проблем класифікації результатів відмов функціонально ресурсовизначальних елементів системи ТО і Р.
6. Вибір комплексу операцій для початкової програми ТО і Р ММ.
7. Якщо реально не встановлюються операції ТО і Р ММ, то комплекс операцій переглядається і оптимізується.
8. Розробка динамічної системи операцій ТО і Р ММ в результаті її оновлення шляхом моніторингу з систематичним контролем, збору та аналізу оперативних даних про технічний стан ММ, їх вузлів, систем і агрегатів.

Першим етапом використання запропонованої методики є визначення обмежень або меж підсистем і елементів. Це означає, що систему поділяють на підсистеми більш простішого рівня складності і на елементи.

Другим етапом є визначення ресурсовизначальних елементів в підсистемах.

На наступних етапах відбувається виявлення причин відмов ресурсовизначальних елементів та прогнозування ймовірності їх появи. Якісні та кількісні методи аналізу ризиків використовуються для виявлення причин та результатів відмови цих елементів. Усереднене напрацювання елементів, підсистем на відмову базується на компетентному аналізі за схемою "причина-відмова-наслідок".

Невід'ємною ланкою процесу визначення технічного стану вузлів, систем і агрегатів та діагностування в системі ТО і Р ММ є оператор-діагност. Ефективність КО ТО і Р значною мірою залежить від застосовуваних методів і засобів технічного діагностування.

Своєчасним виявленням несправності в процесі технічного діагностування можливо запобігти та зменшити негативні наслідки. Процедура виявлення несправностей при технічному діагностуванні представлена на рис. 2.

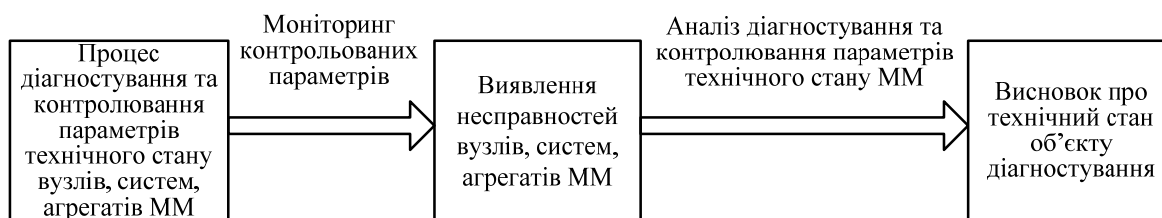


Рисунок 2 – Схема процедури виявлення несправностей в результаті моніторингу контрольованих параметрів технічного діагностування

Джерело: розроблено авторами

Можна бачити, що в технічній діагностиці всі знання зводяться до процесів моніторингу контрольованих параметрів і самого діагностування. Сюди входить визначення діагностичних параметрів, а також інформація, на підставі якої робиться висновок про реальний технічний стан ММ, як об'єкта діагностування.

В той час, якими б застарілими чи сучасними не були методи діагностування, найслабшою ланкою в людино-машинній системі є людина. Саме тому, на етапі технічного діагностування неминучі значні за величиною помилки 1-го роду "хибний дефект" та 2-го роду "перепустка дефекту" і, як наслідок, помилка маршрутизації при розподілі КО ТО і Р. Фактори, що впливають на постановку правильного діагнозу оператором-діагностом на етапі діагностування вузлів, систем і агрегатів ММ за їх КО ТО і Р представлені на рис. 3.

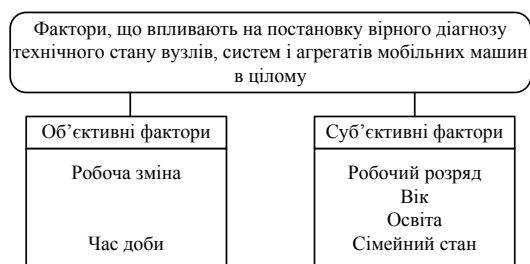


Рисунок 3 – Фактори, що впливають на постановку правильного діагнозу технічного стану вузлів, систем і агрегатів мобільних машин оператором-діагностом при комплексі операцій їх технічного обслуговування і ремонту

Джерело: розроблено авторами

Технологічний процес реалізації КО ТО і Р здійснюється за одноетапним та багатоетапним контролем. Кожен вузол, система і агрегат, що підлягає системі КО ТО і Р і одноетапному контролю, характеризуються поєднанням наявних у них дефектів (q -м) з множини Q ($q = 1, \dots, Q$), за результатами діагностування розподіляється на k -й з множини K ($k = 1, \dots, K$), при цьому $K < Q$.

За одним технологічним маршрутом КО ТО і Р можуть бути спрямовані вузли, системи і агрегати ММ зі схожими поєднаннями виявлених дефектів. Відповідно до призначених технологічних маршрутів ремонту, вузли, системи і агрегати направляють на комп'ютерні робочі місця (КРМ) (R множина, $r = 1, \dots, R$), яких достатньо щоб виконати річний обсяг робіт підприємства. Зазначимо, що на одному КРМ може виконуватися кілька технологічних маршрутів КО ТО і Р.

Якщо технічний стан агрегату ММ контролюється, то одноетапний контроль агрегату ММ виявляє помилки 1-го та 2-го роду. Це дає підстави порядку 26% агрегатів повертати з робочих місць на технічне діагностування. Виявлено, що достовірність розпізнавання технічного стану вузлів, систем і агрегатів ММ, а також правильності призначення КО технологічного маршруту, доцільне введення додаткових контрольних-діагностичних операцій безпосередньо в процесі їх розбирання. Це так званий операційний контроль розбірного процесу, який призводить до зниження до 17% повернення вузлів, систем, агрегатів ММ з комп'ютеризованих робочих місць і скорочення втрат від виконання зайвих та повторних операцій ТО і Р.

При багатоетапному контролі реалізації КО ТО і Р вузлів, систем і агрегатів ММ етап діагностування характеризується тим, що на ньому з'являється можливість локалізувати дефекти, які не піддаються виявленню. Часткове розбирання вузлів, систем і агрегатів дає можливість більш точно визначити їх технічний стан.

Під час розбирання вузлів, систем і агрегатів виконується діагностування, за результатами якого встановлюється правильність чи неправильність призначення КО ТО і Р. Якщо технологічний маршрут призначено правильно, то виконуються всі передбачені обслуговуючі та розбирально-складальні роботи. Після цього вузол, систему, агрегат направляють у приймальний контроль, для проходження обкатки або стендового випробування. В протилежному випадку результати діагностування дають можливість їх перенаправити на відповідний технологічний маршрут. Він виконується на цьому ж або на іншому комп'ютеризованому робочому місці. При цьому зняті з вузла, системи, агрегату деталі направляють на дефектацію, а на робочі місця безпосередньо подають необхідні комплекти деталей.

Якщо на етапі приймального контролю виявлені дефекти відремонтованих вузлів, систем і агрегатів ММ усуваються. Економічно доцільно на ділянці з випробування, доукомплектування і регулювання направляти їх у повторний ремонт. Якщо вузли, системи і агрегати відповідають технічним умовам приймання, то їх

відправляють на склад готової продукції або на видачу замовнику.

Технічна база КО ТО і Р використовує взаємозв'язки контрольованих параметрів, які оцінюють технічний стан вузлів, систем і агрегатів машин, і дефектами, що мають певні діагностичні ознаки. Виявлено, що більшість дефектів, які розпізнаються, виникають у вузлах, системах, агрегатах, мають певні діагностичні ознаки та параметри, які свідчать про наявність несправностей, що сприяють їх відмові. Періодичний моніторинг даних параметрів дозволяє вчасно виявити зміну технічного стану вузла, системи, агрегату ММ. У такому випадку необхідний КО ТО і Р буде проводитися тільки тоді, коли виникає реальна ймовірність виходу діагностичних параметрів за гранично допустимі межі технічного стану вузлів, систем, агрегатів і машин в цілому.

Існує велика різноманітність можливих стратегій ТО і Р ММ за станом. Деякі з них можна об'єднати у дві групи: з контрольованим рівнем надійності та контрольованими параметрами режимів технологічної та транспортної експлуатації. У першому випадку КО ТО і Р зводиться до управління рівнем надійності певної сукупності однотипних ММ, а в другому – до управління технічним станом кожної конкретної ММ.

Поступової реалізації завдань для переходу від ППС до системи ТО і Р за фактичним станом сприяють системи та програмні реалізації оптимального КО ТО і Р з використанням комп'ютеризованих робочих місць.

Використання АСК є особливо ефективним при комплектуванні деталей та призначенні маршрутів для відновлення зношених деталей, вузлів, систем, агрегатів ММ, оскільки прийняття рішення про технічний стан деталі, вузла, системи чи агрегату здійснювалося комп'ютером, що дозволяє знизити вплив суб'єктивного чинника під час розподілу по маршрутах КО ТО і Р.

Функціонал більшості комп'ютеризованих систем управління КО ТО і Р на підприємстві розширяється за рахунок додавання можливості логістичного сервісу складськими запасами та фаховим рівнем персоналу.

Алгоритм прийняття рішення для процесів КО ТО і Р показано на рис. 4, який використовується для класифікації результатів відмов.

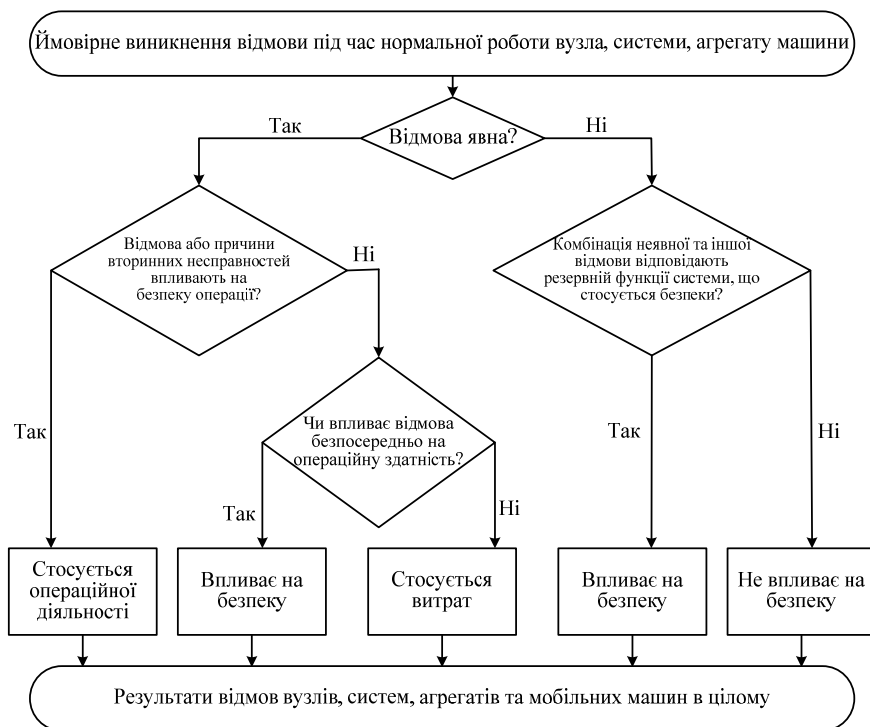


Рисунок 4 – Алгоритм прийняття рішення для процесів комплексу операцій технічного обслуговування і ремонту в запропонованій системі підвищення надійності

Джерело: розроблено авторами

Аналіз характеру і наслідків відмов, як і прийняття рішення, можуть бути успішними підходами під час вирішення завдань, з розстановкою пріоритетів усунення несправностей вузлів, систем, агрегатів, ММ в цілому.

Якщо ймовірність відмови була передбачувана ще під час нормальної експлуатації ММ, то дана відмова є явною, інакше вона класифікується як прихована відмова, що є ключовим фактором у питанні про ефективність системи ТО і Р.

На рис. 5 представлені складові технологічного та інформаційного забезпечення КО ТО і Р, які багато в чому визначають ефективність КО ТО і Р. На ефективність КО ТО і Р впливає і людський фактор. Він є причиною появи помилок 1-го (хибний дефект) роду та 2-го роду (пропуск дефекту). Це відбувається на етапі діагностування перед визначенням оптимальних операцій та маршрутів КО ТО і Р.

Забезпечення комплексів операцій ТО і Р вузлів, систем, агрегатів мобільних машин	Технологічне забезпечення	Технологічні карти надійності вузлів, систем, агрегатів
		Сукупність дефектів вузлів, систем, агрегатів, їх поєднання та аналіз
		Класифікація та структуризація дефектів та їх поєднань
		Формування комплексу операцій ТО і Р по усуненню дефектів
		Розробка типового комплексу операцій ТО і Р вузлів, систем, агрегатів та ММ в цілому
		Моніторинг ймовірнісно-статистичних характеристик параметрів технологічного процесу КО ТО і Р деталей, вузлів, систем, агрегатів мобільних машин
	Інформаційне забезпечення	Виявлені причинно-наслідкові зв'язки параметрів технічного стану вузла, системи, агрегату мобільних машин
		Апріорні сукупності контрольної-діагностичних операцій технічного діагностування вузлів, систем і агрегатів мобільних машин
		Моніторинг сучасних перспективних методів і засобів діагностування вузлів, систем і агрегатів мобільних машин
		Ймовірнісно-статистичні і вартісні параметри контрольної-діагностичних операцій технічного стану вузлів, систем, агрегатів мобільних машин
		Формування раціональних та оптимальних контрольної-діагностичних операцій ТО і Р технічного стану вузлів, систем, агрегатів мобільних машин

Рисунок 5 – Технологічне та інформаційне забезпечення комплексів операцій технічного обслуговування і ремонту вузлів, систем, агрегатів мобільних машин

Джерело: розроблено авторами

Виявлено, що розпізнавання помилок 1-го і 2-го роду оператором-діагностом залежить від їх робочого часу, з урахуванням розряду та віку (табл. 1 і табл.2).

Таблиця 1 – Закономірності зміни ймовірностей помилок 1-го роду оператором-діагностом протягом робочої зміни

Змінний робочий час, t , год	Ймовірність помилок 1-го роду, α				
	Розряд – 4; Вік - 58	Розряд – 4; Вік - 36	Розряд – 5; Вік - 55	Розряд – 5; Вік - 47	Розряд – 5; Вік - 39
8	0.0167	0.016	0.0155	0.015	0.0147
9	0.0188	0.0174	0.0163	0.0158	0.0155
10	0.021	0.0187	0.0172	0.0166	0.0162
11	0.0237	0.0204	0.0181	0.0172	0.0168
12	0.0264	0.0221	0.0192	0.0179	0.0174
13	0.0292	0.0238	0.0203	0.0185	0.018

Джерело: розроблено авторами

Дослідження показали, що діагностування несправностей полягає у виявленні та локалізації дефектів у деталях вузлів, систем і агрегатів. Через ускладнення вузлів, систем і агрегатів ММ, зростання вимог до безпеки, їх функціональний рівень надійності та екологічності діагностування несправностей стає значущою процедурою. При проведенні діагностики ММ, слід звернути увагу на потребу їх високої надійності та працездатності на низький рівень викидів появи дефектів.

Таблиця 2 – Закономірності зміни ймовірностей помилок 2-го роду оператором-діагностом протягом робочої зміни

Змінний робочий час, t , год	Ймовірність помилок 2-го роду, β			
	Розряд – 4; Вік - 58	Розряд – 5; Вік - 55	Розряд – 5; Вік - 39	Розряд – 4; Вік - 36
8	0.0139	0.012	0.0109	0.0103
9	0.0143	0.0125	0.0116	0.011
10	0.0148	0.0131	0.0124	0.0119
11	0.0152	0.0138	0.0131	0.0126
12	0.0156	0.0144	0.0138	0.0134
13	0.016	0.0148	0.0144	0.0142

Джерело: розроблено авторами

З'ясовано, що важливим для КО ТО і Р ММ є безперервний або періодичний контроль параметрів фактичного технічного стану об'єкта діагностування. Це дає можливість прогнозувати можливий технічний стан і рівень надійності вузла, системи, агрегатів і мобільної машини в цілому.

Що стосується прогнозування, то воно виконується при безперервному контролі визначення часу, технічного стану ММ протягом часу збереження працездатного стану. При періодичному контролі - визначення моменту часу наступного контролю технічного стану ММ.

Висновки. 1. Централізована система ТО і Р мобільних машин за фактичним технічним станом на даному підприємстві дозволяє суттєво знизити недовикористаний ресурс деталей вузлів, систем та агрегатів мобільних машин в технологічній і транспортній експлуатації. Це сприяє підвищенню надійності та ефективності використання мобільних машин на підприємстві.

2. Розроблена методика управління процесами і операціями ТО і Р вузлів, систем і агрегатів мобільних машин для підвищення рівня їх надійності. Визначено основні етапи її реалізації.

3. Виявлено, що на правильний діагноз технічного стану вузлів, систем і агрегатів мобільних машин оператором-діагностом при комплексі операцій ТО і Р, впливають об'єктивні (робоча зміна, час доби) та суб'єктивні (робочий розряд, вік та ін.) фактори.

4. Виявлені помилки визначення технічного стану та розподілу дефектних деталей вузлів, систем і агрегатів за конкретними технологічними маршрутами комплексу операцій технічного обслуговування і ремонту мобільних машин, або приводять до виконання зайвих обслуговуючих і ремонтних робіт на усунення пропущених або не виявлених дефектів. Це дозволяє повною мірою реалізувати переваги комплексів операцій ТО і Р.

5. Форми та методи організації маршрутів комплексів операцій ТО і Р на сьогодні ще остаточно не розроблені і не дозволяють в повній мірі використовувати їх переваги. Для достовірного розподілу комплексу операцій ТО і Р необхідна акумуляція великих обсягів статистичних даних і відповідне програмне забезпечення.

6. Визначено, що для зниження впливу людського фактора на результати діагнозу наявності або відсутності дефектів та розподілу вузлів, систем, агрегатів за технологічними маршрутами оптимальних комплексів операцій ТО і Р може сприяти розгляд системи ТО і Р, як штучної когнітивної системи.

Список літератури

1. Методи оцінювання якості технологічних процесів у системах автосервісу: монографія / Л.А. Тарандушка та ін. Черкаси: ЧДТУ, 2021. 212 с.
2. Сахно В.П., Іванушко О.М. Вплив умов експлуатації та системи технічного обслуговування і ремонту на технічний стан автотранспортних засобів. *Вісник Національного транспортного університету*. 2017. № 1. С. 363-372.
3. Ільченко В.Ю., Пономаренко Н.О. Дослідження пристосованості конструкції автомобіля до операцій технічного обслуговування. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2014. Вип. 148. С. 335-341.
4. Гриньків А.В., Аулін В.В. Елементно-модульна система технічного обслуговування і ремонту мобільної сільськогосподарської техніки. *Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики: зб. тез доповідей міжнар. наук.-практ. конф., Тернопіль, 29-30 вересня 2022, ТНТУ ім. І. Пулюя. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2022. С.103-104.*
5. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Лівіцький О.М. та ін. Принципи побудови та функціонування кіберфізичної системи технічного сервісу автотранспортної та мобільної сільськогосподарської техніки. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2020. №22. С. 162-174.
6. Ivanushko O. Optimization of the frequency of vehicle maintenance to prevent the majority of technical failures. *Systemy i srodki transportu samochodnogo. Seria: Transport*. 2019. No.18, P. 23-31.
7. Сахно В.П., Іванушко О.М. Коректування періодичності технічного обслуговування автотранспортних засобів з метою попередження більшості відмов. *Вісник Національного транспортного університету*. 2019. № 1. С. 167-177.
8. Технічна експлуатація та надійність автомобілів / Форнальчик Є.Ю., Оліскевич М.С., Мاستикаш О.Л., Пельо Р.А. Львів «Афіша», 2004. 492 с.
9. Аулін В.В., Лисенко С.В., Голуб Д.В., Гриньків А.В., Мартиненко О.Д. Теоретико-фізичний підхід до діагностичної інформації про технічний стан агрегатів мобільної сільськогосподарської техніки. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2015. Вип. 158. С. 252-262.
10. Кукурудзяк Ю. Ю. Аналіз методів і систем отримання інформації про технічний стан автомобіля. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія : Технічні науки*. 2012. Вип. 10(2). С. 106-109.
11. Сахно В.П., Іванушко О.М. Експертний аналіз причин зміни технічного стану автотранспортних засобів. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. 2018. Вип. 1 (40), С. 274-284.
12. Hacker L. Limitations of the Exponential Distribution for Reliability Analysis. *Reliability Edge*. 2001. № 3. P. 1-3.
13. Форнальчик Є.Ю., Будяну Р.Г. Обґрунтування початкових параметрів до імітаційного

- моделювання системи технічного обслуговування і ремонту військової автомобільної техніки. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил*. 2009. Вип. 2. С. 118-122.
14. Біліченко В.В., Крук В.П. Теоретичні основи оптимізації структури виробничої бази АТП по техніко-економічним критеріям. *Наукові нотатки*. 2012. Вип. 37. С. 23-26.
 15. Сахно В.П., Сакно О.П., Лисий О.В. Аналіз умов забезпечення працездатності автотранспортних засобів на основі удосконалення системи технічного обслуговування. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2015. Вип. 158. С. 144-149.
 16. Сахно В.П., Сакно О.П., Лисий О.В. До моделювання системи технічного обслуговування і ремонту автопоїздів. *Молодий вчений*. 2015. № 5(1). С. 54-57.
 17. Зуєв О. О. Спрощена метода логіко-імітаційного моделювання операцій технічного обслуговування мобільної техніки. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2013. Вип. 13, т.6. С. 158-165.
 18. Павленко В.М., Кужель В.П., Калашніков Є.В., Комар Д.П. Моделювання онтологій для організації технічного обслуговування автомобілів. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2019. № 1. С.89-97.
 19. Біліченко В.В., Романюк С.О. Системна модель проектного управління стратегіями розвитку організації автомобільного транспорту за етапами їх життєвого циклу. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2013. № 6. С. 102-107.
 20. Біліченко В.В., Цимбал С.В., Крещенецький В.Л., Мальченко В.Ю. Вдосконалення методики формування потужності зони поточного ремонту автомобілів. *Наукові нотатки*. 2018. Вип. 62. С.44-47.
 21. Одокієнко С.М., Тарандушка Л.А., Тарандушка І.П. Розробка системи параметрів для оцінки якості процесів технічного обслуговування і ремонту автомобілів. *Технологический аудит и резервы производства*. 2016. № 3/2 (29). С. 52-56.
 22. Reliability-Centered Maintenance (RCM) for Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance (C4ISR) Facilities. Technical Manual 5-698-2. – Washington, DC: Headquarters Department of the Army, 2006. 96 p.
 23. Key outcomes from Life Cycle Assessment of vehicles, a state of the art literature review Maarten Messagie, Cathy Macharis, Joeri. VanMierlo. Barcelona, Spain, November 17-20, 2013.
 24. Система контролю якості ремонту Bosch QualityScan: гарантія якості ремонту дизельних компонентів в авторизованих майстернях Бош Дизель Центр і Бош Дизель Сервіс. URL: <https://autodiesel.com.ua/news/sistema-kontrolyu-yakosti-remontu-bosch-qualityscan-garantiya-yakosti-remontu-dizelnih-komponentiv-v-avtorizovanih-majsternyah-bosh-dizel-tsentri-i-bosh-dizel-servis/> (дата звернення 28.11.2023).
 25. Rudnytskyi V. & Hadi A. Methodological tools for the implementation of information technology for expert assessment of the quality of heavy automobile equipment in the process of its exploitation. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2021. No 3(17). P. 69–77.
 26. Аулін В.В., Лисенко С.В., Мельничук С.В., Сорока Б.А. Інформаційне забезпечення системи технічного сервісу автомобілів в агропромисловому виробництві. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: зб. матеріалів XVI Міжнар. наук.-практ. конф., 23-25 жовтня 2023 року. Вінниця: ВНТУ, 2023. С.45-48.
 27. Форнальчик Є.Ю., Кочмар Р.Я. Основи технічного сервісу транспортних засобів. Львів: «Львівська політехніка», 2017. 324 с.
 28. Хаврук В.О., Пархоменко О.О. Методика розрахунку ефективності експлуатації вантажних автомобілів. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2021. No2 (17). С. 163-172.
 29. Іващенко О.В. Показники техніко-економічної ефективності машин. *Вісник ЖДТУ. Серія: Економічні науки*. 2012. № 3 (61). С. 235-237.
 30. Павленко В.М., Кужель В.П. Визначення можливості використання мультиагентного підходу при виконанні технічного обслуговування і ремонту автомобіля. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2018. № 1. С. 72-80.
 31. Сакно О.П., Колеснікова Т.М., Олло В.П. Моделювання прийняття рішень в системі технічного обслуговування автомобілів на основі математичних методів теорії нечітких множин. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. № 6. С. 70-76.

References

1. Tarandushka, L.A. et al. (2021). *Metody otsiniuvannya yakosti tekhnolohichnykh protsesiv u systemakh avtoservisu [Methods of assessing the quality of technological processes in car service systems]*. Cherkasy: ChDTU [in Ukrainian].

2. Sakhno, V.P. & Ivanushko, O.M. (2017). Vplyv umov eksploatacii ta systemy tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu na tekhnichnyj stan avtotransportnykh zasobiv [The influence of operating conditions and the maintenance and repair system on the technical condition of motor vehicles]. *Visnyk Natsional'noho transportnoho universytetu – Bulletin of the National Transport University, 1*, 363-372 [in Ukrainian].
3. l'chenko, V.Yu. & Ponomarenko, N.O. (2014). Doslidzhennia prystosovanosti konstruktsii avtomobilia do operatsij tekhnichnoho obsluhovuvannia [Study of the adaptability of the car design to maintenance operations]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil'skoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka – Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture, 148*, 335-341 [in Ukrainian].
4. Hryn'kiv, A.V. & Aulin, V.V. (2022). Elementno-modul'na systema tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu mobil'noi sil'skohospodars'koi tekhniky [Elemental and modular system of maintenance and repair of mobile agricultural machinery]. Processes, machines and equipment of agro-industrial production: problems of theory and practice: *Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia (29-30 veresnia 2022) - International scientific and practical conference (pp.103-104)* [in Ukrainian].
5. Aulin, V.V., Hryn'kiv, A.V., Lysenko, S.V., Livits'kyj, O.M. et al. (2020). Pryntsypy pobudovy ta funktsionuvannia kiberfizychnoi systemy tekhnichnoho servisu avtotransportnoi ta mobil'noi sil'skohospodars'koi tekhniky [Principles of construction and functioning of the cyber-physical system of technical service of motor vehicles and mobile agricultural machinery]. *Tekhnichnyj servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv – Technical service of agriculture, forestry and transport systems, 22*, 162-174 [in Ukrainian].
6. Ivanushko, O. (2019). Optimization of the frequency of vehicle maintenance to prevent the majority of technical failures. *Systemy i srodki transportu samohodnogo. Seria: Transport, No.18*, P. 23-31 [in English].
7. Sakhno, V.P. & Ivanushko, O.M. (2019). Korektuvannia periodychnosti tekhnichnoho obsluhovuvannia avtotransportnykh zasobiv z metoiu poperedzhennia bil'shosti vidmov [Adjusting the periodicity of maintenance of motor vehicles in order to prevent the majority of failures]. *Visnyk Natsional'noho transportnoho universytetu – Bulletin of the National Transport University, 1*, 167-177 [in Ukrainian].
8. Fornal'chuk, Ye.Yu., Oliskevych, M.S., Mastykash, O.L. & Pel'o R.A. (2004). *Tekhnichna eksploataciia ta nadijnist' avtomobiliv [Technical operation and reliability of cars]*. L'viv «Afisha» [in Ukrainian].
9. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Holub, D.V., Hryn'kiv, A.V. & Martynenko O.D. (2015). Teoretyko-fizychnyj pidkhid do diahnostychnoi informatsii pro tekhnichnyj stan ahreativ mobil'noi sil'skohospodars'koi tekhniky [A theoretical-physical approach to diagnostic information about the technical condition of mobile agricultural machinery units]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil'skoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka - Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture, 158*, 252-262 [in Ukrainian].
10. Kukurudziak, Yu.Yu. (2012). Analiz metodiv i system otrymannia informatsii pro tekhnichnyj stan avtomobilia [Analysis of methods and systems for obtaining information about the technical condition of a car]. *Zbirnyk naukovykh prats' Vinnyts'koho natsional'noho ahrarynoho universytetu. Serii : Tekhnichni nauky - Collection of scientific works of the Vinnytsia National Agrarian University. Series: Technical sciences, 10(2)*, 106-109 [in Ukrainian].
11. Sakhno, V.P. & Ivanushko, O.M. (2018). Ekspertnyj analiz prychnyn zminy tekhnichnoho stanu avtotransportnykh zasobiv [Expert analysis of the reasons for changes in the technical condition of motor vehicles]. *Visnyk Natsional'noho transportnoho universytetu. Serii «Tekhnichni nauky». Naukovo-tekhnichni zbirnyk – Bulletin of the National Transport University. Series "Technical Sciences". Scientific and technical collection, 1(40)*, 274-284 [in Ukrainian].
12. Hacker, L. (2001). Limitations of the Exponential Distribution for Reliability Analysis. *Reliability Edge, 3*, 1-3 [in English].
13. Fornal'chuk, Ye.Iu. & Budianu, R.H. (2009). Obruntuvannia pochatkovykh parametriv do imitatsijnoho modeliuvannia systemy tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu vijs'kovo avtomobil'noi tekhniky [Justification of the initial parameters for simulation modeling of the system of maintenance and repair of military automobile equipment]. *Zbirnyk naukovykh prats' Kharkivs'koho universytetu Povitrianykh syl - Collection of scientific works of Kharkiv Air Force University, 2*, 118-122 [in Ukrainian].
14. Bilichenko, V.V. & Kruk, V.P. (2012). Teoretychni osnovy optymizatsii struktury vyrobnychoi bazy ATP po tekhniko-ekonomichnym kryteriiam [Theoretical bases of optimizing the structure of the ATP production base according to technical and economic criteria]. *Naukovi notatky – Scientific notes, 37*, 23-26 [in Ukrainian].
15. Sakhno, V.P., Sakno, O.P. & Lysyj, O.V. (2015). Analiz umov zabezpechennia pratsezdatsnosti avtotransportnykh zasobiv na osnovi udoskonalennia systemy tekhnichnoho obsluhovuvannia [Analysis of the conditions for ensuring the operability of motor vehicles based on the improvement of the maintenance system]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil'skoho*

- hospodarstva imeni Petra Vasylenka – Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture*, 158, 144-149 [in Ukrainian].
16. Sakhno, V.P., Sakno, O.P. & Lysyj, O.V. (2015). Do modeliuвання systemy tekhnichnoho obsluhovuvannya i remontu avtopoizdiv [To the modeling of the system of technical maintenance and repair of road trains]. *Molodyj vchenyj – A young scientist*, 5(1), 54-57 [in Ukrainian].
 17. Zuiiev, O.O. (2013). Sproschena metoda lohiko-imitatsijnogo modeliuвання operatsij tekhnichnoho obsluhovuvannya mobil'noi tekhniki [A simplified method of logic-simulation modeling of maintenance operations of mobile equipment]. *Pratsi Tavrijs'koho derzhavnogo ahrotekhnolohichnoho universytetu – Proceedings of the Tavri State Agro-Technological University*, 13, 6, 158-165 [in Ukrainian].
 18. Pavlenko, V.M., Kuzhel', V.P., Kalashnikov, Ye.V. & Komar, D.P. (2019). Modeliuвання ontolohij dlia orhanizatsii tekhnichnoho obsluhovuvannya avtomobiliv [Modeling of ontologies for the organization of car maintenance]. *Visnyk mashynobuduvannya ta transportu – Herald of mechanical engineering and transport*, 1, 89-97 [in Ukrainian].
 19. Bilichenko, V.V. & Romaniuk, S.O. (2013). Systemna model' proektnoho upravlinnia stratehiamy rozvytku orhanizatsij avtomobil'noho transportu za etapamy ikh zhyttievoho tsykladu [System model of project management of development strategies of road transport organizations by stages of their life cycle]. *Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, 6, 102-107 [in Ukrainian].
 20. Bilichenko, V.V., Tsybal, S.V., Kreschenets'kyj, V.L. & Mal'chenko, V.Iu. (2018). Vdoskonalennia metodyky formuvannya potuzhnosti zony potochnoho remontu avtomobiliv [Improvement of the method of forming the capacity of the current car repair zone]. *Naukovi notatky – Scientific notes*, 62, 44-47 [in Ukrainian].
 21. Odokiienko, S.M., Tarandushka, L.A. & Tarandushka, I.P. (2016). Rozrobka systemy parametriv dlia otsinky iakosti protsesiv tekhnichnoho obsluhovuvannya i remontu avtomobiliv [Development of a system of parameters for evaluating the quality of car maintenance and repair processes]. *Tekhnolohicheskij audyt y rezervy proyzvodstva – Technological audit and production reserves*, 3/2(29), 52-56 [in Ukrainian].
 22. Reliability-Centered Maintenance (RCM) for Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance (C4ISR) Facilities. Technical Manual 5-698-2. – Washington, DC: Headquarters Department of the Army, 2006, 96 [in English].
 23. Key outcomes from Life Cycle Assessment of vehicles, a state of the art literature review Maarten Messagie, Cathy Macharis, Joeri. VanMierlo. Barcelona, Spain, November 17-20, 2013 [in English].
 24. Systema kontroliu iakosti remontu Bosch QualityScan: harantiia iakosti remontu dyzel'nykh komponentiv v avtoryzovanykh majsterniakh Bosh Dyzel' Tsentri i Bosh Dyzel' Servisu [Bosch QualityScan repair quality control system: guarantee of the quality of repair of diesel components in authorized Bosch Diesel Center and Bosch Diesel Service workshops]. Retrieved from URL: <https://autodiesel.com.ua/news/sistema-kontrolyu-yakosti-remontu-bosch-qualityscan-garantiya-yakosti-remontu-dizelnih-komponentiv-v-avtorizovanih-majsternyah-bosh-dizel-tsentri-i-bosh-dizel-servis/> [in Ukrainian].
 25. Rudnytskyi, V., & Hadi, A. (2021). Methodological tools for the implementation of information technology for expert assessment of the quality of heavy automobile equipment in the process of its exploitation. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 3(17), P. 69–77 [in English].
 26. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Mel'nychuk, S.V. & Soroka, B.A. (2023). Informatsijne zabezpechennia systemy tekhnichnoho servisu avtomobiliv v ahropromyslovomu vyrobnytstvi [Information provision of the system of technical service of cars in agro-industrial production]. *Modern technologies and prospects for the development of road transport: XVI Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia (23-25 zhovtnia 2023 roku) – XVI International Scientific and Practical Conference* (pp. 45-48). Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
 27. Fornal'chuk, Ye.Iu. & Kochmar, R.Ia. (2017). *Osnovy tekhnichnoho servisu transportnykh zasobiv [Basics of vehicle technical service]*. L'viv: «L'vivs'ka politekhnika» [in Ukrainian].
 28. Khavruk, V.O. & Parkhomenko, O.O. (2021). Metodyka rozrakhunku efektyvnosti ekspluatatsii vantazhnykh avtomobiliv [Methodology for calculating the efficiency of truck operation]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti – Modern technologies in mechanical engineering and transport*, 2(17), 163-172 [in Ukrainian].
 29. Ivashchenko, O.V. (2012). Pokaznyky tekhniko-ekonomichnoi efektyvnosti mashyn [Indicators of technical and economic efficiency of machines]. *Visnyk ZhDTU. Serii: Ekonomichni nauky – Bulletin of ZHTU. Series: Economic Sciences*, 3(61), 235-237 [in Ukrainian].
 30. Pavlenko, V.M. & Kuzhel', V.P. Vyznachennia mozhlyvosti vykorystannia mul'tyahentnoho pidkholu

- pry vykonanni tekhnichnoho obsluhovuvannya i remontu avtomobilia [Determination of the possibility of using a multi-agent approach when performing maintenance and repair of a car]. *Visnyk mashynobuduvannya ta transportu – Herald of mechanical engineering and transport, 1*, 72-80 [in Ukrainian].
31. Sakno, O.P., Kolesnikova, T.M. & Ollo, V.P. (2019). Modeliuvannya pryjniattia rishen' v systemi tekhnichnoho obsluhovuvannya avtomobiliv na osnovi matematychnykh metodiv teorii nechitkykh mnozhyn [Modeling decision-making in the car maintenance system based on mathematical methods of fuzzy set theory]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury – Bulletin of the Dnipro State Academy of Construction and Architecture, 6*, 70-76 [in Ukrainian].

Viktor Aulin, Prof., Dr. tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Oleg Liashuk, Prof., Dr. tech. sci.

Ivan Pulyuy Ternopil National Technical University, Ternopil, Ukraine

Andrey Hrinkiv, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Serhii Lysenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Dmytro Mironov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Liubomyr Slobodian**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Roman**

Rohatynskyi, Prof., Dr. tech. sci.

Ivan Pulyuy Ternopil National Technical University, Ternopil, Ukraine

The optimal complex of maintenance and repair operations to increase the reliability of nodes, systems and aggregates of mobile machines

The work examines the improvement of the forms and methods of organizing maintenance and repair systems of mobile machines in order to increase their reliability by optimizing diagnostic operations and monitoring the technical condition of their units, systems and units.

The proposed centralized system of maintenance and repair of machines includes the principles of production and is characterized by the wide use of technological complexes of operations of the system of maintenance and repair of nodes, systems, aggregates and mobile machines as a whole.

A comparison was made of the methodology for implementing the proposed maintenance and repair system and the world-famous RCM (Reliability-centered Maintenance) methodology, focused on a certain level of reliability.

Schematics of the technological process of implementing a complex of maintenance and repair operations based on one-stage and multi-stage control of the technical condition of nodes, systems, aggregates and the mobile machine as a whole are presented.

A decision-making algorithm has been developed for the processes of a complex of maintenance and repair operations. Clarified technological and information support of complexes of maintenance and repair operations of nodes, systems, units of mobile machines.

The role of the operator-diagnostic in relation to the probability of receiving errors of the 1st and 2nd type of defects of parts, as well as the use of computerized workplaces, is revealed. It is shown how these factors affect the level of reliability of nodes, systems, aggregates and mobile machines as a whole.

It was determined that in order to reduce the influence of the human factor on the results of the diagnosis of the presence or absence of defects and the distribution of nodes, systems, aggregates according to the technological routes of optimal complexes of maintenance and repair operations, consideration of the repair and maintenance system as an artificial cognitive system can help.

reliability, mobile machine, detail, optimization, operation, maintenance and repair, diagnostics, computerized workplace

Одержано (Received) 07.11.2023

Прорецензовано (Reviewed) 16.12.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656.029

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.190-198](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.190-198)

М.В. Бабій, канд. техн. наук, **В.О. Дзюра**, проф., д-р техн. наук, **А.В. Бабій**, проф., д-р техн. наук, **Н.Я. Рожко**, доц., докт. екон. наук, **В.Б. Валяшек**, доц., канд. фіз.-мат. наук
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, e-mail: mvbabiy@ukr.net

Обґрунтування оптимальної схеми перевезення насипних вантажів при взаємодії різних видів транспорту

В роботі побудовано математичну модель транспортної задачі, на основі якої було сформовано транспортну матрицю для перевезення насипного вантажу зі складів на елеватори. Наведено методу, яка дозволяє досліднику правильно накласти обмеження та записати вираз цільової функції з метою віднаходження оптимального рішення. Суть задачі полягає у визначенні оптимального маршруту перевезення зернового матеріалу зі складів до елеваторів при найменшій вартості транспортного процесу. Склади мають обмежену продуктивність навантажувальних засобів при їх взаємодії з вантажними автомобілями та врахована можливість приймати визначені обсяги вантажів елеваторами, які обмежені пропускною здатністю сушарок. Задачу лінійного програмування розв'язано при використанні програми Microsoft Excel, де отримані розв'язки для найкращого та найгіршого варіантів перевезення при врахуванні накладених обмежень.

транспортна задача, насипний вантаж, склад, елеватор, продуктивність, взаємодія, навантажувальний засіб, вантажний автомобіль, зерновий матеріал, цільова функція, обмеження

Постановка проблеми. Раціональна організація виробничого процесу – завжди актуальна задача на будь-якому виробництві. Від цього в значній мірі залежить собівартість виробленої продукції чи надання послуг. Не винятком є організація перевізних процесів на агрофірмах. Часто буває так, що при перевезенні різних промислових вантажів у межах України чи у міжнародному сполученні задіяні фірми-перевізники, які мають свої логістичні центри та складають оптимальні маршрути з метою отримання максимальної ефективності такого процесу, а при сільськогосподарському виробництві – рішення приймають, переважно, ситуативно. Хоча обсяги вантажів, що перевозять при реалізації сільськогосподарських процесів є досить значними і нераціональна організація перевізного процесу може в значній мірі підвищити собівартість одиниці виробленої продукції. Таких перевізних процесів є дуже багато і вони, в основному, організовані при взаємодії різних видів транспорту. Наприклад, технологічні машини збирають урожай, перевантажують його на автомобільний чи тракторний транспорт та перевозять до місць зберігання чи перевалки з подальшим транспортуванням у відповідності до технологій виробництва і т.д. Всі наведені машини та механізми мають різні експлуатаційні продуктивності, але вони між собою повинні максимально ефективно взаємодіяти та переміщатись оптимальними маршрутами.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Окреслені проблеми раціональної взаємодії різних видів транспорту, побудови оптимальних маршрутів, зокрема при виробництві сільськогосподарської продукції, розглядалися та залишаються актуальними

для багатьох дослідників [1-3]. Створено багато теоретичних моделей, які дозволяють оптимізувати різні транспортні процеси при перевезенні вантажів [6, 7, 9-11]. Тому серед численних напрацювань варто виділити окремі моделі, які мають чітку і зрозумілу процедуру реалізації та точність результату, що є задовільною для даного перевізного процесу.

Постановка завдання. В технологіях сільськогосподарського виробництва значна частка у собівартості кінцевого продукту належить транспортним процесам. До таких операцій належить транспортування насипного матеріалу, наприклад насіння зернових культур зі складів до сушарок на елеваторах з наступним їх зберіганням. Оскільки обсяги перевезень достатньо великі, то задача розробки оптимальних маршрутів є досить актуальною. Від ефективності її вирішення залежить економія коштів господарства-виробника.

Тому є необхідність виділити у теоретичному плані модель оптимізаційної задачі, яка адаптована до конкретних умов перевезення у господарстві, навести методіку її реалізації з метою адекватного формування цільової функції, накладання обмежень та можливості отримання розв'язку, який можна реалізувати в автоматизованому режимі.

Виклад основного матеріалу. Розв'язок даної транспортної задачі відноситься до задач лінійного програмування. Проте, шляхи вирішення поставленого завдання можуть бути різними як за трудомісткістю процесу, так і точністю отриманого результату. Розв'язуючи транспортну задачу, нерідко дослідники відносять одне рішення з множини можливих розв'язків та представляють його як оптимальне. Звичайно, цільова функція має раціональне значення, але стверджувати, що це саме оптимальне рішення не можна [8, 9].

Перейдемо до побудови моделі задачі.

Господарство, яке спеціалізується на виробництві зернової продукції рослинництва має два склади, де тимчасово зберігається зерно однієї культури, що зібрана з поля та має незадовільну вологість. Такий зерновий матеріал потребує подальшого сушіння та зберігання на елеваторах, які розташовані за межами господарства та мають різні продуктивності щодо можливості виконувати технологічну операцію сушіння. Цей критерій є одним з обмежувальних, що не дозволяє перевозити потрібні об'єми сипкого вантажу для кінцевого зберігання на потужностях конкретного елеватора. Крім того, засоби навантаження у складах господарства мають також обмежену продуктивність при завантаженні транспортних засобів для перевезення зернового вантажу. Відстані від пункту завантаження до пункту вивантаження відомі, але різні; питома вартість одиниці виконаної транспортної роботи визначена. Задача полягає у встановленні оптимальної схеми перевезення сипкого вантажу при мінімальній вартості такої транспортної операції з врахування окреслених взаємодій.

Склад № 1 має продуктивність навантажувальних засобів, що рівна A_1 , відповідно склад № 2 – A_2 . В загальному продуктивності A_i засобів навантаження i -го складу ($i = \overline{1, n}$) буде визначати можливість завантаження вантажних автомобілів при їх взаємодії. З іншого боку – продуктивності B_j зерносушарок на j -му елеваторі ($j = \overline{1, m}$) також будуть обмежувати можливість приймати зерновий матеріал.

Вартість перевезення одиниці вантажу з i -го складу на j -тий елеватор складає c_{ij} , тоді кількість одиниць вантажу x_{ij} , що перевозиться, буде підлягати визначенню.

Загальна вартість перевезень сипкого вантажу становитиме

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} . \quad (1)$$

Тепер можна виділити, що $\sum_{j=1}^m x_{ij}$ – це кількість вантажу, що може бути вивезений з i -го складу; $\sum_{i=1}^n x_{ij}$ – кількість вантажу, що може прийматися j -тим елеватором.

Тоді при $x_{ij} \geq 0$ очевидно повинні виконуватись умови:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = A_i, \quad i = \overline{1, n}; \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = B_j, \quad j = \overline{1, m}; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n A_i = \sum_{j=1}^m B_j . \quad (4)$$

Цільова функція (1), що підлягає оптимізації, має бути мінімальною

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min . \quad (5)$$

За описаних умов дана транспортна задача будується на основі замкнутої транспортної моделі.

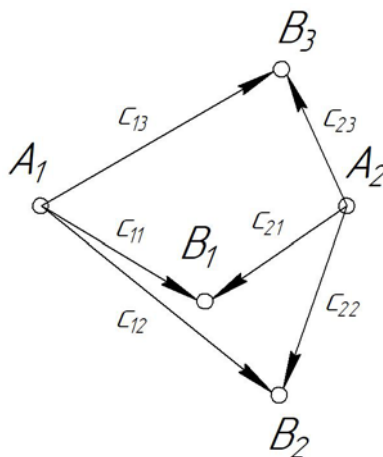


Рисунок 1 – Схема розміщення складів, елеваторів та можливі сполучення між ними

Джерело: розроблено авторами

Обмеження, що відповідають умові задачі:

$$\begin{aligned}
 x_{11} + x_{12} + x_{13} &= A_1; \\
 x_{21} + x_{22} + x_{31} &= A_2; \\
 x_{11} + x_{21} &= B_1; \\
 x_{12} + x_{22} &= B_2; \\
 x_{13} + x_{23} &= B_3.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Як видно, що всі обмеження – це рівності; кожна з наведених змінних входить як в обмеження щодо складів, так і в систему обмежень елеваторів.

Тоді в розгорнутому вигляді цільова функція (5) вартості перевезень сипкого вантажу матиме вигляд

$$Z = c_{11}x_{11} + c_{12}x_{12} + c_{13}x_{13} + c_{21}x_{21} + c_{22}x_{22} + c_{23}x_{23} \rightarrow \min. \tag{7}$$

Для даного фізичного процесу перевезення логічними будуть такі граничні умови:

$$x_{11} \geq 0; x_{12} \geq 0; x_{13} \geq 0; x_{21} \geq 0; x_{22} \geq 0; x_{23} \geq 0. \tag{8}$$

Процедура отримання оптимального рішення для вигідної схеми перевезення максимально допустимого обсягу сипкого вантажу розпочинається зі знаходження можливих розв'язків та завершується вибором оптимального значення.

Для отримання можливих (допустимих) розв'язків такої транспортної задачі доцільно представити транспортну матрицю у табличній формі, табл. 1.

Таблиця 1 – Транспортна матриця

x_{11} c_{11}	x_{12} c_{12}	x_{13} c_{13}	A_1
x_{21} c_{21}	x_{22} c_{22}	x_{23} c_{23}	A_2
B_1	B_2	B_3	Z

Джерело: розроблено авторами

Дана матриця має такі відповідності:

1-й рядок відповідає обсягам перевезень відповідно до продуктивності відвантаження зерна зі складу № 1, 2-й – зі складу № 2 та їх питомі вартості перевезення;

відповідні стовпці характеризують можливі обсяги прийнятого вантажу j -тим елеватором;

суми добутоків, за аналогією залежності (7), складають значення цільової функції Z .

Щоб зрозуміти фізичну суть такого процесу, аналізують значення вартості перевезення одиниці вантажу c_{ij} за варіантами, що наведені у клітинках матриці та вибирають мінімальне. Якщо однакових мінімальних значень є кілька, то беруть довільне з них. Тоді в цю клітинку вносять менше значення однієї з продуктивностей – A_i чи B_j , як базисну змінну. Причому рядки балансу обсягів можливих перевезень за обмеженнями продуктивностей навантажувальних машин A_i та стовпців B_j – продуктивностей елеваторів – порушені бути не можуть. Інші клітинки транспортної матриці можуть бути заповненими вільними змінними, тобто нулями, та значеннями для змінних, що вирівнюють баланс.

Інші вільні клітинки заповнюють за такою ж процедурою. Тут тільки варто зазначити, що кількість змінних становить nm , а кількість базисних змінних – $(n + m - 1)$ і, відповідно, вільних змінних – $(nm - (n + m - 1))$.

Після заповнення всіх клітинок транспортної матриці отримані значення підставляють у залежність (7) та отримують допустимий розв'язок, але стверджувати, що це саме оптимальне значення неможна.

Далі слідує процедура відшукування оптимального рішення, причому, якщо за таким методом (ручної підстановки) здійснювати цю процедуру, то наступне знайдене рішення може бути кращим, але, знову ж таки, не оптимальним. Тобто, при прямуванні цільової функції до мінімуму перебирають варіанти значень з області допустимих та встановлюють мінімальне. З метою знаходження оптимального значення цільової функції для таких задач лінійного програмування побудовані різні методи (розподільчий, метод потенціалів тощо). Всі вони в своїй основі мають базові засади симплекс-методу, де оптимальне рішення визначається перебором варіантів при переводі однієї з базисних змінних у розряд вільних та, відповідно, навпаки. Баланс при цьому витримується.

Наведені процедури розв'язку оптимізаційної задачі транспортування сипкого вантажу зі складів до елеваторів дають розуміння самого процесу побудови оптимального маршруту з врахуванням заданих обмежень [4, 5]. Якщо кількість складів, елеваторів, накладених обмежень є мінімальною, то нескладно такі рішення знаходити описаними вище процедурами. Але зі зростанням кількості вхідних даних та обмежень такі обчислення стають досить трудомісткими. Проте задачі лінійного програмування досить легко програмуються і для комп'ютера процедура перебирання варіантів за заданим алгоритмом не складає жодних труднощів. Тому, вмюючи побудувати оптимізаційну задачу, в даному випадку – маршруту перевезення сипкого вантажу, сам оптимальний розв'язок доцільно отримувати з допомогою використання комп'ютерної техніки та на основі складених програм чи вбудованих модулів відповідного програмного забезпечення.

Задачі лінійного програмування можна розв'язувати при використанні стандартної офісної програми Microsoft Excel. Тому для конкретних умов роботи складів та елеваторів, їх взаємного розміщення та вартості одиниці перевезення вантажу побудуємо та розв'яжемо транспортну задачу, де результатом буде віднаходження оптимального маршруту перевезення [7, 10].

Вихідні дані: продуктивність навантажувальних машин складу №1 – $A_1 = 100$ т/год; складу № 2 – 80 т/год; елеватори, за пропускною здатністю сушарок, протягом години можуть прийняти обсяг вантажу: $B_1 = 40$ т/год; $B_2 = 60$ т/год; $B_3 = 60$ т/год; питома вартість перевезення c_{ij} (у.о./т) вказана на рис. 2 і 3.

Шукані об'єми перевезень, т/год		Питома вартість перевезення, у.о./т		Обмеження, т/год	
x11	40	c11	5	A1	80
x12	40	c12	8	A2	80
x13	0	c13	7,3	B1	40
x21	0	c21	4,5	B2	60
x22	20	c22	6,5	B3	60
x23	60	c23	4		
Цільова функція Zmin, у.о.	890				

Рисунок 2 – Результати рішення оптимізаційної задачі при мінімальній вартості перевезення

Джерело: розроблено авторами

Шукані об'єми перевезень, т/год		Питома вартість перевезення, у.о./т		Обмеження, т/год	
x11	40	c11	5	A1	100
x12	60	c12	8	A2	60
x13	0	c13	7,3	B1	40
x21	0	c21	4,5	B2	60
x22	0	c22	6,5	B3	60
x23	60	c23	4		
Цільова функція Zmax, у.о.	920				

Рисунок 3 – Результати рішення оптимізаційної задачі при максимальній вартості перевезення

Джерело: розроблено авторами

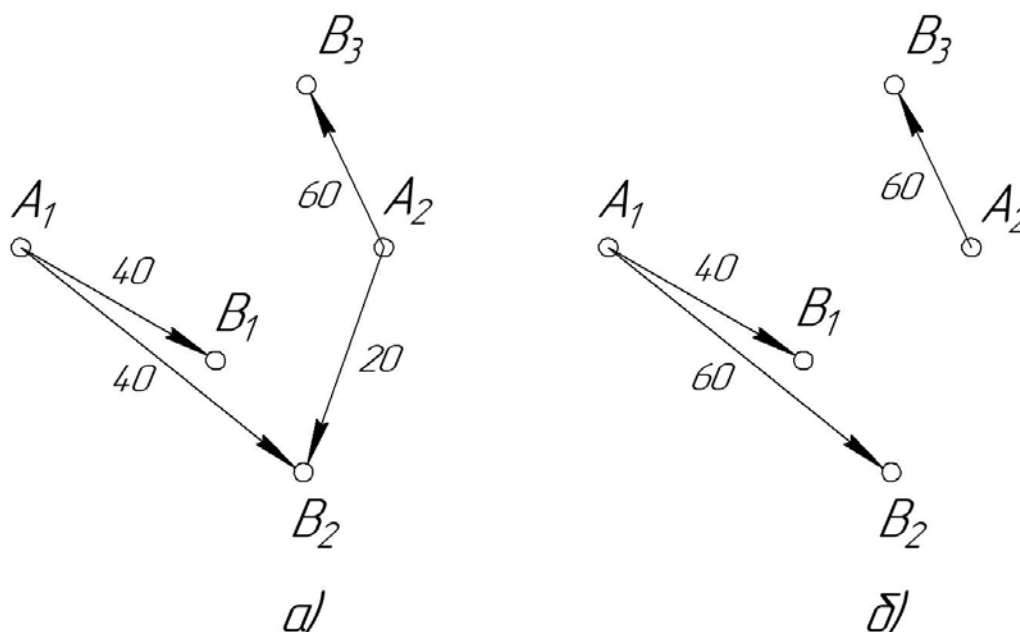
а – варіант при мінімальній вартості перевезення;
б – при максимальній вартості перевезення

Рисунок 4 – Графічне зображення результатів розрахунку оптимізаційної задачі

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Таким чином, за побудованою загальною математичною моделлю транспортної задачі було сформовано транспортну матрицю для конкретної задачі

перевезення сипкого вантажу зі складів на елеватори. Наведена методика дозволяє досліднику правильно накласти обмеження та записати вираз цільової функції з метою віднаходження оптимального рішення. За першим варіантом розв'язку оптимізаційної задачі (рис. 2) встановлені значення обсягів перевезень зі складів до відповідних елеваторів (рис. 4, а): зі складу №1 протягом годин повинно бути відвантажено 40 т до елеватора №1 та 40 т до елеватора №2; зі складу №2 – 20 т до елеватора №2 та 60 т до елеватора №3. За таких умов вартість перевезення вказаного обсягу вантажу (160 т) буде мати найменшу вартість і складе 890 у.о.

За другим, найдорожчим варіантом (рис. 3), вартість складе 920 у.о. і буде наступний розподіл (рис. 4,б): зі складу №1 – 40 т до елеватора №1 та 60 т до елеватора №2; зі складу №2 – 60 т до елеватора №3.

Отримавши такі результати, можна завжди приймати правильне рішення, щоб забезпечити високу економічну ефективність перевізного процесу у будь-якій галузі народного господарства.

Список літератури

1. Абрамчук Л.М. Методологія визначення оптимальних технологічних параметрів транспортної інфраструктури при обслуговуванні зернових вантажопотоків. *Системні дослідження та інформаційні технології*, 2009. № 3. С.105-111.
2. Аулін В.В., Голуб Д.В., Біліченко В.В., Великодний Д. О. Методологія підходів до дослідження шляхів і сукупності факторів забезпечення належного рівня ефективності і надійності транспортних систем. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2017. № 2. С. 4-14.
3. Аулін В.В., Івасишена В.В., Бабій М.В., Миколук Ю.М. Формування логістичної моделі транспортування сільськогосподарської продукції на агропромисловому виробництві. *Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 17-19 листопада 2022 р. „Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту“*. Кропивницький: ЦНТУ, 2022. С. 242-250.
4. Бабій А.В., Бабій М.В., Кучвара І.М. Аналіз причин травмування зернового матеріалу при збиранні та транспортуванні. *Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів»*. 2018. № 11. С. 27-34.
5. Бабій М.В., Бісовський Н.М., Балацький С.С. Аналіз проблематики при взаємодії видів транспорту. *Матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“*. Тернопіль : ТНТУ, 2020. Том 1. С. 153.
6. 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*. 2022. вип. 15, вип. 1, С. 44–51.
7. Козаченко Д.М., Вернигора Р.В., Малашкін В.В. Основи дослідження операцій у транспортних системах: приклади та задачі: навчальний посібник для ВНЗ. Дніпропетровськ: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2015. 277 с.
8. Кухарчик О. Г. Транспортна задача оптимізації витрат при мультимодальних перевезеннях. *Економічні інновації*. 2017. Вип. 64. С. 157-163.
9. Прокудін Г. С., Ящук О. В. Оптимізація перевезень на транспортній мережі з обмеженнями на пропускні спроможності комунікацій. *Науково-технічний збірник «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*. 2003. № 69. С 123-129.
10. Прокудін, Г. С. Моделі і методи оптимізації перевезень у транспортних системах. К: НТУ, 2006. 224 с.
11. Давідіч, Ю.О. Розробка графіка руху транспортних засобів при організації вантажних перевезень: навч. посіб. Х.: ХНАМГ, 2010. 345 с.

References

1. Abramchuk, L.M. (2009). Metodolohiia vyznachennia optymal'nykh tekhnolohichnykh parametriv transportnoi infrastruktury pry obsluhovuvanni zernovykh vantazhopotokiv [Methodology for determining the optimal technological parameters of transport infrastructure, maintenance of grain cargo flows]. *Systemni doslidzhennia ta informatsiini tekhnolohii – System studies and information technologies*, 3, 105-111 [in Ukrainian].

2. Aulin, V.V., Holub, D.V., Bilichenko, V.V. & Velykodnyi, D.O. (2017). Metodolohiia pidkhodiv do doslidzhennia shliakhiv i sukupnosti faktoriv zabezpechennia nalezhnogo rivnia efektyvnosti i nadijnosti transportnykh system [Methodology of approaches to the investigating ways and the set of factors ensuring the proper level of efficiency and reliability of transport systems]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu – Herald of mechanical engineering and transport*, 2, 4-14 [in Ukrainian].
3. Aulin, V.V., Ivasyshen, V.V., Babii, M.V. & Mykoliuk, Yu.M. (2022). Formuvannia lohystychnoi modeli transportuvannia sil'skohospodars'koi produktsii na ahropromyslovomu vyrobnytstvi [Formation of a logistic model for transporting agricultural products in agro-industrial production]. Innovative technologies for the development and efficiency of road transport: *Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii (17-19 lystopada 2022 r) – Materials of the International Scientific and Practical Internet Conference* (pp. 242-250). Kropyvnytskyi: TsNTU [in Ukrainian].
4. Babii, A.V., Babii, M.V. & Kuchvara, I.M. (2018). Analiz prychn travmuvannia zernovoho materialu pry zbyranni ta transportuvanni [Analysis of the reasons for grain material injury during harvesting and transportation]. *Naukovyj zhurnal «Tekhnichnyj servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv» – Scientific journal "Technical service of agricultural, forestry and transport complexes"*, 11, 27-34. [in Ukrainian].
5. Babii, M.V., Bisovskyi, N.M. & Balats'kyj, S.S. (2020). Analiz problematyky pry vzaiemodii vydiv transportu [Analysis of problems in the interaction of modes of transport]. Actual tasks of modern technologies: *Materialy IX Mizhnarodnoi naukovo-tehnichnoi konferentsii molodykh uchenykh ta studentiv – Materials of the 19th International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Students*. Ternopil : TNTU, 1, 153 [in Ukrainian].
6. Holub, D.V., Aulin, V.V., Bilichenko, V.V. & Zamurenko, A.S. (2022). Realizatsiia systemnoho pidkhotu pry vyznachenni efektyvnosti funktsionuvannia skladnykh rehional'nykh transportnykh system [Implementation of a systematic approach in determining the efficiency of complex regional transport systems]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu – Herald of mechanical engineering and transport*, 15, 1, 44–51 [in Ukrainian].
7. Kozachenko, D.M., Vernyhora, R.V. & Malashkin, V.V. (2015). *Osnovy doslidzhennia operatsij u transportnykh systemakh: pryklady ta zadachi [Fundamentals of operations research in transport systems: examples and problems]*. Dnipropetrovsk: Dnipropetr. nats. un-t zalizn. transp. im. akad. V. Lazariana. [in Ukrainian].
8. Kukharchyk, O.H. (2017). Transportna zadacha optymizatsii vytrat pry mul'tymodal'nykh perevezenniakh [Transport problem of cost optimization in multimodal transportation]. *Ekonomichni innovatsii – Economic innovations*, 64, 157-163 [in Ukrainian].
9. Prokudin, H.S. & Yashchuk, O.V. (2003). Optymizatsiia perevezen' na transportnij merezhi z obmezheniamy na propuskni spromozhnosti komunikatsij [Optimization of transportation on a transport network with limitations on the throughput capacities of communications]. *Naukovo-tehnichnyi zbirnyk «Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo» – Scientific and technical collection "Automobile roads and road construction"*, 69, 123-129 [in Ukrainian].
10. Prokudin, H.S. (2006). Modeli i metody optymizatsii perevezen' u transportnykh systemakh [Models and methods of transportation optimization in transport systems]. K: NTU [in Ukrainian].
11. Davidich, Yu. O. (2010). *Rozrobka hrafika rukhu transportnykh zasobiv pry orhanizatsii vantazhnykh perevezen' [Development of a schedule for the movement of vehicles in the organization of cargo transportation]*. Kh.: KhNAMH [in Ukrainian].

Maria Babii, Ph.D.; **Volodymyr Dzyura**, Prof., DSc., **Andrii Babii**, Prof., DSc., **Nataliia Rozhko**, Assoc. Prof., DSc.; **Volodymyr Valiashek**, Assoc. Prof., Ph.D.
Ternopil Ivan Puluji National Technical University, Ternopil, Ukraine

Justification of the optimal scheme of bulk cargo transportation during interaction of different types of transport

In agricultural production technologies, a significant share in the cost of the final product belongs to transport processes. Such operations include the transportation of bulk material, for example grain seeds from warehouses to dryers on elevators with their subsequent storage. Since the volume of traffic is large, the task of developing optimal routes is very relevant. The efficiency of its solution depends on the savings of the manufacturer.

The mathematical model of the transport problem was built in the work, on the basis of which a transport matrix was formed for transporting bulk cargo from warehouses to elevators. A technique is presented. It allows the researcher to correctly impose restrictions and write down the expression of the objective function

in order to find the optimal solution. The essence of the problem is to determine the optimal route for transporting grain material from warehouses to elevators at the lowest cost of the transport process. The warehouses have a limited capacity of loading facilities in their interaction with trucks and taken into account the ability to take certain volumes of cargo by elevators, which are limited by the capacity of dryers. The problem of linear programming is solved using the Microsoft Excel program, where solutions for the best and worst transportation options are obtained when taking into account the restrictions imposed.

According to the constructed general mathematical model of the transport problem, a transport matrix was formed for a specific task of transporting bulk cargo from warehouses to elevators. As a result of the solutions, two solutions were obtained. According to the first option of solving the optimization problem, the values of the volume of transportation from warehouses to the corresponding elevators are established: from warehouse No. 1, 40 tons should be shipped within hours to elevator No. 1 and 40 tons to elevator No. 2; from warehouse No. 2 – 20 tons to elevator No. 2 and 60 tons to elevator No. 3. Under such conditions, the cost of transportation of the specified volume of cargo (160 tons) will have the lowest cost and will be 890 standard units.

According to the second, the most expensive option, the cost of transportation will be 920 standard units and there will be the following distribution: from warehouse No. 1 – 40 tons to elevator No. 1 and 60 tons to elevator No. 2; from warehouse No. 2 – 60 tons to elevator No. 3.

Having received such results, you can always make the right decision to ensure high economic efficiency of the transportation process in any branch of the national economy.

transport problem, bulk cargo, warehouse, elevator, productivity, interaction, loading facility, truck, grain material, objective function, limitation

Одержано (Received) 17.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 29.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 338.47:656.615

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.198-206](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.198-206)

О.С. Хачатурян, канд. екон. наук

Льотна академія Національного авіаційного університету, м. Кропивницький, Україна

e-mail: elenarice1210@gmail.com

Управління ланцюгами постачання – аналіз і оцінка моделей і методів

В умовах ведення бізнесу, які постійно змінюються, виникає потреба в адаптації існуючих і створенні нових механізмів у логістиці.

У роботі виконано огляд моделей, методів і концепцій, які використовуються при управлінні ланцюгами постачання в сучасних умовах. Пропонується умовно розділити моделі та методи логістики на загальнонаукові та спеціальні, котрі використовуються при об'єктному та процесному моделюванні.

Виявлено особливості використання різних моделей і методів у процесі управління ланцюгами постачання, що дозволило запропонувати їх поділ на два блоки: планування ланцюгів постачання та виконання ланцюгів постачання у поточний момент. З'ясовано, що оптимальним варіантом регулювання ланцюгів постачання є мультимодальний підхід, який дає можливість знизити витрати та оптимізувати кількість учасників.

Виконано порівняльний аналіз аналітичних методів і методу моделювання ланцюгів постачання, встановлено їх переваги та недоліки. Визначено, що сучасними тенденціями є інформатизація логістичних процесів, впровадження технології блокчейн, що створює інформаційну та більш прозору модель взаємодії на всіх рівнях постачання.

Розглянуто новий напрямок у логістиці – «зелений» логістичний реінжиніринг як такий, що впливає на весь логістичний ланцюжок підприємства і сприяє зниженню витрат і підвищенню ефективності ведення бізнес-процесів.

управління ланцюгами постачання, логістика, планування ланцюгів постачання, моделі і методи, цифрові технології

© О.С. Хачатурян, 2023

Постановка проблеми. Конкуренентоздатність підприємства та його прибуток на ринку залежать від багатьох чинників. На перший план наразі виходять детальне вивчення та опрацювання ланцюгів постачання, створення додаткової вартості та екосистема виробництва в цілому, тому концепція управління ланцюгами постачання широко використовується для отримання лідируючих позицій на ринку. У загальному розумінні під управлінням ланцюгами постачання розуміють впровадження логістичних бізнес-процесів, які відбуваються з моменту виробництва продукції до придбання кінцевим споживачем і охоплюють усіх контрагентів, які надають товари, послуги та інформацію, що додає цінності для споживача [1].

Аналіз основних досліджень і публікацій. В останній час у науковій літературі приділяється значна увага логістичним моделям і методам управління ланцюгами постачання як важливої складової частини системи управління підприємством. Аналіз робіт вітчизняних і зарубіжних учених, які висвітлюють проблеми становлення та розвитку логістики й, зокрема, моделювання ланцюгів постачання свідчать, що основні теоретичні та практичні аспекти управління ланцюгами постачання в логістичній системі є основою підвищення ефективності функціонування підприємств. При цьому особливо суттєвим у управлінні ланцюгами постачання є правильний вибір механізмів і методів механізмів управління. У дослідженні [2] виконано аналіз існуючих підходів до формування прибуткових механізмів керування ланцюгами постачання й аргументовано використання такого інструменту розвитку економічного механізму керування ланцюгами постачання, котрий направлений на зростання дієвості й ефективності логістичного управління і бізнес-процесів у логістиці. Безсумнівний інтерес являє собою робота, що присвячена розробленню механізмів керування ланцюгами постачання підприємств України в контексті сталого розвитку [3,15].

У центрі уваги таких зарубіжних науковців, як Картер К., Істон Р., Роджерс Д. [4, 5], Вільямсон О. [6] та інших знаходяться питання підвищення ефективності ланцюгів постачання та керування логістичною складовою діяльності підприємств. Значення запровадження в управління ланцюгами постачання новітніх моделей і методів досліджуються в роботах таких вчених, як Арлбйорн Я., Хаас Г., Мунксгаард К. [7], Грейв С. [8] і інших. У той же час, на сьогодні існує потреба бізнесу в аналізі та осмисленні можливостей, які перед ними відкривають нові моделі та методи логістичної діяльності. Такі відомі в світі корпорації, як Adidas, Amazon, DHL, UPS вкладають значні кошти у дослідження інноваційних логістичних моделей і методів.

Таким чином, аналіз наукової літератури дозволив зробити висновок про те, що низка питань, які стосуються формування системи логістики підприємств досліджено недостатньо. Мало уваги приділено аналізу та оцінці моделей, методів і концепцій управління ланцюгами постачання та розробці на їх основі пропозицій щодо оптимального підходу до регулювання ланцюгів постачання.

Постановка завдання. Виконати аналітичну оцінку моделей, методів і концепцій, які використовуються при управлінні ланцюгами постачання в сучасних умовах і на її основі обґрунтувати оптимальний підхід до регулювання ланцюгів постачання.

Виклад основного матеріалу. Узагальнивши накопичений досвід, можна умовно розділити моделі та методи, що використовуються в логістиці, на загальнонаукові та спеціальні (рис. 1).

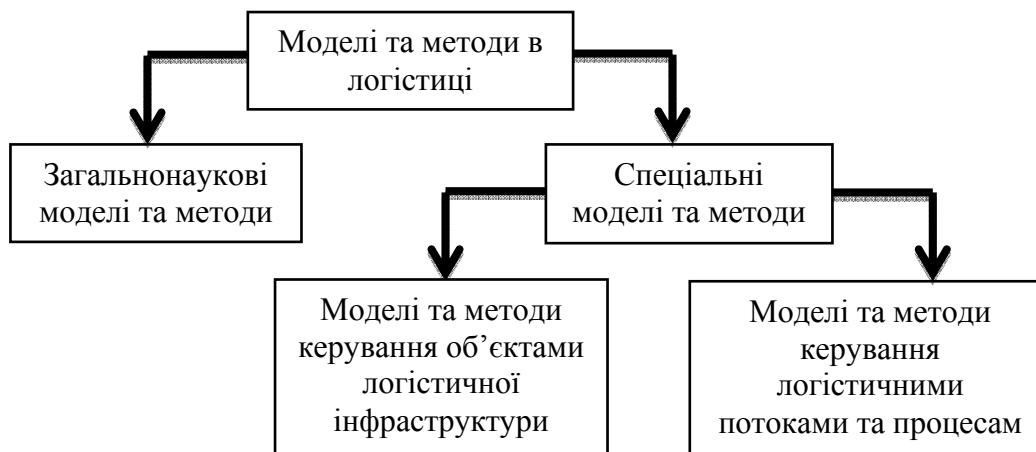


Рисунок 1 – Моделі та методи в логістиці

Джерело: розроблено автором

До загальнонаукових моделей і методів відносяться інструменти моделювання, котрі можна ефективно використовувати не тільки в логістиці, але й в інших галузях наукової та практичної діяльності. До спеціальних моделей і методів належать інструменти моделювання, котрі розроблені та ефективно використовуються для розв'язання логістичних задач, таких як:

- задачі управління об'єктами логістичної інфраструктури (об'єктне моделювання);
- задачі управління логістичними потоками та процесами (процесне моделювання).

Управління ланцюгами постачання також можна ефективно здійснювати, використовуючи різноманітні моделі та методи. Користуючись наведеною на рис. 1 класифікацією спеціальних моделей і методів, які використовуються в логістиці, розглянемо підхід до управління ланцюгами постачання через об'єктне та процесне моделювання.

Об'єктами управління в ланцюгах постачання є інфраструктурні об'єкти, котрі надають свої ресурси для здійснення постачання від початкового постачальника (через усі стадії виробничого процесу) до кінцевого споживача.

Логістичні потоки традиційно поділяються на потоки:

- товарно-матеріальних цінностей – матеріальний потік;
- інформації – інформаційний потік;
- фінансів – фінансовий потік.

Логістичні процеси в ланцюгах постачання визначаються етапністю просування товарно-матеріальних цінностей і супутніх інформаційних і фінансових потоків від початкового постачальника до кінцевого споживача.

Управління ланцюгами постачання здійснюється на основі використання як загальнонаукових, так і спеціальних моделей і методів у логістиці. Розглянемо докладно особливості використання різних моделей і методів у процесі управління ланцюгами постачання.

Моделі та методи управління ланцюгами постачання можна умовно розділити на два блоки (рис. 2).

На практиці ефективне управління ланцюгами постачання відбувається за допомогою використання комбінованих моделей і методів. Наразі виділяють низку концепцій, методів і інструментів управління ланцюгами постачання (табл. 1).



Рисунок 2 – Моделі та методи управління ланцюгами постачання

Джерело: розроблено автором

Таблиця 1 – Концепції, методи та інструменти управління ланцюгами постачання

№	Назва	Коротка характеристика
1	2	3
1	ECR (Efficient Consumer Response)	Головна увага приділяється обслуговуванню споживача, всі контрагенти ланцюгів постачання діють в інтересах споживача
2	VMI (Vendor Managed Inventory)	Постачальник (виробник продукції) зобов'язаний підтримувати страховий запас на своєму власному складі та у споживача
3	CRP (Continuous Replenishment Planning)	Товарообіг між постачальником і торговельним представником повинен безперервно функціонувати на постійній основі
4	FM (Forecasting Methods)	Даний метод орієнтується на використання прогнозних моделей: трендів, інтервального прогнозу та моди
5	SV (Select Vendors)	Особлива увага приділяється вибору постачальника, розглядаються такі критерії, як надійність, якість, ціна та термін постачання

Продовження таблиці 1

1	2	3
6	GT (Game Theory)	Моделюються можливі варіанти поведінки споживача в умовах невизначеного попиту
7	MBM (Make or Buy Model)	Зроблено наголос на мінімізацію витрат, тому на основі аналізу виявляють операції, котрі можуть бути переданими на Outsource
8	JIT (Just in Time)	Для реалізації принципу доставки «точно своєчасно» оптимізуються всі витрати з можливістю використання ресурсів сторонніх організацій
9	ABC-costing	У моделі створюється матриця, в якій ресурси ранжуються за ступенем використання та важливості
10	CRM (Customer Relations Management)	Використовується інформаційна система, в якій містяться данні щодо покупців
11	Ситуаційний аналіз	Використовується моделювання можливих варіантів руху матеріальних потоків у логістиці
12	QR (Quick Response)	Дана модель має на увазі миттєве реагування на зміни в умовах і термінах постачання, використовуючи в роботі технології електронного документообігу та моніторингу
13	TQM (Total Quality Management)	Модель всюди запроваджується в логістичні процеси, система управління якістю проникає в усі сфери логістики, сприяючи уніфікації та координації процесів у всіх інстанціях
14	SCOR-моделі	Впроваджується реінжиніринг і вдосконалюються бізнес-процеси, управління матеріальними потоками вибудовується на основі покращених алгоритмів з усіма контрагентами та учасниками ланцюга постачання
15	IMM (Inventory Management Models)	Модель використовує поняття страхового запасу, система автоматично розраховує визначений запас компонентів, які необхідні для виробництва, враховуючи час відвантаження минулих замовлень

Джерело: розроблено автором на основі [9, 10, 11, 12]

На нашу думку, для регулювання ланцюгів постачання оптимальним варіантом є мультимодальний підхід, який допомагає знизити витрати та оптимізувати кількість учасників. Однак, неможна забувати про аналітичні методи, моделювання та проектування матеріальних потоків. Мультимодальний підхід до регулювання ланцюгів постачання містить [13]:

- аналіз показника точки беззбитковості (нульової точки);
- метод скорочення мережі (зосередження на формуванні процесів на одній точці);
- моделювання можливих ризиків;
- аналіз ринку, валютних курсів, економічних ситуацій.

Застосування аналітичних методів ефективно при використанні мінімальної інформації. Дані методи часто використовуються для моделювання різних ситуацій на ринку та оцінки можливості введення нових функцій у короткостроковій перспективі. У них використовуються математичні моделі, формули, графіки, а також інші допоміжні інструменти для вирішення поставлених задач. Один з небагатьох мінусів аналітичних методів – неможливість врахувати всі чинники, котрі здійснюють вплив на

економічну ситуацію, тому моделі створюються для роботи в ідеальних умовах, яких на практиці досягти практично неможливо.

Метод моделювання дозволяє враховувати специфіку та компоненти всіх елементів ланцюгів постачання. Він використовується для побудови візуалізаційних моделей, щоб було зручніше розглядати весь процес постачання. Також у даній моделі можна деталізувати кожний процес. У порівнянні з аналітичними методами, метод моделювання враховує набагато більше чинників. Однак, чим більше модель деталізована, тим більш громіздкою та складною вона стає для розуміння [14].

Неможливо не відмітити сучасну тенденцію до інформатизації, в логістичні процеси вкорінюються технології блокчейн, які мають на увазі створення інформаційної та більш прозорої моделі взаємодії на всіх рівнях постачання. У ланцюгах постачання приймають участь такі контрагенти:

- 1) постачальник;
- 2) виробник;
- 3) споживач;
- 4) дистриб'ютор;
- 5) роздрібні торговці.

Усі контрагенти можуть вносити й робити замітки щодо процесів, які відбуваються з вантажем. Використання блокчейн-технологій допомагає створити кожному товару унікальний код у системі, а права на редагування статусу даного вантажу є тільки у учасників ланцюгів постачання. У кожного учасника ланцюгів постачання також є профіль, у якому міститься інформація відносно контрагента, сертифікатів, дозволів, контактів. У відкритому доступі висвітлюється не вся інформація щодо профілю, можна встановити обмеження на перегляд, але сертифікати та дозволи завжди залишаться видимими для всіх учасників ланцюга постачання.

Проект e-ECD (європейський електронний сертифікат очищення) є новим пріоритетним напрямком у розвитку цифрових логістичних процесів. Завдяки даному проекту буде відбуватися скорочення кількості «чорних» списків перевізників, які не виконують свої зобов'язання перед контрагентами. Доступність до даних сертифікатів полегшує для постачальників пошук контрагента, можуть бути виділені преференції для учасників з даним сертифікатом.

Варто розглянути платформу Cargo Stream, яка виконує функцію агрегатора логістичних операцій. Даний сервіс допомагає вибрати оптимальний маршрут перевезення, враховуючи всі потреби замовника. Також на складах акумулюються товари, щоб знизити вартість логістичних послуг. Мультимодальні перевезення мають більшу значимість для економії.

Новим напрямком у логістиці є «зелений» логістичний реінжиніринг, який буде впливати на весь логістичний ланцюжок підприємства. Раніше вважалось, що даний процес займається тільки екологічним питанням, але метод себе зарекомендував з точки зору зниження витрат і ефективності ведення бізнес-процесів. Наприклад, усе частіше стали використовувати технологію використання багаторазових контейнерів, що призвело до зниження витрат на утилізацію тари. Поступово впроваджується програма «нульових відходів», що дозволяє в перспективі використовувати повторно матеріали для палива, упаковки та інших ресурсів. До інших ініціатив «зеленого» реінжинірингу відносять такі:

- підвищення ефективності перевезень;
- покращення логістичних операцій;
- багаторазова упаковка;
- уніфікований механізм вибору сировини.

На жаль, технологія «зеленого» реінжинірингу мало використовується на території України. Більшість підприємств вбачають у подібних технологіях тільки зростання витрат без подальших перспектив.

Висновки. 1. У мінливих умовах ведення бізнесу нагальною є потреба в адаптації існуючих і створенні нових механізмів у логістиці

2. Визначено, що вибір і запровадження на практиці будь-якої однієї універсальної моделі чи методу адміністрування ланцюгів постачання є достатньо складним і не завжди ефективним.

2. Переважна більшість підприємств використовують складні гібридні моделі, засновані на комбінації моделей і методів, які відображують поєднання класичних і інноваційних підходів для розв'язання різноманітних бізнес-задач.

4. Найбільш актуальною моделлю для відновлення штатного режиму роботи ланцюгів постачання є модель Quick Response, яка передбачає миттєве реагування на зміни в умовах і термінах постачання, використовуючи в роботі технології електронного документообігу та моніторингу.

Список літератури

1. Дубовик С.Г., Сигида Н.О., Спесивий Ю.Ю. Управління ланцюгами поставок підприємств, їхні сутність і структура. *Економіка та суспільство*. 2018. №18. С. 402-410.
2. Колосок В.М., Бірюков М.М. Аналіз підходів до формування економічних механізмів управління ланцюгами постачань. *Вісник приазовського державного технічного університету. Серія: Економічні науки*. 2017. Вип. 34. С. 313-319.
3. Верстак А.В., Іщенко С.В., Верстак О.М. Розробка механізмів ефективного управління сталими ланцюгами постачань виробничого підприємства. *Актуальні проблеми економіки*. 2017. № 2 (188) С. 84-94.
4. Carter C., Easton P.. Sustainable supply chain management: evolution and future directions. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 2011. Vol. 41, № 1. P. 46-67.
5. Carter C., Rogers D.. A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 2008. Vol. 38 Issue 5. P. 360-387.
6. Williamson O. Outsourcing: transaction cost economics and supply chain management. *Journal of Supply Chain Management*. 2008. Vol. 44, № 3. P. 5-16.
7. J. Arlbjørn, H. Haas, K. Munksgaard. Exploring supply chain innovation. *Logistics Research*. 2011. №3 (1). P. 3-18.
8. Grawe S. Logistics innovation: a literature-based conceptual framework. *International Journal of Logistics Management*. 2009. № 20(3). P. 360-377.
9. Маркетинговий інструментарій управління попитом на товари і послуги: монографія / Р.В. Федорович та ін.; за ред. проф. Р.В. Федоровича. Тернопіль: Підручники і посібники, 2016. 244 с.
10. Гарада В.Г., Міценко Н.Г., Міщук І.П. Зміст і напрямки застосування логістичних концепцій у логістичному менеджменті. *Вісник Львівської комерційної академії*. 2015. Вип. 48. С. 127-131.
11. Вольвач І.Ю. Досвід впровадження логістичної концепції виробництва «Just in Time». *Вісник Хмельницького національного університету*. 2009. №4, Т2. С. 250-253.
12. Федосеев В.А., Шишкін В.О. Транспортна логістика на промисловому підприємстві: методологія та концепція використання. *Менеджмент та підприємництво: Тренди розвитку*. 2017. Вип. 2 (02). С. 119-126.
13. Науково-технічні дослідження у галузі транспорту: колективна монографія / за заг. ред. Д.В. Ломотька. Івано-Франківськ: Видавець Кушнір Г.М., 2022. Т.2. 216 с.
14. Ніколіна І.І., Петровська К.С. Моделювання логістичної стратегії підприємства. *Регіональна економіка та управління*. 2018. №1(19). С. 97-100.
15. Теоретичні і методологічні основи логістики транспортних і виробничих систем: монографія / Аулін В.В. та ін.; під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2021. 503 с.

References

1. Dubovyk, S.H., Syhyda, N.O. & Spesyvyj, YU.YU. (2018). Upravlinnia lantsiuhamy postavok pidpryemstv, ikhni sutnist' i struktura [Management of enterprise supply chains, their essence and structure]. *Ekonomika ta suspil'stvo – Economics and society*, 18, 402-410 [in Ukrainian].
2. Kolosok, V.M. & Biriukov, M.M. (2017). Analiz pidkhodiv do formuvannia ekonomichnykh mekhanizmiv upravlinnia lantsiuhamy postachan' [Analysis of approaches to the formation of economic mechanisms for managing supply chains]. *Visnyk pryazovs'koho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu. Seriya: Ekonomichni nauky – Bulletin of the Priazovskogo State Technical University. Series: Economic Sciences*, 34, 313-319 [in Ukrainian].
3. Verstiak, A.V., Ishchenko, S.V. & Verstiak, O.M. (2017). Rozrobka mekhanizmiv efektyvnoho upravlinnia stalymy lantsiuhamy postachan' vyrobnychoho pidpryemstva [Development of mechanisms for effective management of sustainable supply chains of a manufacturing enterprise]. *Aktual'ni problemy ekonomiky – Actual problems of the economy*, 2 (188), 84-94 [in Ukrainian].
4. Carter, C. & Easton, P. (2011). Sustainable supply chain management: evolution and future directions. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 41, № 1, P 46-67 [in English].
5. Carter, C. & Rogers, D. (2008). A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 38, Issue 5, P. 360-387 [in English].
6. Williamson, O. (2008). Outsourcing: transaction cost economics and supply chain management. *Journal of Supply Chain Management*, Vol. 44, № 3, P. 5-16 [in English].
7. Arlbjørn, J., Haas, H. & Munksgaard, K. (2011). Exploring supply chain innovation. *Logistics Research*, № 3 (1), 3-18. [in English].
8. Grawe, S. (2009). Logistics innovation: a literature-based conceptual framework. *International Journal of Logistics Management*, № 20(3), 360-377 [in English].
9. Fedorovych, R.V. et al. (2016). *Marketynhovyy instrumentarij upravlinnia popytom na tovary i posluhy [Marketing tools for managing the demand for goods and services]*. Ternopil': Pidruchnyky i posibnyky [in Ukrainian].
10. Harada, V. H., Mitsenko, N. H. & Mischuk, I. P. (2015). Zmist i napriamky zastosuvannia lohistrychnykh kontseptsij u lohistrychnomu menedzhmenti [Content and directions of application of logistics concepts in logistics management]. *Visnyk L'vivs'koi komertsijnoi akademii – Bulletin of the Lviv Commercial Academy*, 48, 127-131 [in Ukrainian].
11. Vol'vach, I.YU.(2009). Dosvid vprovadzhennia lohistrychnoi kontseptsii vyrobnytstva «Just in Time» [Experience of implementing the logistics concept of «Just in Time» production]. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu – Bulletin of the Khmelnytskyi National University*. 4, 2, 250-253 [in Ukrainian].
12. Fedosieiev, V.A. & Shyshkin, V.O. (2017). Transportna lohistyka na promyslovomu pidpryemstvi: metodolohiia ta kontseptsiiia vykorystannia [Transport logistics at an industrial enterprise: methodology and concept of use]. *Menedzhment ta pidpryemnytstvo: Trendy rozvytku – Management and entrepreneurship: Development trends*, 2 (02), 119-126 [in Ukrainian].
13. Lomot'ka, D.V. (Eds.). (2022). *Naukovo-tekhnicni doslidzhennia u haluzi transportu [Scientific and technical research in the field of transport]*. Ivano-Frankivs'k: Kushnir H.M. [in Ukrainian].
14. Nikolina, I.I. & Petrovs'ka, K.S. (2018). Modeliuvannia lohistrychnoi stratehii pidpryemstva [Modeling of the logistics strategy of the enterprise]. *Rehional'na ekonomika ta upravlinnya – Regional economy and management*, 1(19), 97-100 [in Ukrainian].
15. Aulin, V.V. et al. (2021). *Teoretychni i metodolohichni osnovy lohistyky transportnykh i vyrobnychykh system [Theoretical and methodological foundations of the logistics of transport and production systems]*. Kropyvnytskyi: Lysenko V.F. [in Ukrainian].

Olena Khachatryan, senior lecturer, PhD in econ. sci.

Flight Academy of the National Aviation University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Supply chain management – evaluation of models and methods

A study of models and methods of supply chain management was conducted. In an ever changing business conditions, the need has been identified for adapting existing and creating new mechanisms in logical stick.

An overview is presented and an analytical assessment of models, methods and concepts used in supply chain management in modern conditions. Generalization of the experience of leading experts made it possible to conditionally divide the models and methods used in logistics into general scientific and special ones.

Special models and methods are modeling tools that are designed and effectively applied to solving such logistics problems as problems of managing logistics infrastructure objects (object modeling) and tasks of managing logistics flows and processes (process modeling). The optimal approach to supply chain regulation is substantiated.

The most current model for restoration the normal mode of operation of supply chains is the Quick Response model, which is based on immediate action taken when delivery dates change; the model is being implemented into digital platforms to actively track cargo status and possible delays. In conditions of lack of information, it is proposed to use analytical methods, including mathematical models, and various auxiliary tools for solving assigned problems.

The prospects for applying a multimodal approach to the regulation of supply chains, «green» logistics reengineering, models and methods of supply chain management based on the introduction of digital technologies: block chain, as well as the creation of an information platform in which the main objects of supply chains will be involved are explored. A draft European electronic certificate is being considered cleaning, designed to reduce the time costs of finding logistics operators; digital Cargo Stream platform, which is an aggregator for ordering logistics services. The key features of «green» logistics reengineering, based on the unification of the mechanism for selecting raw materials and the use of reusable containers, have been identified.

lancet supply management, logistics, lancet supply planning, models and methods, digital technologies

Одержано (Received) 20.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 30.11.2023
Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

UDC 656.052

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.206-213](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.206-213)

Natalia Rozhko, Prof., DSc., **Liubomyr Slobodian**, PhD tech. sci., **Anatolii Matviishyn**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Maria Babii**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Dmytro Mironov**, PhD tech. sci.
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine
e-mail: kaf_am@ukr.net

Main aspects of third party logistics activities in modern transport realities

The article substantiates the aim of responsible transport logistics, which consists of the delivery of goods on time with minimal investment of labour and material resources. The level of responsibility is considered at each step of shipment of goods from the producer to the consumer. 4 stages of effective transport logistics are offered by the authors. It has been established that at the first stage it is crucial to formulate the tasks clearly for its solution by logistics in business; the second stage is analysing of the Best Practices in the researched field - the study of competitors' logistics, the study of available information; the third stage is the development of a specific action plan of the transport enterprise; the fourth is the introduction of improvements after the first results of the work.

transport logistics, transport enterprise, supply chain, logistics mix, logistics mission

© Natalia Rozhko, Liubomyr Slobodian, Anatolii Matviishyn, Maria Babii, Dmytro Mironov, 2023

Introduction. The analysis of the logistics mission should provide the transport company with a system for improvement of the quality of its facilities and services, competitiveness. The process of customer service should ensure the provision of additional competitive advantages in the supply chain in order to maximize the overall value of the provided services for the end user [1, 3]. The increase of the level of transport logistics is possible assuming the usage of the 3PL service (third-party logistics), which means the provision of a complex of logistics services from delivery and address storage to order management and tracking of the movement of goods [5, 6].

Currently, there are no specific sets of methods and techniques for the effective functioning of the transport logistics mix. Therefore, further research in this direction may yield some desirable result. Particular attention should be paid to the essence of the transport logistics mix and substantiation of the essence of the 3PL operator in this system. The main mistakes at the work with the 3PL operator, which lead to additional costs and affect the time of delivery of goods, should be identified.

Analysis of recent researches and publications. The development of theoretical and practical aspects of the functioning of the transport and logistics mix was represented in the works of the Ukrainian researchers [2, 4] and the researchers of other countries [7, 8]. Among the main recent scientific publications, the monograph edited by [5, 6] should be noted first. It examines third-party logistics within the scope of the study of the logistics mix in the transport supply chain. Particular attention should be paid to the works of foreign scientists, including authors such as D.K. Alain and S.J. Bell. Leading in this field are the works of Ukrainian scientists such as O. Yu. Bochko, S.V. Kovalchuk, M.A. Kozoriz, M.A. Oklandera, I.V. Petryk, Y.M. Petrovycha and others.

Despite the thorough level of scientific research, there are several unsolved problems related to substantiation of the level of responsibility of transport logistics within the logistics mix.

The aim of the article. The aim of logistics at a transport enterprise is to ensure the availability of the appropriate goods/services in the required quantity, in the right form, at the proper place and at the specific time for the relevant consumer at the appropriate price. This model is also known as the 7R model, derived from the concept of "right" and translated from English, meaning "appropriate." It consists of the following elements: right product – the necessary product, right quality – the required quality, right quantity – the necessary quantity, right time – at the required time, right place – at the required location, right customer – for the relevant consumer, right cost – with the necessary level of costs. In modern conditions, this model is supplemented by the concept of "responsibility." The goal of responsible transport logistics is the delivery of goods (passengers) on time with minimal investment of labour and material resources. The level of responsibility is considered at each step of shipment of goods from the producer to the consumer or to the final destination.

Results. The main condition of logistics to adhere to this principle requires the high quality raw materials, semi-finished products, goods and their components and transportation is carried out with the maximum level of responsibility and transport conditions.

Let us note that responsible logistics has evolved into an independent sphere of commercial activity. The primary factors driven by the advanced development of logistics and the increasing investment attractiveness of the warehouse market are as follows:

- a) High rates of economic growth and the standard of living;
- b) Improvement of the investment climate;
- c) Entry into the Ukrainian markets of large foreign companies (holdings) that require modern warehouse complexes compliant with international standards [1].

Thus, the logistics mix reflects the essential features of the logistics mission of the enterprise. The key elements are quality, time, and costs. A transport enterprise must develop

a logistics mission that aligns with both overarching marketing and production strategies, encompassing both long-term and short-term perspectives. The aim of logistics at a transport enterprise should be the coordination of material and ancillary flows as the foundation for achieving of the success in business.

Therefore, the logistic mission should ensure the transport enterprise with a system increasing the quality of its products and services, competitiveness, and integration of supply, production and marketing activities. The servicing process for consumers should provide additional competitive advantages in the supply chain to maximize the overall value of the product/service for the end consumer. To implement effective transport logistics, it is advisable to undergo the following steps (Figure 1). At the first stage, it is crucial to formulate the tasks that should be solved by transport logistics in the business. Efficient responsible transport logistics solves a multitude of both internal and external tasks of the company: supply planning, transport management and/or information flow management, storage, distribution, customs, legal, and other issues. Its primary goal in constructing an effective flow management chain is to consolidate all company resources, optimally allocate them in numerous business processes and reduce costs. It is reasonable to orientate towards the specifics of the transport market infrastructure, which is advisable to study. It is advisable to justify the need of a warehouse for storage or suppliers will independently deliver the cargo and customers can pick up the goods for self-pickup. It is reasonable to construct a complex logistics chain in case when complying with the terms of an international contract involving the transport of goods by the transport enterprise, customs clearance in Ukraine, organization of storage, and delivery to the final consumer's doorstep.

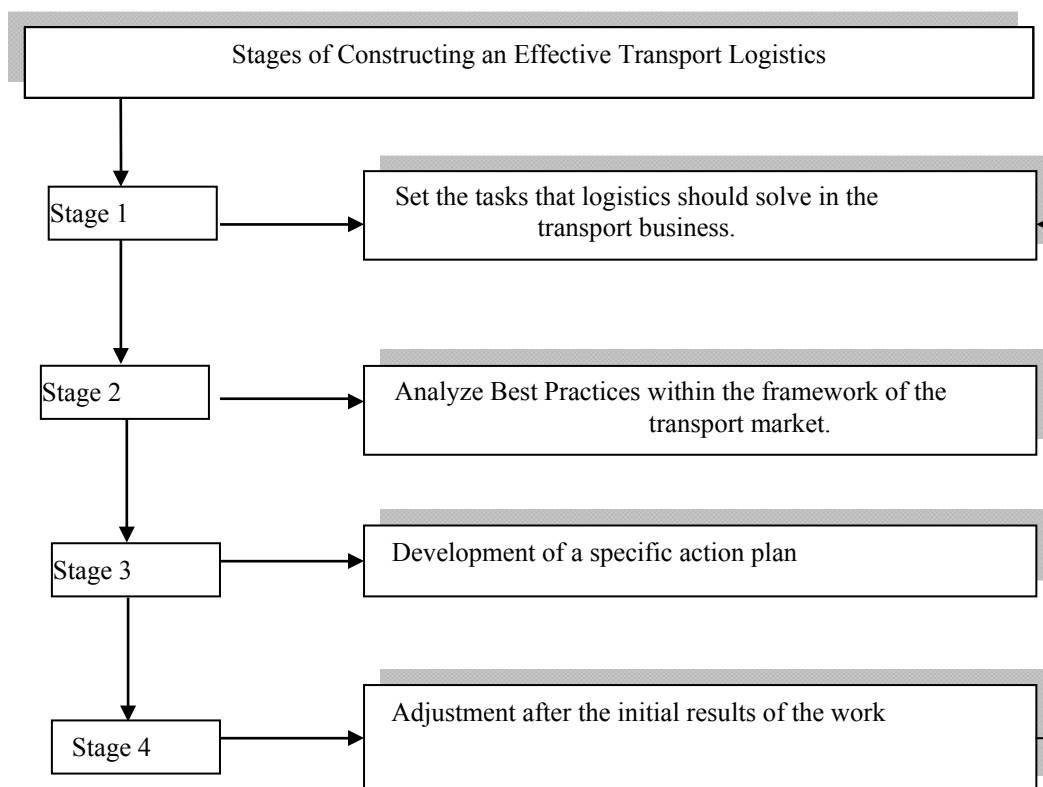


Figure 1 – Construction of Effective Transport Logistics

Source: Systematized by the author

At the second stage, it is advisable to analyze Best Practices in the researched field, examine how transport logistics is organized among competitors, and study all available

information. Often, it is expedient to use existing developments by adapting them to one's specific needs.

The third stage is associated with the development of a specific action plan. It is advisable for the transport enterprise to clearly define with whom and under what conditions it will collaborate in the future. Selecting a logistics partner, attention should be given to the availability of recommendations from reputable companies and ISO certification. The communication style of the logistics company manager can also influence the choice of a partner.

It is also advisable to establish a budget and deadlines for each stage. Under such conditions, the human factor should be taken into account: all employees must have a clear understanding of their responsibilities, the role they play in a particular business process, and the goals and tasks they need to accomplish. Additionally, plans, strategies and calculations must be documented in a separate file (for example, the P&L of the entire project, division of tasks by responsibility and deadlines for completion).

The fourth stage is characterized by making adjustments after the initial results of the work. It may be necessary to modify the initial action plan: it might involve reducing/enlarging the team, reviewing functional responsibilities, adjusting the budget, etc.

It is essential to be prepared for both optimistic and pessimistic scenarios of events: if deviations from the initially planned course arise, the enterprise will not have to urgently seek solutions.

Responsible transport logistics is the segment that is dynamically advancing in the field of warehousing and goods transportation in the modern economy of Ukraine. Warehouses providing responsible storage services are equipped with the latest equipment in line with the current trends in the warehouse industry, ensuring the highest level of product storage.

The basis of responsible transport logistics should be:

- Complete assurance of cargo integrity;
- Full assurance of cargo safety;
- Absence of expenses for maintaining warehouse personnel;
- Absence of expenses for maintaining warehouse facilities;
- High quality and speed of processing, unloading and transportation of goods.

We suggest to use the services of 3PL (from English third-party logistics), which denotes the provision of a range of logistics services from delivery and address storage to order management and goods tracking to enhance the level of responsible logistics. The functions of a 3PL provider include organizing and managing transportation, inventory tracking and management, preparation of import-export and freight documentation, warehouse storage, cargo handling and delivery to the end consumer.

According to the "Council of Supply Chain Management Professionals," a 3PL operator is a company that provides a sufficient logistic services for clients. The services should be integrated or provided separately. In general, 3PL operators offer services such as transportation, transport logistics, warehousing, goods storage, responsible storage, cross-docking, inventory management, packing and dispatch [3].

There are four categories of 3PL operators:

1. Standard 3PL Provider is the primary form of a 3PL operator. They undertake responsibilities such as picking and packing, warehousing and distribution – the fundamental functions of logistics. For most of these firms, 3PL functions are not their core business activity.

2. Service Developer is the type of 3PL operator who offers its clients enhanced value-added services, such as specific package detection and tracking systems or the

provision of a unique security system. These operators emphasize having advanced Warehouse Management Systems (WMS) and will encourage clients to implement an increasing amount of IT services.

3. The Customer Adapter: This type of 3PL operator comes to the aid of the client and essentially takes full control of the company's logistics activities. The 3PL operator improves logistics dramatically but does not develop new services. The client base for this type of 3PL operator is typically very small.

4. The Customer Developer: This is the highest level a 3PL operator can achieve regarding its processes and types of activities. This occurs when the 3PL operator integrates with the client and assumes all logistics functions. Such operators will have only a few large clients but will handle a very significant volume of tasks for them [7, 9, 10].

According to the consulting company SJ Consulting Group the following can be concluded that the introduction of the 4 categories of 3PL operators the results of client companies as depicted in Figure 2.

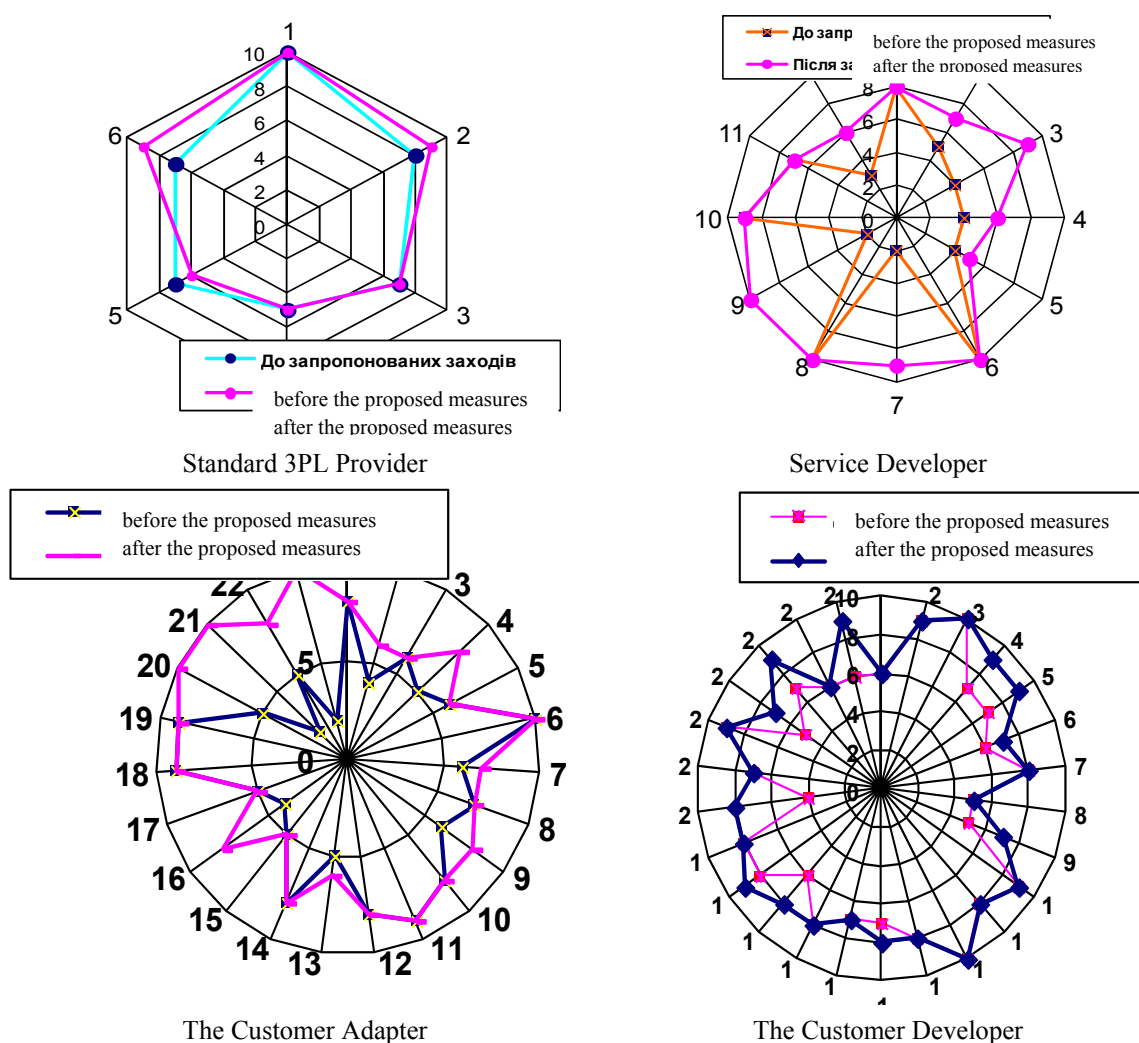


Figure 2 – Results of client companies' activities with the implementation of the 4 categories of 3PL operators
 Source: Systematized by the author

To confirm the above statements we provide an example of the dynamics of the aggregate income of the top 50 global logistics companies in the 3PL operator market, as depicted in Figure 3.

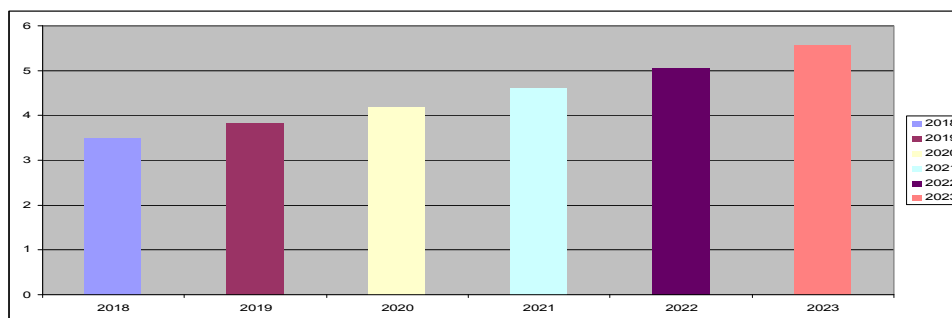


Figure 3 – Dynamics of the aggregate income of the top 50 global logistics companies in the 3PL market, billion dollars

Source: Systematized by the author

The American consulting company SJ Consulting Group annually publishes the TOP-50 ranking of the world's largest logistics operators, based on the companies' income. According to the results of 2022, the aggregate income of the top 50 logistics companies was \$341 billion, which is 14% more than in 2021. The TOP-50 ranking of the world's largest logistics operators calculates income from a wide range of logistics services provided by companies, including freight forwarding, air transportation, maritime transportation, cargo and intermodal transportation, as well as storage and specialized transportations.

The ranking of leading 3PL operators in 2022 was topped by Amazon, with income of \$42.7 billion for providing logistics services, that was less than 20% of the company's total revenue for the year 2022.

However, significant errors in working process with a 3PL operator may arise, leading to additional expenses and impacting delivery time:

1. Unnecessary notifications to the 3PL operator about the arrival and unloading of the cargo. The loading/unloading process can take several hours, and in some cases, up to 24 hours, which may lead to delays in transportation and the completion of the loading/unloading process outside regular working hours. It results in additional fees for 3PL operators for overtime work.

2. Submission of orders for receiving/picking/marking of the cargo on time. The 3PL operator plans its work several days in advance. In situations where the cargo is urgent but was not included in the work plan, the 3PL operator will have to process the cargo outside regular working hours, resulting in additional costs for the client.

3. Approval of transport unit numbers on time. The 3PL operator cannot load cargo into any available transport unit arriving for loading. The client is required to provide a written list of transport units, containers and wagon numbers with precise instructions regarding the correspondence of transport unit plates to the appropriate transport unit. Clients often forget to provide this information, creating downtime for transportation, which leads to additional expenses for downtime and overtime work.

4. Changes of label format, WMS file formats, the content of information on labels, etc. In such situations, cargo processing is delayed, delivery plans are postponed, and significant additional expenses for the restoration of certain programs. Most of 3PL operators use the services of IT companies, it is impossible to make certain changes instantly because IT companies have their own schedule of planned work, and all work outside the plan will be done for an additional fee, which will be passed on to the client who ordered the corresponding logistics.

The high growth rates of the Ukrainian e-commerce sector lead to growth of the 3PL logistics market. Provider can be selected to meet the requirements of business by 100%. Among the top 3PL companies in Ukraine are Raben Ukraine, FM Logistics, Meest Express, Denka Logistics, and others. Large logistics providers operate not only within the borders of

Ukraine but also internationally. Therefore, companies, requiring expansion or already having international partners, should contact prominent and well-established logistics providers.

However, the rates of major players in the logistics market are also higher. For small companies, it makes sense to pay attention to less popular 3PL operators. The cost of their services will be lower, while quality is guaranteed. These companies should primarily focus on their business needs rather than the popularity of the provider. If a company cannot find a suitable option, it can submit a request on the WareTeKa

Conclusions. Summarizing the above, we can state that the implementation of a 3PL operator will accelerate the process of convincing potential and existing clients about the ability to transform their supply chains, ensuring exceptional control and service at the lowest cost. Orientation towards continuous improvement through strategic modeling can help differentiate logistic services from other providers and establish long-term relationships with clients.

The prospects for further research in this direction involve studying the experiences of other countries regarding the advantages and disadvantages of employing 3PL and 4PL operators.

Список літератури

1. Бочко О. Ю., Петрик І.В. Вимірювання ефективного функціонування логістики в Україні із застосуванням Logistics Performance Index. *Економіка та суспільство*. 2017. Вип. 9. С. 568–576. URL: http://www.economyandsociety.in.ua/journal/9_ukr/98.pdf. (дата звернення: 24.01.2018).
2. Григорак М.Ю. Інтелектуалізація ринку логістичних послуг: концепція, методологія, компетентність: монографія. К.: Сік Груп Україна, 2017. 513 с.
3. Колодізева Т.О. Еволюція постачальників логістичного сервісу: проблеми теорії та практики. *Сучасні проблеми управління підприємствами: теорія та практика* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., 18-19 березня 2019 р. (м. Харків, м. Торунь,) Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця. URL: <https://scholar.google.com.ua/scholar?oi=bibs&cluster=1086421694166831151&btnI=1&hl=ru>.
4. Ковальчук С.В. Підвищення якості продукції в контексті маркетингової логістики. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2010. Т.2. №2 (149). С.60-63.
5. Ткаченко А.М., Шевчук А.М. Логістичне управління вантажоперевезеннями: монографія. Запоріжжя : ЗДІА, 2010. 248 с.
6. Шевченко І. В. Впровадження інновацій у логістичну діяльність вітчизняних підприємств як фактор підвищення конкурентоспроможності. *Конкурентоспроможність та інновації : проблеми науки та практики*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 18-19 листопада 2015 року. Харків : ФОП Лібуркіна Л. М., 2015. С. 307-310.
7. 3PL, 4PL, and 5PL Explained : Red Stag Fulfillment web-site. URL: <https://redstagfulfillment.com/3pl-4pl-5pl-explained/> (Last accessed 14.02.2023).
8. The Future of the Supply Chain: Emerging Trends and Innovations : Supply Chain Technology News. URL: <https://supplychaintechnews.com/index.php/technology/the-future-of-the-supply-chain-emerging-trends-and-innovations> (Last accessed 14.02.2023).
9. Building the Movement : B Lab website URL: <https://www.bcorporation.net/en-us/movement> (Last accessed 14.02.2023).
10. Vander Schee B.A. Crowdsourcing: Why the Power of the Crowd is Driving the Future of Business. *Journal of Consumer Marketing*. 2009. 26(4). P. 305–306. <https://doi.org/10.1108/07363760910965918>.

References

1. Bochko, O. Yu. & Petryk, I. V. (2017). Vymiriuvannia efektyvnogo funktsionuvannia lohistyky v Ukraini iz zastosuvanniam Logistics Performance Index [Assessment of the effective functioning of logistics in Ukraine using the Logistics Performance Index]. *Ekonomika ta suspil'stvo – Economy and Society*, 9, 568–576. Retrieved from URL: http://www.economyandsociety.in.ua/journal/9_ukr/98.pdf. (24.01.2018) [in Ukrainian].
2. Hryhorak, M. Yu. (2017). *Intelektualizatsiia rynku lohistychnykh posluh: kontseptsiia, metodolohiia, kompetentnist'* [Intellectualization of the logistics services market: concept, methodology, competence]. Kyiv: Sik Group Ukraine [in Ukrainian].
3. Kolodzieva, T. O. (2019). Evoliutsiia postachal'nykiv lohistychnoho servisu: problemy teorii ta praktyky [Evolution of logistic service providers: problems of theory and practice]. *Modern Problems of Enterprise Management: Theory and Practice. Mezhdunarodnaia nauchno-prakticheskaiia konferentsiia (18-19 bereznia*

- 2019 r.) – *International scientific and practical conference*. Kharkiv: KhNEU im. S. Kuznetsia. URL: <https://scholar.google.com.ua/scholar?oi=bibs&cluster=1086421694166831151&btnI=1&hl=ru> [in Ukrainian].
4. Koval'chuk, S.V. (2010). Pidvyschennia iakosti produktsii v konteksti marketynhovoї lohistyky [Improvement of the product quality in the context of marketing logistics]. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu. Ekonomichni nauky – Bulletin of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*, 2(149), 60-63 [in Ukrainian].
 5. Tkachenko, A. M. & Shevchuk, A. M. (2010). *Lohistychne upravlinnia vantazhoperevezenniamy [Logistic management of cargo transportation]*. Zaporizhzhia: ZDIA [in Ukrainian].
 6. Shevchenko, I. V. (2015). Vprovadzhennia innovatsij u lohistychnu diial'nist' vitchyznianskykh pidpriemstv iak faktor pidvyschennia konkurentospromozhnosti [Introduction of innovations in the logistics activities of domestic enterprises as a factor in increasing competitiveness]. *Competitiveness and Innovations: Problems of Science and Practice: Mezhdunarodnaia nauchnoprakticheskaia konferentsiia (18-19 lystopada 2015 roku) – International Scientific-Practical Conference (pp. 3-7-310)*. Kharkiv: FOP Lyburkina L. M. [in Ukrainian].
 7. 3PL, 4PL, and 5PL Explained: Red Stag Fulfillment website. Retrieved from URL: <https://redstagfulfillment.com/3pl-4pl-5pl-explained> [in English].
 8. The Future of the Supply Chain: Emerging Trends and Innovations: Supply Chain Technology News. Retrieved from URL: <https://supplychaintechnews.com/index.php/technology/the-future-of-the-supply-chain-emerging-trends-and-innovations> [in English].
 9. Building the Movement: B Lab website Retrieved from URL: <https://www.bcorporation.net/en-us/movement> [in English].
 10. Vander Schee, B. A. (2009). Crowdsourcing: Why the Power of the Crowd is Driving the Future of Business. *Journal of Consumer Marketing*, 26(4), 305–306. <https://doi.org/10.1108/07363760910965918> [in English].

Н.Я. Рожко, доц., д-р екон. наук, **Л.М. Слободян**, канд. техн. наук, **А.Й. Матвійшин**, доц., канд. техн. наук, **М.В.Бабій**, доц., канд. техн. наук, **Д.В. Міронов**, канд. техн. наук.

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

Основні аспекти діяльності third party logistics в сучасних реаліях транспортних перевезень

У роботі визначено мету відповідальної логістики, яка полягає в доставці вантажів у встановлені терміни з мінімальними витратами праці та матеріальних ресурсів з урахуванням ступеня відповідальності на кожному етапі доставки вантажу від виробника до споживача.

Автором запропоновано чотири етапи ефективної відповідальної логістики. Підтверджено, що на першому етапі доцільно поставити завдання, які має вирішувати бізнес-логістика. Другий етап присвячений аналізу передового досвіду в досліджуваній області, вивченню логістики конкурентів, аналізу наявної інформації. Третій етап передбачає розробку стратегії підприємства.

Четвертий етап вносить корективи після перших результатів роботи. У дослідженні стверджується, що логістична місія повинна забезпечувати систему, яка спрямована на підвищення якості продукції та послуг підприємства, його конкурентоспроможності, інтеграції постачальної, виробничої та маркетингової діяльності. У процесі обслуговування споживачів система також повинна забезпечувати додаткові конкурентні переваги в ланцюжку поставок, щоб максимізувати загальну вартість товарів для кінцевого споживача.

Для підвищення рівня відповідальної логістики пропонується застосовувати послуги 3PL (від англ. third-party logistics), що означає надання комплексу логістичних послуг від доставки та складування на місці до управління замовленнями та відстеження руху вантажу. У роботі названо основні помилки в роботі 3PL оператора, які призводять до додаткових витрат і впливають на терміни доставки.

Підсумовуючи вищесказане, можна сказати, що використання оператора 3PL прискорить процес переконання потенційних і поточних клієнтів у здатності трансформувати свої ланцюги поставок – забезпечуючи винятковий контроль і обслуговування за найнижчою ціною. Зосередження на постійному вдосконаленні процесів за допомогою стратегічного моделювання може допомогти відрізнити логістичні послуги від інших постачальників і встановити довгострокові відносини з клієнтами.

логістика, ланцюг поставок, логістичний комплекс, вартість товару, місія, відповідальна логістика

Одержано (Received) 02.11.2023

Прорецензовано (Reviewed) 06.12.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 629.331:656.13

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.214-222](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.214-222)**І.О. Хітров**, доц., канд. техн. наук*Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна**e-mail: i.o.khitrov@nuwm.edu.ua*

Дослідження впливу конструктивної надійності і безпечності транспортного засобу для здійснення перевезень та пристосованості до технічного обслуговування

У сучасному світі, коли транспорт є невід'ємною складовою повсякденного життя, важливим аспектом є не лише функціональність транспортних засобів, а також їх конструктивна надійність, безпека та здатність до ефективного технічного обслуговування. Розуміння цих аспектів дозволить розробникам у співпраці з власниками транспортних засобів оптимізувати конструкцію, забезпечуючи високий рівень безпеки та надійності, а також спростити процес обслуговування для тривалого та безперебійного використання. Це дослідження присвячене вивченню впливу обраних факторів на транспортні засоби, відображення їх у перевізному процесі та адаптованості до технічного обслуговування.

транспортний засіб, конструкція, надійність, технічне обслуговування, перевезення

Постановка проблеми. Автомобільний транспорт є однією з найпоширеніших та ефективних форм транспорту в сучасному світі. Він визначається не лише як засіб переміщення, але й як ключовий елемент розвитку глобальної економіки та зручності людей у їхньому повсякденному житті.

Досягнення високого рівня надійності та безпеки на автомобільному транспорті вимагає спільних зусиль виробників, власників транспортних засобів (надалі в тексті ТЗ), технічних експертів та галузевих інституцій. Постійний технічний прогрес та вдосконалення стандартів безпеки спрямовані на те, щоб забезпечити надійне і безпечне функціонування всіх учасників перевізного процесу.

Надійність ТЗ безпосередньо залежить від їхнього технічного стану (регулярне технічне обслуговування, діагностування і своєчасний ремонт є важливими частинами забезпечення його надійності). Застосування передових систем контролю та безпеки може покращити надійність, запобігаючи аварійним ситуаціям та зменшуючи ризик виникнення несправності (відмови).

Однак тут є низка проблем, зокрема у складності вибору досліджень, щоб надати єдині предметні висновки, щодо оцінки впливу конструктивного виконання ТЗ на ефективність перевізного процесу, інтегрування в дорожнє середовище та пристосованості до технічного обслуговування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Науково-прикладні дослідження в достатній мірі розкривають результати взаємозв'язку між конструкцією ТЗ та ефективністю його використання.

Варто зазначити, що надійність і безпечність таких складних об'єктів, якими є транспортні засоби для дорожнього руху, залежить від досить великої кількості факторів – не тільки від їх конструктивних особливостей [1], але й від дорожніх умов, в

яких вони експлуатуються [2], від способу використання водієм [3], а також технічного сервісу [4].

Такий взаємозв'язок зумовлює необхідність проведення багатофакторного аналізу для усесторонньої оцінки пристосованості всіх елементів конструкції не тільки для руху транспортного засобу, але і до фактичної області застосування.

Постановка завдання. Конструкція ТЗ – це сукупність взаємопов'язаних компонентів і систем, спроектованих та об'єднаних для створення функціональної та ефективної технічної одиниці, яка відповідає специфічним потребам та завданням перевізного процесу (характеризується визначеними технічними параметрами, що направлені на досягнення максимального результату транспортного процесу). Вона також може включати різноманітні інноваційні технології та рішення, спрямовані на поліпшення продуктивності, надійності та безпеки ТЗ.

Метою даної роботи є вивчення та визначення взаємозв'язку між конструктивною надійністю ТЗ, безпекою та практичною пристосованістю до технічного обслуговування, щоб зрозуміти, як ці аспекти впливають один на одного та як можна досягти оптимального балансу між ними, тим самим підвищити транспортну ефективність і безпечність перевізного процесу.

Виклад основного матеріалу. Автомобільний транспорт є найпопулярнішою транспортною галуззю з надання послуг перевезення пасажирів або доставки вантажів точно у встановлений час. Якість ТЗ визначається низкою характеристик і параметрів, які впливають на його ефективність, надійність та задоволення потреб користувача. Загальна якість ТЗ визначається збалансованістю цих характеристик і має значний вплив на тривалість та надійність його експлуатації, а їх оцінка зазвичай залежить від індивідуальних потреб та вимог до перевізного процесу (рис. 1).

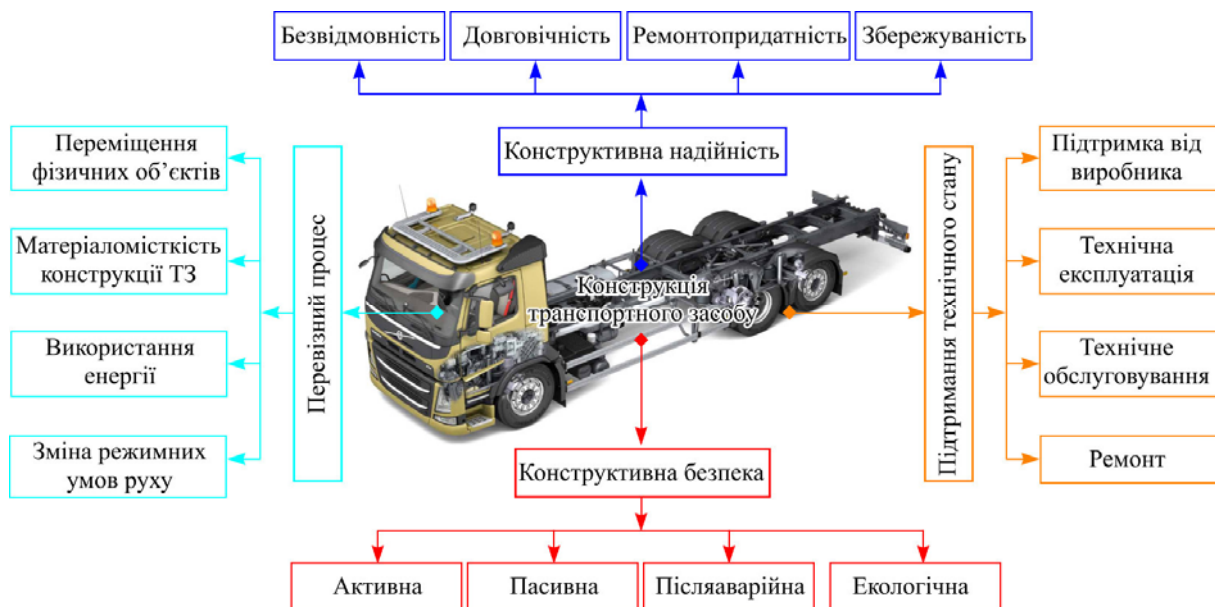


Рисунок 1 – Вплив конструктивного виконання ТЗ на тривалість та надійність його експлуатації
Джерело: авторське (фото вантажного автомобіля Volvo FM [5])

Оцінка надійності та ефективності транспорту у системі перевезень завжди суб'єктивна і залежить від того, в чіх інтересах і з точки зору якого учасника перевезень вона здійснюється. Оцінка ефективності завжди дається з точки зору споживача транспортних послуг, а надійність – це об'єктивна характеристика, що оцінюється імовірністю її безвідмовної роботи [6, с. 12].

ТЗ створюються стосовно до визначених умов експлуатації, а їх конструктивна досконалість та перевізна ефективність повинна оцінюватися тими експлуатаційними якостями, для яких він був спроектований [7, с. 16]. Відомі випадки досконалої конструкції за технологічними інноваціями, однак недотримання виробничого процесу, неналежного контролю якості, невідповідності застосованих матеріалів, або порушень у виготовленні деталей, неминуче відобразиться на їх надійності, довговічності, безпечності і зниженні споживчого попиту [7, с. 7].

В загальному, взаємозв'язок між конструктивним виконанням ТЗ та його надійністю і безпечністю визначається такими аспектами:

1. Матеріали. Використання відповідних матеріалів для каркасу, кузова та інших силових елементів може позитивно вплинути на міцність та подовжити термін їх експлуатації. Використання матеріалів, які не піддаються корозії або мають високу стійкість до окислення металу, відіграють особливу роль в умовах, де присутня тривала вологість або агресивність середовища. Легкі (композитні) матеріали дозволяють зменшити вагу ТЗ, що в свою чергу позитивно впливає на паливну економічність, а особливо, вантажопідйомність. Матеріали, які мають високу еластичність, можуть амортизувати удари та забезпечити безпеку пасажирів в аварійних ситуаціях.

2. Технології виготовлення. Сучасні технології дозволяють створювати більш міцні, легкі та безпечні ТЗ, а також проводити модернізацію існуючих. Нові методи виробництва та технологічні вдосконалення можуть змінити або поліпшити конструкцію ТЗ, що в свою чергу впливає на його характеристики та якість. Важливо, щоб процес виготовлення відповідав встановленим стандартам.

3. Ергономіка та компоновання. Продумане розташування компонентів та систем, зручний доступ до них (наприклад, для виконання технічного обслуговування і ремонту) також може вплинути на тривалість служби та надійність важливих елементів ТЗ. Правильно спроектовані елементи управління (руль, педалі, важелі перемикачів, передачі, прилади тощо) сприяють кращому контролю над ТЗ, а швидкий доступ до важливих елементів дозволяє водієві швидко реагувати на зміни у дорожніх умовах або надзвичайних ситуаціях. Продумана ергономіка може зменшити втомленість під час тривалої поїздки, дозволяючи водієві з комфортом керувати ТЗ. Анатомічно спроектовані сидіння, підголовники та ремені безпеки можуть зменшити ризик травм при аваріях.

4. Технічні рішення сьогодення. Якість конструкційних рішень щодо системи охолодження, системи живлення, трансмісії, підвіски тощо також відіграє ключову роль у підвищенні надійності ТЗ. Розробка надійних систем безпеки, включаючи системи гальмування, подушки безпеки, системи контролю стабільності, може вплинути на захист від аварій, загальну безпеку ТЗ та надійності його елементів. Сучасні ТЗ мають значну кількість електроніки для керування різними системами – від силової установки до безпеки та комфорту. Надійність цих електронних компонентів та їх взаємодія з іншими системами визначають загальну його надійність.

5. Випробування і контроль якості. Випробування ТЗ – це ключовий етап у визначенні їхньої надійності та відповідності стандартам якості. Такі випробування можуть бути проведені на різних етапах: лабораторні випробування матеріалів (випробуванням для оцінки їхньої міцності, еластичності, стійкості до зносу, а також реакції на різні умови, такі як висока температура, заморожування, вплив рідин і т. д.), тестування елементів конструкції (кузов, рама, ходова частина, піддаються статичним і динамічним випробуванням для перевірки їх міцності, стійкості та зносостійкості, стендові та експлуатаційні випробування силової установки та трансмісії (випробування окремих компонентів або систем для оцінки їхньої працездатності та

довговічності), випробування безпеки (випробуванням на зіткнення, включаючи фронтальні та бічні удари, а також випробування систем безпеки, таких як подушки безпеки та системи збереження стабільності), тестування систем електроніки та керування (наприклад, перевірка надійності електроніки, гальмівних систем та курсової стійкості, системи навігації та ін.), тестування в екстремальних умовах (наприклад, екстремальні погодні умови, для перевірки надійності та здатності працювати при екстремальних навантаженнях).

Найважливішою конструктивною ознакою якості ТЗ є його надійність, яка закладається при проектуванні, ресурсовикористанні, виготовленні, технічному обслуговуванні, виробничій експлуатації, зберіганні.

Надійність ТЗ – це його здатність працювати безперебійно протягом тривалого часу без суттєвих поломок або порушення функціонування, які, зазвичай, виникають в самий невідповідний момент. Це означає, що ТЗ може працювати безперебійно та надійно в заданих умовах експлуатації і рекомендованих навантажувальних режимах, не потребує частого втручання (ремонт), а також володіє достатньою стійкістю до зношування та втрати якості внаслідок довготривалого використання і зберігання.

Кількісну оцінку надійності ТЗ здійснюють за такими властивостями: безвідмовність, довговічність, збережувальність, ремонтпридатність.

Безвідмовність ТЗ – це характеристика, яка визначає його здатність працювати без перебоїв і неполадок протягом певного періоду часу або пройти певний пробіг без несправностей (оціночними показниками: імовірність безвідмовної роботи, імовірність відмови, середнє напрацювання на відмову та ін.) [8, с. 124]. Зазвичай безвідмовність виражається у відсотках або кількості кілометрів, які може пройти ТЗ без серйозних поломок. Цей аспект стає особливо важливим, оскільки від нього залежить зручність та ефективність експлуатації ТЗ. Важливо враховувати, що рівень безвідмовності може залежати від правильного обслуговування та дотримання рекомендацій виробника щодо технічного обслуговування, однак навіть з дотриманням усіх рекомендацій і правил експлуатації існує певна імовірність виникнення неполадок, тому безвідмовність слугує орієнтиром, а не гарантією повного відсутності проблем.

Довговічність ТЗ проявляється у здатності виконувати перевізницькі функції до настання граничного стану при встановленій системі технічного сервісу та оцінюється за допомогою двох груп показників – ресурс і термін служби [7, с. 2; 8, с. 125].

Ресурс ТЗ вказує на загальну кількість кілометрів, які він може пройти, залишаючись при цьому придатним для ефективної експлуатації, а термін служби більше орієнтований на час.

ТЗ складається з деталей різного ресурсу [7, с. 18]:

1) деталі, ресурс яких неможливо або економічно недоцільно забезпечити рівним напрацюванню до капітального ремонту (фільтри, ущільнювачі, фрикційні накладки тощо), за ним, як правило, визначають гарантійне напрацювання ТЗ;

2) деталі, які працюють в напружених експлуатаційних умовах і їх раптовий вихід з ладу не впливає на безпеку (шестерні, підшипники, вали коробок передач і т.д.). За ними визначають значення ресурсу до капітального ремонту;

3) деталі, вихід з ладу яких не загрожує безпеці, за їх ресурсом назначають значення ресурсу до повного списання;

4) деталі, вихід з ладу яких загрожує безпеці (гальмівна система, рульове керування і т.д.). Їх ресурс повинен перевищувати ресурс до повного списання.

Збережувальність ТЗ проявляється у його здатності зберігати у заданих межах значення параметрів, які характеризують здатність виконувати перевізницькі функції під час і після зберігання його та (або) транспортування [8, с. 125].

Надійність ТЗ не залишається постійною протягом усього терміну служби. Експлуатація неминує супроводжуватися стохастичним спрацюванням деталей, накопиченням в них необоротних процесів (втомних явищ, зносу, корозії), збільшується імовірність появи несправностей (відмов) .

Підвищення надійності ТЗ є важливою народногосподарським проблемою, вирішення якої сприятиме виконанню невідкладних завдань, що стоять перед автомобільною промисловістю та автомобільним транспортом. Підвищення надійності ТЗ позначається не тільки у зростанні напрацювання, але і на зниженні витрат при експлуатації і ремонті, що в свою чергу сприяє збільшенню оптимального терміну її служби [9, с. 84]. Нові ТЗ завжди мають більш високу надійність порівняно з тими, що мають великий пробіг або пройшли капітальний ремонт [10].

За результатами досліджень, представленими Consumer Reports за 2023 рік щодо надійності електрифікованих моделей ТЗ свідчать, що загалом гібриди мають на 26% менше проблем, ніж автомобілі з паливними двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ). Гібридні електромобілі, що підключаються до електромережі (плагін гібриди), є більш змішаною категорією, однак мають на 146% більше проблем (рис. 2) [11].

Під конструктивною безпекою ТЗ розуміють його здатність забезпечити максимальний рівень захисту для пасажирів та інших учасників дорожнього руху в разі нештатних (аварійних) ситуацій. Розрізняють активну, пасивну, післяаварійну та екологічну [12, с. 71].

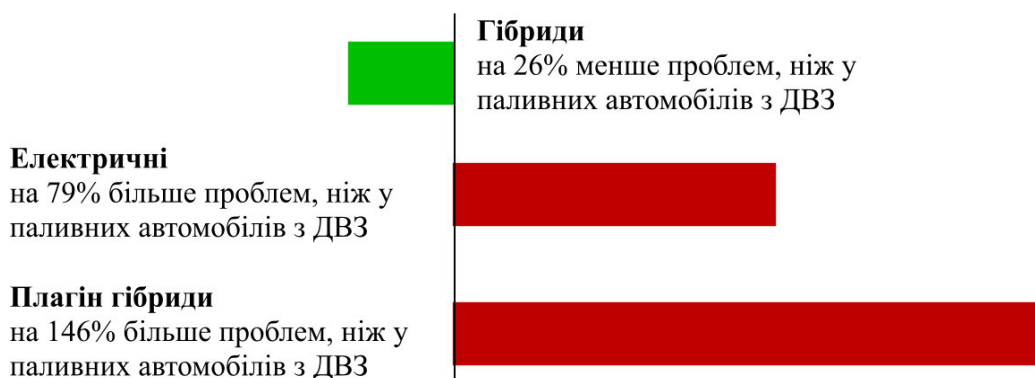


Рисунок 2 – Порівняння електрифікованих силових агрегатів з класичними паливними ТЗ з ДВЗ
Джерело: [11]

В цілому, активну безпеку забезпечують конструктивні особливості ТЗ, що впливають на оглядовість, гальмівні властивості, стійкість, керованість, інформативність та шумність, а також дії водія, спрямовані на зниження ймовірності ДТП.

Активна безпека ТЗ описує системи та технології, які призначені для запобігання аваріям та зменшення ризиків на дорозі. Ці системи допомагають водіям у керуванні ТЗ та реагують на небезпечні ситуації для уникнення або зменшення наслідків можливих аварій. Можна виділити основні системи з точки зору контролю за ТЗ та за дорожньою обстановкою [13]:

- ABS (антиблокувальна система гальм). Забезпечує збереження керованості ТЗ при гальмуванні, уникаючи блокування коліс;
- ESP (електронна стабілізація). Виявляє втрату керованості та допомагає відновити стабільність, коригуючи гальмування на окремих колесах;
- система контролю тиску в шинах. Відслідковує тиск у шинах та попереджає водія про будь-які аномалії, що можуть вплинути на безпеку;

- система контролю полоси руху. Сповіщає водія, якщо він виходить за межі своєї полоси руху без увімкненої стрічки сигналізації.

- автоматичний екстрений гальмівний асистент. Активує гальмівну систему в разі виявлення надзвичайної ситуації для уникнення зіткнення.

За кожен із цих видів активної безпеки «відповідають» зовсім різні групи навичок водія: за контроль над ТЗ відповідає техніка водіння, а за контроль над обстановкою – тактика водіння [14].

Пасивна безпека є важливим аспектом загальної безпеки ТЗ та допомагає зменшити травматичні наслідки для пасажирів у випадку аварії. В комбінації з активною безпекою, яка попереджає аварії, пасивна безпека робить ТЗ більш безпечними для їхніх користувачів. Базові компоненти пасивної безпеки включають: подушки безпеки (спрацьовують при зіткненні, надаючи додатковий амортизуючий ефект для пасажирів та запобігаючи травмам), ремені безпеки (гарантують, що пасажир залишається в своїх місцях у випадку аварії, а також допомагають розподілити сили зіткнення на області тіла); стійка керма (зменшує ризик травм грудей та голови для водія при фронтальному зіткненні); зони поглибленого деформування (спеціально спроектовані конструктивні елементи, які спрямовані на перерозподіл сил під час зіткнення), кріплення дитячих сидінь (спеціальні системи для безпечності дітей).

Післяаварійна безпека спрямована на зменшення травм та забезпечення максимальної безпеки для осіб, які потрапили в аварію, а також для тих, хто надає допомогу під час рятувальних операцій (наприклад, системи автоматичного пожежогасіння, відключення живлення, розблокування дверей, виклику екстреної допомоги).

Екологічна безпека ТЗ відноситься до заходів та технологій, спрямованих на зменшення негативного впливу транспортних засобів на довкілля та підвищенню сталості розвитку автомобільної індустрії. Основні аспекти екологічної безпеки включають обмеження викидів шкідливих речовин, покращення ефективності використання пального та інші заходи для зменшення екологічного відбитку автомобільного транспорту.

Статистика ДТП свідчить, що основною причиною є не вік ТЗ та його технічний стан, а спосіб управління та реагування водіїв до існуючої дорожньої ситуації (це означає, що водії і пішоходи повинні буди особливо уважні і проявляти взаємну повагу та розуміння, залишаючись на рівних) [15, с. 181].

В цілому конструкція ТЗ визначає його функціональність та придатність для перевезення пасажирів або доставки вантажів, і вона оптимізується відповідно до визначених цілей та вимог виробника, наскільки ефективно він буде виконувати свої завдання в конкретних умовах експлуатації (перевізного процесу). Такі вимоги визначають масштаб, форму, структурні елементи, системи безпеки, а також їх вплив на вантажопідйомність та пасажирську місткість. Взаємозв'язок конструкції ТЗ та його здатності перевозити вантажі або пасажирів вимагає збалансованого підходу, зокрема:

- розміри ТЗ, такі як довжина, ширина і висота, можуть впливати на його місткість та здатність перевозити різноманітні вантажі;

- висока жорсткість та міцність каркасу та шасі сприяє підвищенню вантажопідйомності ТЗ;

- тип підвіски визначає ступінь комфорту для пасажирів та здатність автомобіля витримувати навантаження (у вантажних ТЗ, зазвичай, використовується жорстка підвіска для оптимальної стійкості та вантажопідйомності);

- ефективність силової установки, а також узгодження параметрів трансмісії, впливають на здатність поїздки на великі відстані за різних умов без підзарядки (заправки);

- компонування салону пасажирського ТЗ або вантажного відсіку (кузова) визначає раціональну кількість місць для розміщення пасажирів або перевезення вантажу;

- типи кузова служать різним цілям перевезення;

- для зменшення енергетичних витрат використовуються різного роду аеродинамічні рішення компонування ТЗ, технології контролю, рекуперації тощо.

Конструктивна пристосованість ТЗ до технічного обслуговування є важливою характеристикою, оскільки вона впливає на легкість, зручність та вартість проведення різних видів технічного обслуговування та ремонту. Наведемо деякі аспекти, які визначають пристосованість ТЗ до технічного обслуговування:

- зручний доступ основних вузлів, компонентів в моторному відсіку, багажного відділення для виконання різних видів обслуговування та ремонтних робіт;

- використання стандартизованих деталей (однакові частини можна використовувати для різних моделей ТЗ та навіть від різних виробників);

- інновації в обслуговуванні (використання вбудованих систем моніторингу технічного стану, діагностичних систем, які надають інформацію про стан ТЗ, що дозволяє швидше виявляти та усувати несправності);

- зручність заміни деталей (процес заміни та обслуговування повинен бути найпростішим і призначеним для використання стандартними інструментами);

- логічне розташування і поєднання компонентів (дозволяє механікам легко знаходити і швидко замінювати необхідні частини).

Врахування цих аспектів під час проектування та виробництва може полегшити технічне обслуговування та збільшити пристосованість ТЗ до ремонту та обслуговування.

Висновки. Таким чином, ключовими аспектами, що впливають на ефективність, безпеку та доступність ТЗ є:

1. Важливість конструктивної надійності (результати дослідження підкреслюють, що конструктивна надійність ТЗ є критично важливою для його тривалого та безперебійного функціонування).

2. Безпека як пріоритетна характеристика (вивчення впливу безпеки ТЗ на його використання для перевезень вказує на те, що безпека має першочергове значення у виборі).

3. Пристосованість до технічного обслуговування як фактор тривалості служби (дослідження підкреслює важливість пристосованості ТЗ до технічного обслуговування для забезпечення тривалого та ефективного його використання). ТЗ, який легко обслуговується та ремонтується, може зменшити сукупні витрати на експлуатацію та підвищити задоволеність у використанні.

4. Рекомендації для виробників і користувачів (акцент на вдосконаленні конструктивної надійності та безпеки, а також спрощенні процесу технічного обслуговування).

В цілому, дослідження підкреслює важливість взаємодії конструктивної надійності, безпеки та пристосованості до технічного обслуговування для забезпечення якісних та безпечних перевезень на дорозі.

Список літератури

1. Koop G., Beeh E., Schöll R., Kobilke A., Krieschera M. New Lightweight Structures for Advanced Automotive Vehicles—Safe and Modular. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2012. 48, P. 350–362. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.1015>.
2. Idzikowski A. Stan techniczny i wyposażenie pojazdów samochodowych a bezpieczeństwo ruchu drogowego. *Studia i Materiały Polskiego Stowarzyszenia Zarządzania Wiedza*. 2011. 46. P. 94–06. URL: <https://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.ekon-element-000171524733>.

3. Mikulić I, Bošković I, Zovak G. Effects of Driving Style and Vehicle Maintenance on Vehicle Roadworthiness. *Promet – Traffic&Transportation*. 2020. Vol. 32, №5. P. 667–677. URL: <http://dx.doi.org/10.7307/ptt.v32i5.3443>
4. Arunraj N. S., Maiti J. Risk-based maintenance – Techniques and applications. *Journal of Hazardous Materials*. 2007. Vol. 142, Issue 3, P. 653–661. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.06.069>.
5. The Volvo FM. Your mobile office. *Volvo Trucks* : веб-сайт. URL: <https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/trucks/volvo-fm.html>
6. 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»*. 2018. Вип. 62. С. 12-16. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/bitstreams/f01b025c-42c7-4bbd-a74d-f122e55681e4/download>.
7. 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_%D0%B2%D0%B8%D0%BF%D1%80_zah.pdf.
8. 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
9. Аулін В. В., Лівіцький О. М., Замота О. М. Вплив надійності сільськогосподарської та транспортної техніки на оптимальний термін її служби. *Крамаровські читання* : зб. тез доп. VI Міжнар. наук.-техн. конф., 21-22 лют. 2019 р., м. Київ : НУБІП, 2019. С. 83–86. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/34bed4bb-33b6-49f1-be1d-44ca1424ffea/content>.
10. Надійність і довговічність авто. *TEA* : веб-сайт. URL: <https://tea66.webnode.com.ua/news/nadijnist-i-dovgovichnist-avto/>.
11. Who Makes the Most Reliable New Cars? *Consumer Reports* : веб-сайт. URL: <https://www.consumerreports.org/cars/car-reliability-owner-satisfaction/who-makes-the-most-reliable-cars-a7824554938/>.
12. Кашканов А. А., Грисюк О. Г. Безпека руху автомобільного транспорту. Вінниця : ВНТУ, 2005. 177 с. URL: https://atm.vntu.edu.ua/subject/books/Bezpeka_DR/Lek_Lab_BATZ.pdf.
13. Активна безпека. *Вікіпедія* : веб-сайт. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Активна_безпека.
14. Обов'язки і права водіїв механічних транспортних засобів. *Green-way* : веб-сайт. URL: https://green-way.com.ua/uk/dovidniki/pdr-single/rozdil-2/punkt-3_a.
15. Jędra I. Wpływ wieku samochodu na bezpieczeństwo w transporcie drogowym. *Autobusy : Technika Eksploatacja Systemy Transportowe*. 2017. №12. P. 178–181. URL: https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-3c677f7e-a0e5-4041-bd6b-8a780395a0a5/c/028_JEDRA.pdf.

References

1. Koop, G., Beeh, E., Schöll, R., Kobilke, A. & Krieschera, M. (2012). New Lightweight Structures for Advanced Automotive Vehicles—Safe and Modular. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 48, 350–362. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.1015>.
2. Idzikowski, A. (2011). Technical condition and equipment of motor vehicles and road traffic safety. *Studies and proceedings polish association for knowledge management*. 46, 94–06. Retrieved from : <https://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.ekon-element-000171524733>. [in Poland]
3. Mikulić, I, Bošković, I. & Zovak, G. (2020). Effects of Driving Style and Vehicle Maintenance on Vehicle Roadworthiness. *Promet – Traffic&Transportation*. Vol. 32, №5. P. 667-677. DOI: <http://dx.doi.org/10.7307/ptt.v32i5.3443>.
4. Arunraj, N. S. & Maiti, J. (2007). Risk-based maintenance – Techniques and applications. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 142, Issue 3, P. 653–661. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.06.069> [in English].
5. The Volvo FM. Your mobile office, [online]. Retrieved from: <https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/trucks/volvo-fm.html>.
6. Aulin V., Holub D. & Hryn'kiv, A. (2018). Kryterii realizatsii protsesiv zabezpechennia ta pidvyschennia nadijnosti i efektyvnosti funktsionuvannia transportnykh system [Criteria for implementing processes to ensure and improve the reliability and efficiency of transport systems]. *Naukovi notatky - Scientific notes*, 62, 12-16. Retrieved from : <https://dspace.kntu.kr.ua/bitstreams/f01b025c-42c7-4bbd-a74d-f122e55681e4/download> [in Ukrainian].
7. Khitrov, I., Krystopchuk, M. & Nykonchuk, V. (2022). *Ekspluatatsijni vlastyvoli transportnykh zasobiv [Operational properties of vehicles]*. Rivne: NUVHP. Retrieved from : https://ep3.nuwm.edu.ua/24432/1/EVTZ_%D0%B2%D0%B8%D0%BF%D1%80_zah.pdf [in Ukrainian].

8. Fornal'chuk, Ye. Yu., Olishevych, M. S., Mastyakash, O. L. & Pel'o, R. A. (2004). *Tekhnichna ekspluatatsiia ta nadijnist' avtomobiliv [The technical operation and reliability of the automobiles]*. L'viv : «Afisha». Retrieved from : https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2021/Fornalchik_2004_492.pdf [in Ukrainian].
9. Aulin, V., Livits'kyj, O. & Zamota, O. (2019). Vplyv nadijnosti sil's'kohospodars'koi ta transportnoi tekhniki na optymal'nyj termin ii sluzhby [The influence of the reliability of agricultural and transport equipment on its optimal service life]. *Kramarovskyy readings : VI Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia (21-22 liutoho 2019r.) - VI International scientific and technical conference (pp.. 83-86)*. Kyiv: NUBIP. Retrieved from : <https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/34bed4bb-33b6-49f1-be1d-44ca1424ffea/content> [in Ukrainian].
10. Nadijnist' i dohovichnist' avto [Reliability and durability of the car]. Retrieved from: <https://tea66.webnode.com.ua/news/nadijnist-i-dovgovichnist-avto/> [in Ukrainian].
11. Who Makes the Most Reliable New Cars]. Retrieved from: <https://www.consumerreports.org/cars/car-reliability-owner-satisfaction/who-makes-the-most-reliable-cars-a7824554938/>.
12. Kashkanov, A. & Hrysiuk, O. (2005). *Bezpeka rukhu avtomobil'noho transportu [Traffic safety automobile transport]*. Vinnytsia : VNTU Retrieved from : https://atm.vntu.edu.ua/subject/books/Bezpeka_DR/Lek_Lab_BATZ.pdf [in Ukrainian].
13. Aktyvna bezpeka [Active safety]. Retrieved from : https://uk.wikipedia.org/wiki/Активна_безпека [in Ukrainian].
14. Obov'iazky i prava vodiiv mekhanichnykh transportnykh zasobiv [Duties and rights of drivers of mechanical vehicles]. Retrieved from: https://green-way.com.ua/uk/dovidniki/pdr-single/rozdil-2/punkt-3_a [in Ukrainian].
15. Jędra, I. (2017). Influence of car age on safety in road transport. *Buses*, 12, 178–181. Retrieved from : https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-3c677f7e-a0e5-4041-bd6b-8a780395a0a5/c/028_JEDRA.pdf [in Poland].

Ihor Khitrov, Assoc. Prof. PhD tech. sci.

National University of Water and Environmental Engineering, Ukraine

Study of the influence of structural reliability and safety of the vehicle for transportation and adaptability to maintenance

Road transport is the most popular industry for providing passenger transportation services and delivering goods on time, which is achieved not only by increasing the speed and efficiency of transportation, but also by a high level of safety and reliability of vehicles. A vehicle structure is a set of interconnected components and systems designed and integrated to create a functional and efficient technical unit that meets the specific needs and objectives of the transportation process. The design features and technical condition of a vehicle directly determine its ability to withstand various loads and operating conditions. After all, the health and safety of passengers or transported cargo, as well as the efficiency of vehicle operation, are key factors that are directly characterized by its design and technical condition.

A detailed analysis of the relationship between vehicle design and functionality can help improve the quality of transportation, as well as increase the service life and durability of vehicles. However, there are a number of challenges, including the difficulty of selecting studies to provide consistent, substantive conclusions on the impact of vehicle design on transportation efficiency, integration into the road environment, and maintenance adaptability.

This article is devoted to a thorough analysis of the impact of the structural reliability and safety of a vehicle used for transportation in dense traffic flow and its adaptability to maintenance. The results can be of great importance to designers, manufacturers and operators of transportation systems, contributing to improved safety and efficiency in transportation and maintenance. The results obtained may open new perspectives for the development and improvement of transportation systems designed to provide modern society with reliable and safe vehicles.

vehicle, structure, reliability, maintenance, transportation

Одержано (Received) 06.11.2023

Прорецензовано (Reviewed) 30.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

Т. В. Гайкова, доц., канд. техн. наук, **В. Г. Загорянський**, проф., д-р техн. наук,
І. О. Солошич, проф., д-р пед. наук
*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,
м. Кременчук, Україна
e-mail: tanyahaikova@ukr.net*

Інноваційні складові транспортних процесів вантажних перевезень у галузі автомобільного транспорту

У статті розглядаються ключові компоненти організації інноваційної діяльності у сфері автомобільного транспорту вантажних перевезень. У сучасному світі інновації стали невід'ємною та необхідною частиною функціонування цієї галузі, і тому важливо вивчати, обговорювати та систематично розглядати їх. Фундаментальним елементом є осередок, на якому базується інноваційна активність, тому важливо регулярно висвітлювати та розширювати його контекст.

інновація, транспортні процеси, автомобільний транспорт, вантажні перевезення, екологічна безпека

Постановка проблеми. На основі аналізу науково-технічної інформації встановлено, що автомобільний транспорт є одним із найважливіших складових економіки країни. Транспорт зв'язує між собою різні райони, підприємства та галузі народного господарства, відіграє величезну роль при розміщенні підприємств, заводів та є важливою умовою раціонального розташування виробництва. Незважаючи на це, використання технологій автомобільного транспорту на сучасному етапі пов'язаний із низкою серйозних проблем, що потребують вирішення на технологічному рівні. Найбільш важливим та перспективним напрямком у комплексному вирішенні існуючих проблем на автомобільному транспорті є розробка та використання новітніх інноваційних технологій, стрімкий розвиток яких створює для автомобільного транспорту практично необмежені перспективи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні проблемні моменти процесу впровадження інновацій у сфері транспорту були предметом вивчення багатьох вчених, у тому числі Колодізевої Т. О. що стосується логістичної підтримки інноваційної діяльності транспорту. Руденко Г. Р. розглядав інноваційність взаємозв'язків щодо видів забезпечення логістичної діяльності та управління підприємством [1]. Чухрай Н. обґрунтував важливість маркетингових інновацій та логістики товарів у підвищенні ефективності діяльності підприємств транспорту [2].

Під інноваціями у сфері автотранспортних послуг є використання наукових досягнень у вигляді нових технологій, видів продукції та послуг, організаційно-технічних та соціально-економічних рішень виробничого, фінансового, комерційного, адміністративного чи іншого характеру з метою отримання економічного, соціального чи екологічного ефекту. При цьому інноваційна діяльність автотранспортної організації спрямована насамперед на підвищення конкурентоспроможності послуг [3].

Найважливіші напрями інноваційної діяльності на автомобільному транспорті передбачають використанням сучасних технологій для організації перевезень вантажів,

автоматизації та інформатизації всіх ланок транспортного ланцюга щодо процесів обслуговування клієнтів. Першорядними критеріями оцінки ефективності використання інновацій у сфері автотранспортних послуг є: динаміка використання енергозберігаючих технологій [4]; рівень екологічної безпеки автотранспортного комплексу в цілому та його ключових компонентів, враховуючи обсяг використання енергії та ресурсів; степінь автоматизації систем керування; економія часу та мінімізація вартості доставки вантажів за високої надійності їх транспортування. Перехід автотранспортного комплексу на інноваційний шлях розвитку зажадав масштабного впровадження нових технологій. У автотранспортних послуг вже використовуються такі інноваційні технології, як контроль місцезнаходження автомобіля, оперативний облік палива, мобільна відео реєстрація.

Ключові ініціативи для зменшення негативного впливу автомобілів на навколишнє середовище включають:

1. Розробка автомобільних конструкцій, спрямованих на мінімізацію викидів токсичних компонентів у відпрацьованих газах та зниження рівня шуму.

2. Удосконалення методів ремонту, технічного обслуговування та експлуатації транспортних засобів з метою зниження викидів токсичних компонентів у відпрацьованих газах, шумового рівня, що генерується автомобілями, і впливу експлуатаційних матеріалів на оточуюче середовище.

3. Впровадження засобів та методів організації та регулювання руху, які сприяють оптимальним режимам руху, зменшенню зупинок на світлофорах, обмеженню переключень передач та оптимізації робочого часу двигунів для уникнення невиправданого використання ресурсів.

В даний час активно просяться інноваційні рішення та досягнення в галузі обслуговування та експлуатації транспорту, оригінальні інфраструктурні та технічні розробки, спрямовані на вдосконалення вантажних перевезень. Міністерство транспорту України підтримує ініціативи, спрямовані на зміцнення подальшого взаємного співробітництва щодо розвитку транспортних коридорів високошвидкісних сполучень, створення ефективних та оперативних логістичних систем [5]. Інноваційні складові сприятимуть підвищенню конкурентоспроможності вітчизняної транспортної системи на регіональних та світових транспортних ринках, а також стимулюватимуть активну реалізацію нових ініціатив та проєктів [6-7], які підтримані на найвищому державному та міжнародному рівні.

Постановка завдання. Мета статті полягає в аналізі сучасних технологій у сфері транспортних процесів та визначенні пріоритетного напрямку впровадження інноваційної діяльності у сфері автотранспортних послуг з передбачувані і прогнозованим результатом.

Виклад основного матеріалу. Сьогодні диктує потребу визначення у будь який час місцезнаходження автотранспортних засобів, цінних вантажів, товарної продукції тощо. Як правило, такі завдання вирішуються в процесі контролю переміщення рухомих об'єктів, забезпечення безпеки автотранспорту та їх пошуку у разі викрадення, а також у процесі супроводження транспортних засобів та цінних вантажів. Не менш актуальними, як і раніше, залишаються завдання автоматизованого визначення місцезнаходження автотранспортних засобів у складі систем комплексного забезпечення якості послуг. Споживачами таких систем є юридичні та фізичні особи. Серед юридичних осіб слід виділити вантажоперевізників (насамперед, перевізники особливо цінних та небезпечних вантажів); організації, які орендують автомобілі; автомобільний транспорт з обслуговування негабаритних вантажів; гірничо-збагачувальні та металургійні комбінати та інші компанії, для яких отримання

оперативної та достовірної інформації про місцезнаходження та стан автотранспортних засобів та вантажів, що перевозяться, можливість оперативного управління цими об'єктами мають важливе значення. До фізичних осіб слід зарахувати приватних автовласників та індивідуальних користувачів автотранспортних засобів.

Важливе значення транспортних процесів є підвищення безпеки перевезень та збереження вантажу, оптимізація транспортних маршрутів. Це призводить до скорочення витрат та підвищення якості надання автотранспортних послуг. При цьому, мобільні навігаційні комплекси окрім контролю за місцем розташування та станом рухомих об'єктів, дозволяють вирішувати перелік специфічних завдань, що забезпечують підвищення якості послуг:

– отримання оперативної інформації про місцезнаходження та стан автотранспортних засобів, відображення їх руху на електронних картах у режимі реального часу;

– автоматизація контролю за рухом автомобільного транспорту та діями водія;

– забезпечення безпеки перевезень та водія;

– оптимізація транспортних маршрутів;

– протидія викраденням автотранспортних засобів.

Виділимо доступні засоби моніторингу автотранспортних засобів:

1. *GPS (Global Positioning System)* [8]. Ця супутникова система навігації дозволяє в будь-якому місці Землі, практично за будь-якої погоди, визначити місцезнаходження та швидкість об'єктів (рис. 1). Споживачам цієї системи пропонуються різні пристрої та програмні продукти, які дозволяють: побачити своє місцезнаходження на електронній карті; прокладати маршрути з урахуванням наявних дорожніх знаків; забезпечити пошук на карті конкретних будинків, вулиць та інших об'єктів інфраструктури. При цьому супутниковий моніторинг автомобільного транспорту за допомогою GPS ведеться за місцем розташування, швидкістю автомобілів, що дозволяє контролювати їх рух.



Рисунок 1 – GPS-моніторинг транспорту

Джерело: [10]

Основна маса систем контролю перевезень на далеку відстань, заснована на використанні геостаціонарних супутників. Це системи «Inmarsat, OmniTracs, «EutelTracs», «Iridium, Orbcomm» та інші. Розглянемо деякі з них більш докладно.

Система «Inmarsat», базуючись на геостаціонарних супутниках, забезпечує передачу інформації між рухомим об'єктом і диспетчерським пунктом на всій території земної кулі. Час доставки інформації в системі становить 5-15 хвилин в залежності від організації диспетчерського пункту.

Система «EutelTracs» з точки зору споживача, має схожі з «Inmarsat» характеристики компонентів. Склад мобільних терміналів і функціональні можливості систем практично однакові, але вони використовують різні частотні діапазони. Мобільний термінал системи «EutelTracs» за своїми розмірами більше підходить для установки на вантажні машини.

Системи на базі низькоорбітальних супутників, наприклад, як «Iridium, Orbcomm», надають ті ж послуги, що і геостаціонарні системи. Основна їхня відмінність один від одного полягає в тому, що перші складаються з низькоорбітальних супутників з невеликою висотою орбіти (менше 1000 км). Для споживача це означає, що їх супутникові термінали мають менші розміри і невисокі ціни.

2. *Системи відеоспостереження.* З появою таких пристроїв для відеоспостереження на ринку стало можливим створювати комплексні системи відеоспостереження, комбінувати їх із комп'ютерними технологіями, що значно розширило можливості таких комплексів.

Сучасні системи моніторингу задовольняють у загальному випадку наступним можливостям:

- забезпечення двостороннього цифрового та голосового зв'язку між автотранспортними засобами та диспетчерським пунктом;
- визначення стану безпеки автотранспортного засобу та вантажу (збереження замків, температури всередині рефрижератора) та поточного розташування;
- оперативне відображення на екрані монітора географічної карти району з обстановкою та відмітками поточного місцезнаходження автотранспортного засобу;
- оповіщення про «нештатну ситуацію» з контрольованим автотранспортним засобом за допомогою сигналу кнопки екстреного виклику, спрацьовування різних бортових датчиків із зазначенням його точних координат;
- керування різними виконавчими пристроями на автотранспортних засобах (блокування дверей, двигуна) за певними командами;
- забезпечення контролю за проходженням встановленого маршруту та дотриманням графіка руху із зазначенням часу відставання або випередження;
- документування, зберігання даних, що надходять від автотранспортних засобів, які контролюються, для подальшого аналізу;
- автоматизований контроль автотранспортних засобів та вантажу на спеціально обладнаних стоянках та ін.

Впровадження таких систем дозволяє підвищити якість послуг, що надаються за рахунок забезпечення збереження вантажу, оптимізації використання автомобільного транспорту, оперативного управління ним, посилення контролю за його експлуатацією та дисципліною обслуговуючого персоналу, скороченням експлуатаційних витрат.

Облік витрат палива. В автомобільному транспорті витрата палива є однією з найбільших статей витрат транспортної компанії. Облік витрати пального одночасно може бути як об'єктивним (власнику зрозуміло, як і на що воно витрачається), так і суб'єктивним (неправильна експлуатація автотранспорту, несумлінність персоналу та

ін.). Тому останнім часом широкого поширення набули системи автоматичного обліку витрати палива та режимів роботи автотранспортних засобів. Наприклад, система «Глобус» – це надійна система моніторингу транспортних засобів. У дизельний або бензиновий бак транспортного засобу встановлюється датчик рівня палива із GPS. Пристрій безперервно оцінює кількість пального та передає отриману інформацію через супутник на комп'ютер. Ці системи призначені для безперервного контролю за витратою палива (в реальному режимі часу) із збереженням даних у пам'яті приладу, більш точного обліку витрати пального, аналізу комплексної роботи автомобіля у будь-який період часу, оптимізації витрати на експлуатацію. Крім того, система контролю інформує про маршрут руху, що допомагає уникнути приписок кілометражу. А також повідомляє про швидкісний режим та оберти двигуна техніки, що впливає не тільки на витрату палива, а й безпеку машини та вантажу. Спеціальне програмне забезпечення обробляє дані та надає їх у вигляді детального звіту.

Розширення можливостей мультимодальних логістичних послуг. Цей інноваційний напрямок створює передумови для зростання випуску регіональної продукції там, де розташовуватиметься транспортна інфраструктура, яка здійснює управління ланцюгами постачань [9]. Застосування мультимодальних логістичних послуг означає планування та управління діяльністю автотранспортних підприємств, щодо зв'язку з усіма видами діяльності з управління логістикою, а також координацію роботи та співробітництво з партнерами (постачальниками, посередниками, провайдером послуг), а також із замовниками. Тобто ця система інтегрує процес управління пропозицією та попитом усередині регіону на ринку автотранспортних послуг.

Інноваційна діяльність у сфері автотранспортних послуг має бути передбачувана з прогнозованим результатом, який призводить до змін як усередині організації, так і у зовнішньому середовищі, оскільки розширення потреб у цьому виді послуг обумовлює трансформації у виробничому процесі товаровиробників та в інформаційних системах окремого регіону.

При цьому розвиток сфери автотранспортних послуг формує принципово нове конкурентне середовище, забезпечуючи якісніше нові потреби в товарах та послугах. Інноваційна діяльність у сфері автотранспортних послуг є невід'ємною частиною ефективною виробничо-ринковою діяльністю, оскільки саме вона забезпечує стратегічну стійкість компаній в умовах ринку послуг, що швидко розвивається. Стає очевидним, що сектор автотранспортних послуг може забезпечити значний приріст зайнятості сьогодні, так і в майбутньому стати одним із «локомотивів» економічного зростання.

Як критерій оптимальності використання інноваційної технології, що забезпечує підвищення якості надання автотранспортних послуг у регіоні, пропонується використовувати узагальнений показник якості Q , який являє собою функціональну залежність від відомчих показників K_i :

$$Q = F(W_i \cdot K_i), i = 1 \dots M, \quad (1)$$

де M – число відомчих показників;

W_i – вагові коефіцієнти, які враховують важливість окремих показників якості у загальній оцінці ефективності.

Вагові коефіцієнти набувають значень від максимального (дуже важливий параметр) до нуля (параметр не враховується). Вибір значень W_i залежить від призначення інноваційної технології.

Запропоновано алгоритм методики впровадження інновацій, які забезпечують підвищення якості автотранспортних послуг вантажних перевезень. Алгоритм складається з наступних етапів:

1. *Визначення проблеми (постановка задачі).* На цьому етапі, по-перше, необхідно сформувати команду для розвитку інноваційних резервів підвищення якості послуг, по-друге, у процесі роботи даної команди, визначити безпосередньо саму проблему (або постановку завдання). Для чіткого опису проблеми ця команда повинна з'ясувати, які питання та завдання необхідно вирішити, де ці питання та завдання проявляються, і які чинники при цьому відіграють істотну роль. З цією метою необхідно скористатися інформацією з усіх можливих джерел (рекламації та скарги замовників, дослідження запитів та очікувань споживачів). При цьому грамотна постановка проблеми окреслює її властивості та специфіку, вимір, ідентифікує наслідки та результати, а не причини.

2. *Другий етап (аналіз причин та проблем зниження якості надання автотранспортних послуг)* представляється у вигляді карти процесу (схеми послідовності операцій), за допомогою якої відображаються всі стадії від входу до виходу. На цьому етапі члени команди, створеної для вирішення проблеми, консультуються у працівників, які безпосередньо залучені до процесу, уточнюють – чи призводять до підвищення якості запропоновані заходи. Окрім цього здійснюється щоденна реєстрація невідповідностей, рекламацій та скарг від споживачів автотранспортних послуг. При цьому необхідно з'ясувати деталі проблеми, запити споживачів послуг у вимірні та конкретні технічні умови чи вимоги. Як рекомендовані методи доцільно використовувати мозкову атаку (при визначенні постановки завдання), а при аналізі причин проблеми – накреслення діаграм (наприклад, діаграми Ісікави, Парето), графіків, контрольних карт, що дозволяють ідентифікувати тренди, що мають місце, виявити наявні взаємозалежності.

3. *Третій етап «Ідентифікація інноваційних технологій, які забезпечують підвищення якості надання автотранспортних послуг у регіоні та їх оцінку».* На цьому етапі використовується інформація та дані, що накопичені на попередніх етапах, формується перелік інноваційних технологій, що забезпечують підвищення якості надання автотранспортних послуг у конкретній місцевості. Згодом оцінюються інноваційні технології та обирається одна з них, яка максимально забезпечує підвищення якості автотранспортних послуг у конкретній місцевості.

4. На *четвертому етапі здійснюється планування та впровадження інноваційних технологій*, встановлюється зв'язок з усіма власниками інформації, що стосується запропонованого рішення, формуються чіткі плани дій, проектується процедури (методики) проведення робіт, ідентифікуються потенційні бар'єри (ризики), оцінюються необхідні ресурси та потреба у навчанні персоналу.

5. *П'ятий етап передбачає вимірювання та оцінку результатів здійснення впровадження інновації.* Вимірювання виконуються для того, щоб з'ясувати наскільки підвищило впроваджене інноваційне рішення якість надання автотранспортних послуг – повністю чи частково. На цьому етапі перевіряють – чи виконані вимоги та очікування споживача, замовника транспортних послуг. У разі, коли ці вимоги щодо забезпечення якості не виконані, то інноваційне рішення є неефективним або спочатку в ідентифікації проблеми закладено помилку. Для вимірювання ефективності здійсненого інноваційного рішення доцільно використати різні методики та інструменти. Якщо проведені розрахунки показали, що проблема яка розглядалась повністю вирішена, то необхідно перейти до наступного шостого етапу. В іншому

випадку необхідно повернутися до початкових етапів вирішення проблем підвищення якості.

6. *Шостий етап – стандартизація інноваційних технологій надання автотранспортних послуг* у конкретному регіоні включає наступні кроки:

- вибір процесу для підвищення якості надання автотранспортної послуги;
- вивчення та документування поточних процесів надання автотранспортної послуги з використанням інноваційної технології;
- розробка вдосконаленого процесу надання автотранспортної послуги;
- запровадження удосконаленої системи, що забезпечує підвищення якості надання автотранспортної послуги;
- безпосередня оцінка працездатності інновації.

Висновки. У результаті реалізації інноваційних складових сучасні системи моніторингу задовольняють транспортні процеси щодо підвищення безпеки вантажних перевезень та збереження вантажу, оптимізація транспортних маршрутів, скорочення витрат та підвищення якості надання автотранспортних послуг.

Розвиток інноваційних технологій у транспортних процесах вантажних перевезень спрямований на впровадження системи моніторингу для виявлення синергетичних можливостей підвищення якості автотранспортних послуг у конкретному регіоні. Наведений алгоритм дозволяє докладно вивчити та відобразити об'єктивні властивості системи якості транспортних процесів, розробити методичний інструментарій для оцінки показників розвитку інноваційних можливостей, спрямованих на підвищення якості автотранспортних послуг. За допомогою цього алгоритму створюється система, яка дозволяє підтримувати локальні та інтегральні показники якості в межах встановлених значень.

Список літератури

1. Колодізева Т. О., Руденко Г. Р. Інноваційні технології в логістиці: навч. посіб. Харків: ХНЕУ, 2013. 268 с.
2. Чухрай Н.І. Маркетинг інновацій: підручник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 256 с.
3. Мороз М., Загорянський В., Гайкова Т., Кузев І. Використання методів дослідження операцій для оптимізації автомобільних перевезень масових вантажів в агропромисловому комплексі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення у сучасних технологіях*. 2022. №1(11), С. 44–50. DOI: 10.20998/2413-4295.2022.01.07
4. Гайкова Т.В., Мурашко О.А. Сприяння впровадженню електромобілів як науково-технічна інновація в галузі автомобільного транспорту. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7(38), Ч. II. С. 130-138. DOI: 10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.130-138
5. Розпорядження КМУ від 30.05.2018 № 430-р «Про схвалення Транспортної стратегії України на період до 2030 р.» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#Text> (дата звернення: 16.01.2024).
6. Гайкова Т. В., Мороз О. В., Олексієнко С. Р. Аналіз перспектив розвитку проекту каршерінгу. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. № 7 (38), ч. I. С. 229–235. DOI: 10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.229-235
7. Гайкова Т. В., Мороз М.М., Загорянський В. Г., Буренніков Ю.Ю. Проектний аналіз цифрових технологій в управлінні ланцюгом постачань. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2023. Вип. № 1 (17). С. 17-22. DOI: 10.31649/2413-4503-2023-17-1-17-22
8. Сайт «Що таке GPS: Типи систем позиціонування, як працює та яке майбутнє» URL: <https://rootnation.com/ua/articles-ua/tech-ua/ua-gps-types-history-future/> (дата звернення: 16.01.2024).
9. Гайкова Т. В., Загорянський В. Г., Леонтович А. О. Впровадження цифрових технологій в управління ланцюгами постачань. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. № 7 (38), ч. I. С. 222–228. DOI: 10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.222-228
10. Сайт «GPS-моніторинг транспорту» URL: <https://ua.all.biz/uk/gps-monitoring-transportu-g2259793> (дата звернення: 16.01.2024).

References

1. Kolodizieva, T. O. & Rudenko, H. R. (2013). *Innovatsijni tekhnologii v lohistytsi [Innovative technologies in logistics]*. Kharkiv: KhNEU [in Ukraine].
2. Chukhraj, N. I. (2011). *Marketynh innovatsij [Innovation marketing]*. L'viv: Vydavnytstvo L'vivs'koi politekhniki [in Ukraine].
3. Moroz, M., Zahorians'kyj, V., Hajkova, T. & Kuziev, I. (2022). Vykorystannia metodiv doslidzhennia operatsij dlia optymizatsii avtomobil'nykh perevezen' masovykh vantazhiv v ahropromyslovomu kompleksi [The use of operations research methods to optimize road transportation of bulk cargo in the agro-industrial complex]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seriya: *Novi rishennia u suchasnykh tekhnologiiakh – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, 1(11), 44–50 [in Ukraine].
4. Hajkova, T.V. & Murashko, O.A. (2023). Spriannia vprovadzhenniu elektromobiliv iak naukovotekhnichna innovatsiia v haluzi avtomobil'noho transportu [Promoting the introduction of electric vehicles as a scientific and technical innovation in the field of road transport]. *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*, 7(38), II, 130-138 [in Ukraine].
5. Rozporiadzhennia KМУ vid 30.05.2018 № 430-r «Pro skhvalennia Transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 r.» [On the approval of the Transport Strategy of Ukraine for the period until 2030]. *zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-r#Text*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-r#Text> [in Ukraine].
6. Hajkova, T. V., Moroz, O. V. & Oleksienko, S. R. (2023). Analiz perspektyv rozvytku proiektu karsherinh [Analysis of prospects for the development of the car sharing project]. *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*, 7 (38), I, 229-235 [in Ukraine].
7. Hajkova, T. V., Moroz, M. M., Zahorians'kyj, V. H. & Buriennikov, Yu. Iu. (2023). Proiektnyj analiz tsyfrovyykh tekhnologij v upravlinni lantsiuhom postachan' [Project analysis of digital technologies in supply chain management]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu – Herald of mechanical engineering and transport*, 1 (17), 17-22 [in Ukraine].
8. Sajt «Scho take GPS: Typy system pozytsionuvannia, iak pratsiuie ta iake majbutnie» [What is GPS: Types of positioning systems, how it works and what the future holds]. *root-nation.com/ua/articles-ua/tech-ua/ua-gps-types-history-future/*. Retrieved from: <https://root-nation.com/ua/articles-ua/tech-ua/ua-gps-types-history-future/> [in Ukraine].
9. Hajkova, T. V., Zahorians'kyj, V. H. & Leontovych, A. O. (2023). Vprovadzhennia tsyfrovyykh tekhnologij v upravlinnia lantsiuhamy postachan' [Implementation of digital technologies in supply chain management]. *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*, 7 (38), I, 222–228 [in Ukraine].
10. Sajt «GPS-monitorynh transportu» [GPS monitoring of transport]. *ua.all.biz/uk/gps-monitoryng-transportu-g2259793*. Retrieved from: <https://ua.all.biz/uk/gps-monitoryng-transportu-g2259793> [in Ukraine].

Tetiana Haikova, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Zahorianskyi**, Prof., DSc. **Iryna Soloshych**, Prof., DSc.

Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine

Innovative components of transport processes of freight transportation in the field of road transport

Based on the analysis of scientific and technical information, it was established that road transport is one of the most important components of the country's economy. Transport connects different regions, enterprises and branches of the national economy, plays a huge role in the location of enterprises and factories and is an important condition for the rational location of production. Despite this, the use of road transport technologies at the current stage is associated with a number of serious problems that need to be solve at the technological level. The most important and promising direction in the complex solution of existing problems in road transport is the development and use of the latest innovative technologies, the rapid development of which creates practically unlimited prospects for road transport.

The purpose of the article is to analyze modern technologies in the field of transport processes and determine the priority direction of the implementation of innovative activities in the field of motor transport services with a predictable and predictable result.

Today dictates the need to determine the location of motor vehicles, valuable cargo, merchandise, etc. at any time. As a rule, such tasks are solving in the process of controlling the movement of moving objects,

ensuring the safety of motor vehicles and their search in case of theft, as well as in the process of escorting vehicles and valuable cargo. The tasks of automated determination of the location of motor vehicles as part of systems of integrated quality assurance of services remain no less relevant, as before.

Innovative activity in the field of motor transport services is an integral part of effective production and market activity, as it ensures the strategic stability of companies in the conditions of the rapidly developing service market. It is becoming obvious that the sector of motor transport services can provide a significant increase in employment today, and in the future become one of the "locomotives" of economic growth. As a criterion for the optimality of the use of innovative technology, which ensures an increase in the quality of the provision of motor transport services in the region, it is proposed to use the generalized quality indicator Q , which is a functional dependence on departmental indicators K_i . An algorithm of the method of introducing innovations, which ensure the improvement of the quality of motor transport services of freight transportation, is proposed.

As a result, of the implementation of innovative components, modern monitoring systems satisfy transport processes in terms of increasing the safety of freight transportation and preserving cargo, optimizing transport routes, reducing costs and improving the quality of providing motor transport services.

The development of innovative technologies in freight transport processes aimed at implementing a monitoring system to identify synergistic opportunities for improving the quality of road transport services in a specific region. The given algorithm makes it possible to study in detail and display the objective properties of the quality system of transport processes, to develop a methodological toolkit for evaluating the indicators of the development of innovative opportunities aimed at improving the quality of motor transport services. With the help of this algorithm, a system is created that allows you to maintain local and integral quality indicators within the set values.

innovation, transport processes, automobile transport, cargo transportation, ecological safety.

Одержано (Received) 08.11.2023

Прорецензовано (Reviewed) 04.12.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

ЗМІСТ

Прикладна механіка

М.М. Підгаєцький, К.К. Щербина, А.М. Кириченко, В.А. Годорожа, Т.П. Джус
Функціональний портрет шестеренної гідравлічної машини.....3

І.В. Шепеленко, М.І. Черновол, С.М. Леценко, М.В. Красота,
Я.Б. Немировський, В.П. Шумляківський
Пошук оптимальних параметрів фінішної антифрикційної безабразивної обробки
гільз циліндрів автотракторних двигунів.....11

І.Б. Гевко, Р.Я. Лещук, А.О. Брикса, О.Ю. Стібайло, С.О. Коваль
Особливості конструкцій і технологічного проектування робочих органів
лопатових гвинтових змішувачів.....24

Матеріалознавство

М.М. Студент, С.І. Маркович, Х.Р. Задорожна, В.М. Гвоздецький
Залежність структури електродугових покриттів від параметрів
напилення деталей транспортної техніки.....35

А.В. Рутковський, С.І. Маркович, С.О. Магопець, В.С. Маркович
Зносостійкість титанового сплаву ВТ1-0 з модифікованою поверхнею
в умовах абразивного впливу.....41

Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

П.Г. Плешков, В.В. Зінзура, С.П. Плешков, В.П. Солдатенко
Визначення оптимальної точки приєднання сонячної електростанції
до електричної мережі методом комп'ютерного імітаційного моделювання.....48

В.В. Третьак, В.В. Яцун, К.Г. Петрова, І.В. Савеленко, А.І. Котиш
Побудова моделі електроспоживання компресорної станції підприємства
з виробництва молочної продукції.....57

А.І. Котиш, В.В. Зінзура, Н.Ю. Гарасьова, І.В. Савеленко, О.Ф. Котиш
Вплив роботи трансформаторів напруги підстанцій 35/10 кВ
на похибки системи обліку електроспоживання.....64

Будівництво та цивільна інженерія

Д.Б. Романенко
Чисельне дослідження міцності бібетонних армованих балок,
що працюють на згин.....70

А.В. Гасенко, В.В. Дарієнко, М.В. Бібік, Д.В. Бібік, В.В. Слонь
Огляд впливу повзучості бетону на роботу попередньо-напружених
сталезалізобетонних конструкцій споруд цивільного захисту.....77

А.О. Вітровий, П.В. Попович, Р.І. Розум, О.В. Чорна, О.П. Захарчук, Н.А. Галиш,
З.М. Цідило, К.П. Шок
Особливості впровадження Єврокодів в Україні.....84

Ю.В. Дзяди́кевич, П.В. Попович, А.О. Вітровий, Р.І. Розум, О.В. Чорна, О.П. Захарчук, Н.А. Галиш, З.М. Ціди́ло, К.П. Шок
 Сумісність компонентів матеріалів в цивільній інженерії.....91

І. А. Картюк, Є.В. Клименко, Д.С. Даниленко, М. В. Картюк
 Порівняльний аналіз несучої здатності дослідних пошкоджених залізобетонних елементів, підсиленних металевими обоймами 98

Агроінженерія

Б.Б. Левицький, А.В. Бабій
 Аналіз конструктивних особливостей мініобприскувачів для невеликих фермерських господарств 116

А.М. Пуґач, В.В. Аулін, В.І. Мельниченко, О.Д. Деркач, В.О. Тесля
 Способи підвищення показників дизелів тракторів і автомобілів в умовах рядової експлуатації..... 125

І.В. Головецький, А.В. Бабій
 Конструктивні особливості та ефективність роботи мінікартоплекопачів 134

Автомобільний транспорт

Andrii Molodan, Oleksandr Polianskyi, Yevhen Dubinin, Oleh Sokolovskyi, Maksym Krasnokutskyi
 Theoretical calculations of the relative additional fuel consumed when shutting down the cylinder 144

Andrii Molodan, Oleksandr Polyanskyi, Yevhen Dubinin, Mykola Artomov, Oleh Pushkarenko
 Change in power and fuel consumption when engine cylinders are partially disabled in a wheeled vehicle 150

Olexandr Polyanskyi, Yevhen Dubinin, Andrii Korobko, Vladyslava Baidala
 Improving the quality of wheeled vehicle stability assessment using constraint theory.....159

Д.В. Абрамов, В.О. Тесля, А.Б. Гупка, М.Д. Сіправська
 Вплив показників якості палива та технічний стан автомобіля під час руху..... 169

В.В. Аулін, О.Л. Ляшук, А.В. Гриньків, С.В. Лисенко, Д.В. Міронов, Л.М. Слободян, Р.М. Рогатинський
 Оптимальний комплекс операцій технічного обслуговування і ремонту для підвищення надійності вузлів, систем та агрегатів мобільних машин.....175

Транспортні технології (за видами)

М.В. Бабій, В.О. Дзюра, А.В. Бабій, Н.Я. Рожко, В.Б. Валяшек
 Обґрунтування оптимальної схеми перевезення насипних вантажів при взаємодії різних видів транспорту 190

О.С. Хачатурян
 Управління ланцюгами постачання – аналіз і оцінка моделей і методів.....198

Natalia Rozhko, Liubomyr Slobodian, Anatolii Matviishyn, Maria Babii, Dmytro Mironov
Main aspects of third party logistics activities in modern transport realities..... 206

I.O. Ximrov

Дослідження впливу конструктивної надійності і безпечності
транспортного засобу для здійснення перевезень та пристосованості
до технічного обслуговування.....214

Т. В. Гайкова, В. Г. Загорянський, І. О. Солошич

Інноваційні складові транспортних процесів вантажних перевезень
у галузі автомобільного транспорту.....223

CONTENT

Applied Mechanics

<i>Mykhailo Pidhaietskyi, Kyryl Shcherbyna, Andrii Kyrychenko, Viktor Hodorodozha, Tetiana Dzhus</i> Functional portrait of a gear hydraulic machine	3
<i>Ihor Shepelenko, Mykhailo Chernovol, Serhii Leshchenko, Michael Krasota, Yakiv Nemyrovskiy, Volodymyr Shumliakivsky</i> Searching for optimal parameters of finishing antifriction non-abrasive treatment of cylinder liners of motor tractor engines.....	11
<i>Ivan Hevko, Roman Leshchuk, Andriy Briksa, Oleg Stibailo, Serhiy Koval</i> Features of structures and technological design of working bodies of bladed screw mixers.....	24

Material science

<i>Mykhajlo Student, Sergiy Markovych, Khrystyna Zadopozna, Volodymyr Hvozdetckii</i> Dependence of the structure of electric arc coatings on the parameters of sputtering of parts of transport equipment	35
<i>Anatoly Rutkovskiy, Sergiy Markovych, Sergiy Mahopets, Viktor Markovych</i> Wear resistance of titanium alloy VT1-0 with a modified surface under abrasive action.....	41

Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics

<i>Petro Plieshkov, Vasyl Zinzura, Serhii Plieshkov, Ientyn Soldatenko</i> Determination of the optimal point of connection of the solar power plant to the electrical network by computer simulation	48
<i>Vladyslav Tretiak, Volodymyr Yatsun, Kateryna Petrova, Ivan Savelenko, Andrii Kotysh</i> Construction of the electricity consumption model of the compressor station of the enterprise for the production of dairy products.....	57
<i>Andrii Kotysh, Vasyl Zinzura, Nataliia Harasova, Ivan Savelenko, Olena Kotysh</i> The influence of the operation of voltage transformers of 35/10 kV substations on the errors of the electricity consumption accounting system	64

Construction and Civil Engineering

<i>Dmytrii Romanenko</i> Numerical study of the strength of bi-concrete reinforced bent beams.....	70
<i>Anton Hasenko, Victor Dariienko, Mykola Bibik, Dmytro Bibik, Viktor Slon</i> Review of the influence of concrete creep on the operation of pre-stressed steel-reinforced concrete structures of civil defense structures	77

<i>Andriy Vitroviy, Pavlo Popovych, Ruslan Rozum, Olha Chorna, Olena Zakharchuk, Nataliya Halysh, Zoriana Tsidylo, Kateryna Shok</i>	
Features of implementation of eurocodes in Ukraine.....	84
<i>Yuriy Dziadykevich, Pavlo Popovych, Andriy Vitroviy, Ruslan Rozum, Olha Chorna, Olena Zakharchuk, Zoriana Tsidylo, Kateryna Shok</i>	
Compatibility of material components in civil engineering.....	91
<i>Iryna Karpiuk, Yevhenii Klymenko, Denis Danilenkob, Mariia Karpiuk</i>	
Comparative analysis of the load-bearing capacity of experimental damaged reinforced concrete elements reinforced with metal clips	98
Agroengineering	
<i>Bohdan Levytskyi, Andrii Babii</i>	
Analysis of design features of mini sprayers for small farms.....	116
<i>Andrii Pugach, Viktor Aulin, Vasyl Melnychenko, Oleksii Derkach, Volodymyr Teslia</i>	
Ways to increase the indicators of diesel engines of tractors and cars in the conditions of ordinary operation	125
<i>Ivan Holovetskyi, Andrii Babii</i>	
Design features and work efficiency of mini potato diggers	134
Road Transport	
<i>Andrii Molodan, Oleksandr Polianskyi, Yevhen Dubinin, Oleh Sokolovskyi, Maksym Krasnokutskyi</i>	
Theoretical calculations of the relative additional fuel consumed when shutting down the cylinder	144
<i>Andrii Molodan, Oleksandr Polyanskyi, Yevhen Dubinin, Mykola Artomov, Oleh Pushkarenko</i>	
Change in power and fuel consumption when engine cylinders are partially disabled in a wheeled vehicle	150
<i>Olexandr Polyanskyi, Yevhen Dubinin, Andrii Korobko, Vladyslava Baidala</i>	
Improving the quality of wheeled vehicle stability assessment using constraint theory.....	159
<i>Dmytrii Abramov, Volodymyr Teslia, Andriy Gupka, Maria Sipravska</i>	
Impact of Fuel Parameters on Vehicle Technical Condition During Operation.....	169
<i>Viktor Aulin, Oleg Liashuk, Andrey Hrinkiv, Serhii Lysenko, Dmytro Mironov, Liubomyr Slobodian, Roman Rohatynskyi</i>	
The optimal complex of maintenance and repair operations to increase the reliability of nodes, systems and aggregates of mobile machines.....	175
Transport Technologies (by Types)	
<i>Maria Babii, Volodymyr Dzyura, Andrii Babii, Nataliia Rozhko, Volodymyr Valiashek,</i>	
Justification of the optimal scheme of bulk cargo transportation during interaction of different types of transport.....	190

<i>Olena Khachatryan</i> Supply chain management – evaluation of models and methods.....	198
<i>Natalia Rozhko, Liubomyr Slobodian, Anatolii Matviishyn, Maria Babii, Dmytro Mironov</i> Main aspects of third party logistics activities in modern transport realities.....	206
<i>Ihor Khitrov</i> Study of the influence of structural reliability and safety of the vehicle for transportation and adaptability to maintenance	214
<i>Tetiana Haikova, Volodymyr Zahorianskyi, Iryna Soloshych</i> Innovative components of transport processes of freight transportation in the field of road transport	223

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 Unicheck (<https://corp.unicheck.com>)

Адреса для надсилання: aulinvv@gmail.com, dorensky@ukr.net

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; 131 Прикладна механіка; 132 Матеріалознавство; 133 Галузеве машинобудування; 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології; 208 Агроінженерія

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.
ТЕХНІЧНІ НАУКИ

В и п у с к 8(39)
Частина II

Відповідальний за випуск С.В. Лисенко, О.П. Доренський

Комп'ютерна верстка О.А. Боса

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 30.10.2023р. Формат 60x84/8. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Офсетний друк. Умов. друк. арк. 30,00
Тираж 300 прим. Зам. № 0804