

ISSN 2664-262X

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Центральноукраїнський національний технічний університет

**ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.
ТЕХНІЧНІ НАУКИ**

Збірник наукових праць
За загальною редакцією М.І. Черновола
Заснований у 1997 році

**В и п у с к 5(36)
Частина І**

Кропивницький • 2022

ISSN 2664-262X

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

**CENTRAL UKRAINIAN SCIENTIFIC BULLETIN.
TECHNICAL SCIENCES**

Collected Works
Under the general editorship of M. Chernovol
Founded in 1997

**Issue 5(36)
Part I**

Kropyvnytskyi • 2022

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 31 березня 2022 року № 7.

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»); Кузик О.В., канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Осадчий С.І., д-р техн. наук, проф. (заступник головного редактора за галузями: 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування»); Березюк І.А., канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування»); Боков В.М., канд. техн. наук, доц.; Варума Аріфа, Dr PhD (Niger); Васильковський О.М., канд. техн. наук, проф.; Віхрова Л.Г., канд. техн. наук, проф.; Гамалій В.Ф., д-р ф.-м. наук, проф.; Галкін А.С., д-р техн. наук, проф.; Гасенко А.В., канд. техн. наук, доц.; Голуб Д.В., канд. техн. наук, доц.; Гриньків А.В., канд. техн. наук, ст. наук. співр.; Дарієнко В.В., канд. техн. наук, доц.; Зоценко М.Л., д-р техн. наук, проф.; Івашук В.В., д-р техн. наук, доц.; Карпушин С.О., канд. техн. наук, доц.; Кириченко А.М., д-р техн. наук, проф.; Клименко В.В., д-р техн. наук, проф.; Коваленко О.В., д-р техн. наук, доц.; Кондратець В.О., д-р техн. наук, проф.; Лисенко С.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.; Немировський Я.Б., д-р техн. наук; Павленко І.І., д-р техн. наук, проф.; Пашинський В.А. д-р техн. наук, проф.; Пашинський М.В., канд. техн. наук; Россолов О.В., д-р техн. наук, доц.; Сало В. М., д-р техн. наук, проф.; Смірнов О.А., 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

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.787.4

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.3-14](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.3-14)

В.О. Дзюра, доц., д-р техн. наук, **П.О. Марущак**, проф., д-р техн. наук,
Д.Л. Радик, доц., канд. техн. наук
*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль,
Україна*
e-mail: nds@tu.edu.te.ua

М.Б. Сокіл, доц., канд. техн. наук
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна
e-mail: nds@tu.edu.te.ua

Динаміка відносних крутильних коливань при формуванні регулярного мікрорельєфу на внутрішніх циліндричних поверхнях

Проведено аналіз сучасних літературних джерел на предмет пошуку математичних моделей, що описують динаміку процесу формування регулярного мікрорельєфу на внутрішній циліндричній поверхні деталей, газотранспортного обладнання, які працюють у важких умовах експлуатації, з метою збільшення їх ресурсу. Встановлено, відсутність математичних моделей, що описують даний процес та особливості його здійснення при точковій дії деформуючого елементу на поверхню заготовки. Розглянуто формувальні рухи, які супроводжують процес формування регулярного мікрорельєфу на внутрішній циліндричній поверхні заготовки та проаналізовано рушійні сили, що супроводжують цей процес. На основі проведеного аналізу розроблено математичну модель динамічного процесу формування регулярного мікрорельєфу на внутрішній циліндричній поверхні деталі. Особливістю цього процесу є те, що процес формування мікрорельєфу відбувається зосередженою силою, точка прикладання якої по відношенню до деталі постійно змінюється у радіальному та осьовому напрямках, а відтак математична модель яка описує цей процес буде із дискретною правою частиною. Запропоновано таку дію моделювати за допомогою дельта функцій Дірака із лінійною та часовою змінними, використовуючи метод регуляризації вказаних особливостей, зокрема існуючі методи інтегрування відповідних нелінійних математичних моделей крутильних коливань деталі. Отримано аналітичні співвідношення які описують ці коливання в процесі формування регулярного мікрорельєфу. Використавши програмне забезпечення Maple побудовані 3D зміни кута закручування в залежності від різних значень вихідних даних. Проведені дослідження дозволять враховувати крутильні коливання, що особливо актуально для довгомірних циліндричних деталей, таких як гільзи гідроциліндрів, деталі бурових механізмів та інші.

технологія, циліндрична поверхня, параметри якості, вібраційна обробка, крутильні коливання, математичні моделі

Постановка проблеми. Підвищення експлуатаційних властивостей функціональних поверхонь у вигляді тіл обертання деталей машин нафто-газової промисловості є важливою задачею машинобудівного виробництва. Умови експлуатації таких поверхонь характеризуються високими робочими температурами та питомими тисками, що призводить до адгезійного зношування, схоплювання та швидкого виходу з ладу таких поверхонь. Одним із прогресивних способів підвищення експлуатаційних властивостей поверхонь у вигляді тіл обертання є методи поверхневого пластичного деформування, зокрема обробка кульками або роликками. Така обробка дозволяє значно зменшити шорсткість обробленої поверхні, збільшити поверхневу мікротвердість та в деяких випадках усунути операцію гартування [1, 2, 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Окремим напрямом в даній галузі є методи динамічної дії на оброблювану поверхню. Їх суть полягає у високо інтенсивній періодичній дії на оброблювану поверхню з сторони індентора, який зазвичай має форму кулі. Динамічна дія забезпечує менше зусилля деформування, дозволяє забезпечити більшу опорну площу поверхні, і, відповідно, кращі експлуатаційні властивості, які відображаються кривою Аббота-Фаєрстоуна [4]. Наведено переваги методу динамічної дії із побудовою вищезгаданої характеристики поверхні.

Оцінку експлуатаційних властивостей поверхні за параметрами цієї кривої запропоновано проводити й іншими вченими. Зокрема описаний в роботі [5, 6] метод, де оцінку експлуатаційних властивостей поверхні проводять не за шорсткістю поверхні, а за допомогою параметрів кривої Аббота –Фаєрстоуна. Автори стверджують, що три параметри, які визначені із кривої Abbott-Firestone curve R_{pk} , R_k and R_{vk} характеризують здатність поверхні чинити опір фрикційному зношуванню.

Динамічна дія на оброблювану поверхню може бути хаотичною або впорядкованою з формуванням на ній впорядкованого мікрорельєфу. Основоположником застосування і методів формування регулярних мікрорельєфів (РМР) був Шнейдером Ю.Г. В його роботі [7] були описані методи та способи формування РМР, конструкції інструменту та режими його роботи. Він також провів класифікацію РМР, сформованих на плоских і циліндричних поверхнях і різними геометричними параметрами.

Результати його досліджень стали основою для створення стандарту ГОСТ 24773-81 [8], який регламентує параметри регулярного мікрорельєфу сформованого на плоских і циліндричних поверхнях.

Розвиток основ формування регулярних мікрорельєфів наведено в роботі [9]. Описано переваги поверхонь із сформованими мікрорельєфами перед поверхнями обробленими іншими методами.

Високопродуктивні інструментальні комплекси та їх будова та принцип роботи описані в [10, 11]. Такі комплекси забезпечують формування мікрорельєфів на профільних поверхнях будь-якої складності.

В роботі [12] автором вперше наведено математичні моделі, які описують регулярні мікрорельєфи на торцевих поверхнях тіл обертання. Також проведено класифікацію таких мікрорельєфів та математично описано їх ознаки.

В роботі [13] наведено схему, технологічне оснащення і інструмент для формування регулярного мікрорельєфу на плоских і сферичних поверхнях з використанням тисків 40 МПа на 5-ти координатному фрезерному верстаті з числовим програмним керуванням. Досліджено мікроструктуру поверхні із сформованим мікрорельєфом. В статті проведено порівняння двох підходів до формування регулярних мікрорельєфів на складних профільних поверхнях.

Оскільки геометричні параметри регулярного мікрорельєфу досить незначні (всього 1-3 мм) то вплив будь-яких факторів може його спотворити. А саме його регулярність забезпечує стабільні фізико-механічні властивості функціональних поверхонь деталей машин.

В роботі [14] здійснено теоретичні дослідження стосовно динамічних характеристик методу вібраційно-відцентрового зміцнення (ВВЗ) металевих довгомірних циліндричних деталей. Описано методику досліджень, наведено просторову принципову схему вібраційно-відцентрового зміцнювального інструменту з електромагнітним приводом та пружними системами. На підставі досліджень отримано та проаналізовано емпіричні залежності для визначення основних динамічних характеристик методу ВВЗ. Розроблено алгоритм аналізу динамічних характеристик

контактної взаємодії робочих органів електромагнітного зміцнювача з пружними системами та оброблюваної поверхні.

Тож проведений аналіз вказує, що в сучасних дослідженнях значна увага приділяється методам та засобам формування регулярного мікрорельєфу на внутрішніх циліндричних поверхнях, як способу забезпечення необхідної якості даних видів поверхонь.

Постановка завдання. Розробити математичну, яка описує відносні крутильні коливання тіла при формуванні на його внутрішній циліндричній поверхні регулярного мікрорельєфу.

Виклад основного матеріалу. Для забезпечення регулярності мікрорельєфу доцільно було б розробити динамічну модель його формування з урахуванням таких параметрів як фізико-механічні властивості обробленої поверхні, величину зовнішньої дії на поверхню з боку інструменту (віброобкатника), характер контакту та багато іншого.

В даній роботі ми розглядаємо формування РМР на внутрішній циліндричній поверхні заготовки. Всі формувальні рухи, які супроводжують процес утворення регулярного мікрорельєфу наведені на рис. 1, це: обертовий рух D_n , рух подачі D_s та зворотньо-поступальний осциляційний рух D_i .

Процес формування регулярного мікрорельєфу на внутрішній циліндричній поверхні має свої особливості, зокрема:

- циліндрична оброблювальна поверхня обертається навколо нерухомої осі;
- зовнішня дія на оброблювальну поверхню зі сторони тіла, яке наносить мікрорельєф носить точковий характер, до того ж точка контакту вказаних тіл змінюється у поздовжньому та радіальному напрямках.

Складові вказаних переміщень та кутова швидкість обертання циліндричної поверхні впливають на динамічні процеси у пружному циліндричному тілі, які супроводжують процес нанесення мікрорельєфу та визначають форму мікрорельєфу. Щодо складової мікрорельєфу, яка зумовлена динамічними процесами циліндричного тіла, то вона в першу чергу зумовлена поздовжніми та крутильними його коливаннями, а отже визначається пружними властивостями тіла, крайовими умовами та зовнішньою дією.

Із наведеного вище випливає, що під дією зовнішніх силових факторів пружне циліндричне тіло, на яке наноситься мікрорельєф перебуває у складному русі [15, 16]. Тому для описання його динаміки у роботі розглядаються такі його складові:

- переносний - обертальний навколо горизонтальної осі як абсолютно твердого тіла;

- відносний:

а) крутильні коливання навколо горизонтальної осі пружного тіла;

б) поздовжні коливання пружного тіла.

Саме вказані питання є предметом дослідження розділу.

Основні припущення, які лежать в основі описання переносного руху тіла (рис. 1) наступні:

- пустотіле циліндричної форми тіло на внутрішню поверхню якого наноситься мікрорельєф – однорідне, зовнішній його (тіла) радіус R_d , внутрішній – r_d , довжина – l_d , маса – M_d ;

- активні та пасивні сили, які діють на оброблювальне тіло:

а) точкова дія тіла, яке наносить мікрорельєф на внутрішню циліндричну його поверхню. Складові цієї дії F_x , F_z . (вісь OX горизонтальна і співпадає із віссю обертання, вісь OZ - вертикальна, вісь OY - горизонтальна);

б) привідний момент M_{gh} , який спонукає тіло обертатись навколо горизонтальної осі, зрізувальний момент (M_{ph}) дії віброобкатника на внутрішню поверхню і він залежить від таких чинників - притискуючого зусилля, форми віброобкатника, твердості матеріалу оброблюваної поверхні та ін. Нижче приймається, що останні чинники враховуються коефіцієнтом f_{ph} ($M_{ph} = F_z \cdot r_d \cdot f_{ph}$).

У цьому підрозділі досліджуються відносні коливання оброблюваного пружного тіла в процесі нанесення на його поверхню мікрорельєфу. Розглянуто поздовжні та крутильні їх складові. Особливістю їх є та обставина, що вони відбуваються під дією дискретного зовнішнього навантаження, то того ж із часом воно змінює свою точку прикладання. Все це створює певні труднощі при побудові розв'язків крайових задач, які описують вказані коливання.

Як було наголошено вище, зовнішня дія на внутрішню поверхню циліндричного тіла в процесі нанесення на нього мікрорельєфу призводить до складних його коливань. Якщо відносні поздовжні коливання зумовлені поздовжньою дією віброобкатника на внутрішню циліндричну поверхню, то крутильні – складовою вказаної дії у перпендикулярному до вказаної вище дії, точніше кажучи вздовж дотичної до нормального перерізу у точці контакту віброобкатника до оброблюваної поверхні (рис. 1).

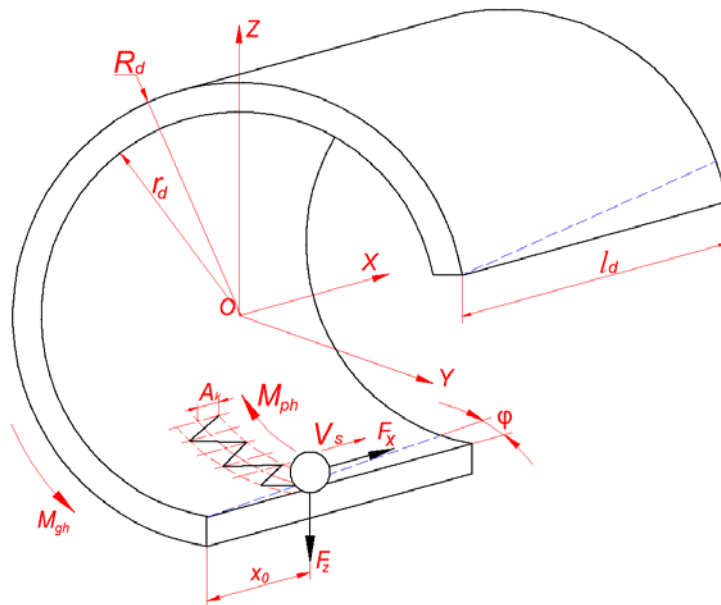


Рисунок 1 – Розрахункова схема для побудови динамічної моделі відносних крутильних коливань оброблюваного тіла в процесі формування регулярного мікрорельєфу
Джерело: розроблено авторами

Позначивши $\varphi(x, t)$ – кут закручування нормального перерізу циліндричної поверхні з координатою x в довільний момент часу t , диференціальне рівняння відносних крутильних коливань за прийнятих у попередньому підрозділі припущень щодо пружних та дисипативних сил набуває вигляду

$$\varphi - \alpha \ddot{\varphi} = \varepsilon \left[\hat{\eta} \dot{\varphi} + \hat{\beta}(\varphi) \varphi \right] + Fr f \delta(x - \bar{x} - Vt), \quad (1)$$

тут $\alpha^2 = G/\rho$, $M_{rh} = \varphi_x G J_p$, J_p – момент інерції перерізу циліндричного тіла;
 G – модуль пружності другого роду,

f_{ph} – коефіцієнт опору зрізування (формування мікрорельєфу),

F_z – нормальна складова притискуючого зусилля;

$\delta(\dots)$ – дельта функція відповідного аргументу $\hat{\eta}$ $\hat{\beta}$ – коефіцієнти, які характеризують силу опору та нелінійну складову відновлювальної сили.

Примітки.

1. У роботі приймається, що дотична складова у точці контакту віброобкатника до оброблювальної поверхні пропорційна нормальній складові із коефіцієнтом пропорційності f_{ph} .

2. Оброблювальне тіло ізотропне, тому коефіцієнт пропорційності у зрізуючій силі у поздовжньому напрямку такий як і в поперечному.

Щодо крайових умов то вони приймають вигляд

$$\varphi(x, t) = 0, \quad \varphi(x, t) = \frac{M}{GJ}, \quad (2)$$

де M_{rh} – привідний момент на початку оброблювального тіла; $M=f(t)$. Для дослідження динаміки крутильних коливань у процесі нанесення мікрорельєфу на циліндричну поверхню необхідно перш за все побудувати розв'язок крайової задачі (1), (2) – нелінійного диференціального рівняння з частинними похідними за неоднорідних крайових умов. Для його знаходження заміною змінних відповідно до

$$\varphi(x, t) = \Phi(x, t) + \Psi(x, t) \quad (3)$$

задачу із неоднорідними крайовими умовами зведемо до задачі із однорідними крайовими умовами [17]. Тому у (1) $\Phi(x, t)$ – є розв'язком рівняння

$$\Phi_{xx}(x, t) = 0 \quad (4)$$

що задовольняє неоднорідні крайові умови, які випливають (2), (3), тобто

$$\Phi(x, t)|_{x=0} = 0, \quad \Phi_x(x, t)|_{x=l} = \frac{M}{GJ_p}. \quad (5)$$

Тоді $\Psi(x, t)$ функція повинна бути розв'язком рівняння

$$\Psi - \alpha \Psi = -\Phi(x, t) + \alpha \Phi(x, t) - Frf\delta(x - \bar{x} - Vt) + \varepsilon\hat{\eta}(\Phi(x, t) + \Psi(x, t)) + \varepsilon\hat{\beta}[\Phi(x, t) + \Psi(x, t)][\Phi(x, t) + \Psi(x, t)] \quad (6)$$

та задовольняти однорідні крайові умови

$$\Psi(x, t)|_{x=0} = 0, \quad \Psi_x(x, t)|_{x=l} = 0. \quad (7)$$

Знайти розв'язок рівняння (2) за крайових умов (3) не становить значних труднощів

$$\Phi(x, t) = C_1(t)x + C_2(t), \quad (8)$$

$$\text{де } C_2(t) = 0 \Rightarrow C_1(t) = \frac{M}{GJ_p}$$

Таким чином $\Phi(x,t) = \frac{M}{GJ_p}x$, а значить для визначення функції $\Psi(x,t)$ маємо лінійне неоднорідне рівняння

$$\Psi - \alpha \Psi = -\Phi(x,t) + \alpha \Phi(x,t) - FRf\delta(x - \bar{x} - Vt) + \varepsilon \hat{\eta}(\Phi(x,t) + \Psi(x,t)) + \varepsilon \hat{\beta}(x,t)\Psi(x,t) \left[\frac{M}{GJ} + \Psi(x,t) \right] \quad (9)$$

і вона має задовольняти однорідні крайові умови (7).

За структурою рівняння (9) аналогічне до рівняння, яке описує відносні поздовжні коливання. Подібним чином як для поздовжніх коливань для аналізу відносних крутильних коливань використаємо загальні ідеї методів збурень, адаптованих до подібного класу рівнянь, маємо $\Psi(x,t) = \Psi_0(x,t) + \varepsilon \Psi_1(x,t)$. Відповідно до них, перш за все знайдемо вплив зовнішнього збурення на динаміку нанесення мікронерівностей, тобто знайдемо розв'язок головної частини вказаного рівняння, рівняння при $\varepsilon = 0$

$$\Psi - \alpha \Psi = -FRf\delta(x - \bar{x} - Vt). \quad (10)$$

Його розв'язок будемо шукати у вигляді

$$\Psi_0(x,t) = \sum_k T_k(t) \tilde{X}_k(x), \quad (11)$$

де система функцій $\{X_k(x)\}$ повинна задовольняти крайові умови $\tilde{X}(x)|_{x=0} = 0$, $X(x)|_{x=l} = 0$. Такою системою функцій є $\{\tilde{X}(x)\} = \left\{ \sin \frac{(2k+1)\pi}{2l} x \right\}$.

Щодо функцій $T_k(t)$, то очевидно вони, як впливає із базового рівняння, повинні задовольняти неоднорідному рівнянню

$$\ddot{T}(t) + \alpha \frac{1}{P} \left(\frac{(2k+1)\pi}{2l} \right) T(t) = -\frac{1}{P} FRf\delta(x - \bar{x} - Vt) \tilde{X}(x) dx, \quad (12)$$

$$\text{де } P = \left[\sin \frac{(2k+1)\pi}{2l} \right] dx = \frac{l}{2}$$

Відповідно до властивостей дельта-функції [25] інтеграл у правій частині рівняння (8) приймає значення $\sin \frac{(2k+1)\pi}{2l} x \delta(x - \bar{x} - Vt) dx = \sin \left(\frac{(2k+1)\pi}{2l} (\bar{x} + Vt) \right)$, а відповідно вказане диференціальне рівняння трансформується до вигляду

$$\ddot{T}(t) + \omega T(t) = -\frac{1}{P} FRf \sin \left(\frac{(2k+1)\pi}{2l} (\bar{x} + Vt) \right), \quad (13)$$

$$\text{де } \omega = \alpha \frac{1}{P} \left(\frac{(2k+1)\pi}{2l} \right)$$

Таким чином, представлення дискретної дії зовнішнього навантаження на оброблювальну циліндричну поверхню за допомогою дельта-функції у поєднанні із

методом часткової дискретизації і для випадку відносних крутильних коливань дозволяє розв'язати поставлену задачу, адже знайти розв'язок рівняння (9) не становить труднощів. Дійсно, рівняння (13) є лінійним неоднорідним, а отже загальний розв'язок відповідного йому однорідного має вигляд $T_{0k}(t) = T_0 \sin(\omega_k t + \vartheta_{0k})$, і відповідний частинний розв'язок неоднорідного рівняння (9) можна представити у вигляді

$$\tilde{T}(t) = -\frac{1}{P} Fr f \frac{1}{\omega} \sin \omega(t - \tau) \sin \frac{(2k+1)\pi}{2l} (\bar{x} + V\tau) d\tau. \quad (14)$$

У сукупності отримані результати дозволяють описати багаточастотний динамічний процес відносних крутильних коливань циліндричного тіла в процесі нанесення на внутрішню його поверхню мікронерівностей у вигляді

$$\Psi(x, t) = \frac{M}{GJ} x + \sin \frac{(2k+1)\pi}{2l} x \times \\ \times \left\{ T \cos(\omega t + \vartheta) - \frac{1}{P} Fr f \frac{1}{\omega} \sin \omega(t - \tau) \sin \frac{(2k+1)\pi}{2l} (x - \bar{x} - V\tau) d\tau \right\}. \quad (15)$$

Що стосується першого наближення, тобто впливу нелінійних та дисипативних сил, то їх вплив визначається диференціальним рівнянням

$$\Psi_{lit}(x, t) - \alpha^2 \Psi_{lxx}(x, t) = [\eta \Psi_{0t}(x, t)] + \hat{\beta}(\Psi_{0x}(x, t))^2 \Psi_{0xx}(x, t) \quad (16)$$

і його розв'язок знаходиться аналогічно до розв'язку рівняння відносних повздовжніх коливань з тією різницею, що крайові умови, а відтак система власних функцій дещо інша. Останню не є перешкодою для подання функції $\varphi(x, t)$ у вигляді

$$\varphi(x, t) = \sin \frac{(2k+1)\pi}{2l} x \times \\ \times \left\{ \frac{1}{l} \bar{f} r F \left(\frac{2k+1}{2l} \alpha \right) \sin \frac{(2k+1)\pi(x + V\tau)}{2l} \sin \left(\frac{2k+1}{2l} \pi \alpha (t - \tau) \right) d\tau + \frac{2l\varepsilon}{(2k+1)\pi\alpha} \cos \left(\alpha \frac{k\pi}{l} (t - \tau) \right) \bar{\Theta}(\tau) d\tau \right\} \quad (17)$$

де $\bar{\Theta}(\tau)$ має вигляд

$$\bar{\Theta}(t) = \left\{ S \bar{\omega} \cos(\bar{\omega} t + \varphi) + \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{l} \bar{f} r F \sin \frac{(2k+1)(\bar{x} + V\tau)}{2l} \sin \left(\frac{2k+1}{2l} \alpha (t - \tau) \right) d\tau \right] \right\} + \\ + \left(\frac{(2k+1)\pi}{2l} \right) \hat{\beta} \frac{\pi}{8} \left\{ S \sin(\bar{\omega} t + \varphi) + \frac{1}{l} \bar{f} r F \sin \frac{(2k+1)(\bar{x} + V\tau)}{2l} \sin \left(\frac{2k+1}{2l} \alpha (t - \tau) \right) d\tau \right\} \quad (18)$$

Для практичного використання оцінку динаміки процесу можна проводити на базі головної моди [26, 27], тобто на базі співвідношення

$$\varphi(x, t) = \left\{ \frac{1}{l} \bar{f} r F \left(\frac{3\pi}{2l} \alpha \right) \sin \frac{3\pi(\bar{x} + V\tau)}{2l} \sin \left(\frac{3}{2l} \pi \alpha (t - \tau) \right) d\tau + \frac{2l\varepsilon}{(2k+1)\pi\alpha} \cos \left(\pi \alpha \frac{3}{2l} (t - \tau) \right) \bar{\Theta}(\tau) d\tau \right\}. \quad (19)$$

Нижче на рис. 2 представлено зміну відносного кута повороту для різних характеристик процесу нанесення мікрорельєфу.

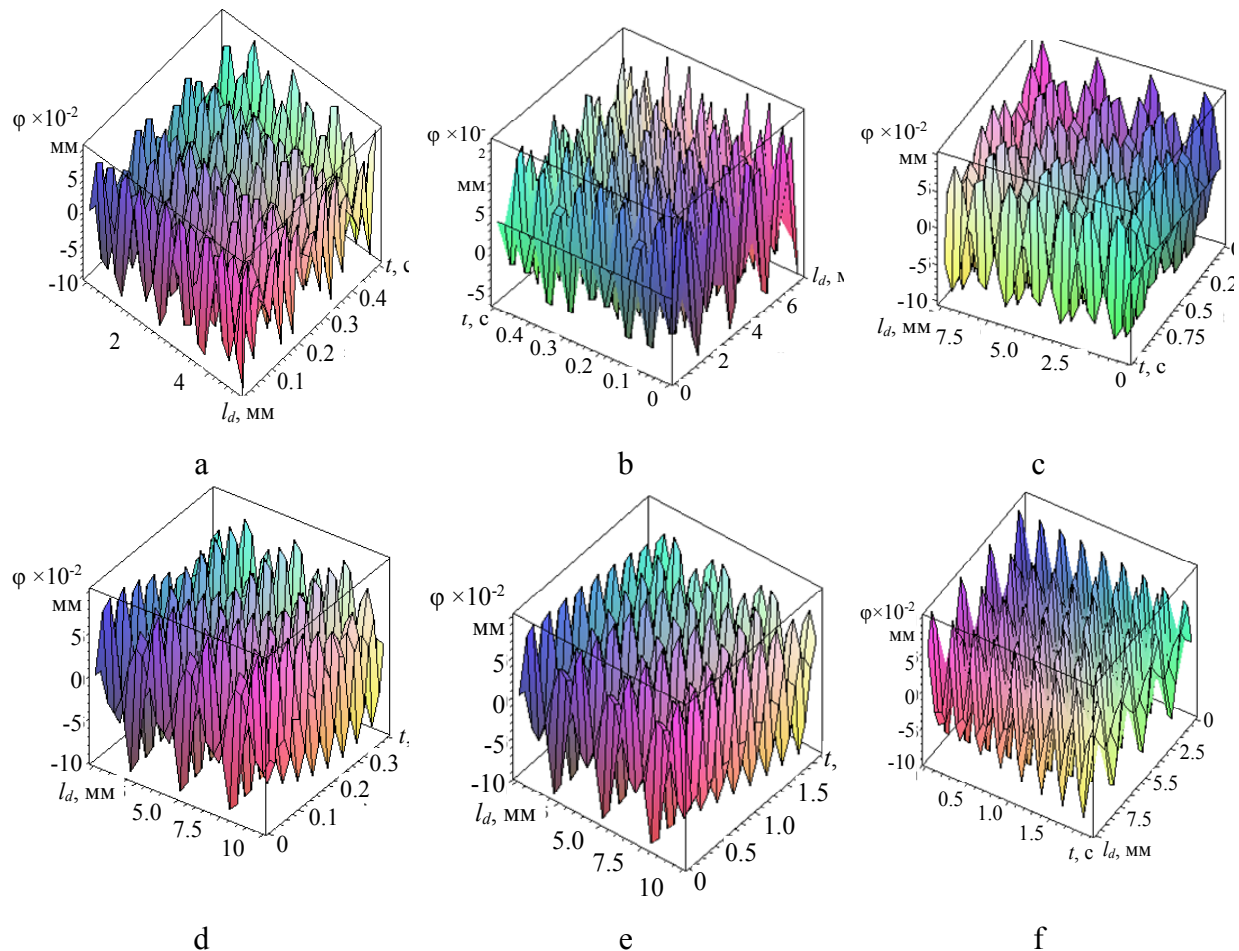


Рисунок 2 – Зміна в часі відносного кута закручення за різних технологічних параметрів нанесення мікрорельєфу

Джерело: розроблено авторами

- a) $G = 8 \cdot 10^{10} \text{ H/m}^2$, $l = 0.5 \text{ м}$, $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$, $F_X = 300 \text{ Н}$, $V = 0,01 \text{ мс}^{-1}$, $\bar{f}_{ph} = 0,75$, $r = 0,12 \text{ м}$, $\omega = 3$
 b) $G = 8 \cdot 10^{10} \text{ H/m}^2$, $l = 0.75 \text{ м}$, $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$, $F_X = 300 \text{ Н}$, $V = 0,01 \text{ мс}^{-1}$, $\bar{f}_{ph} = 0,75$, $r = 0,12$, $\omega = 3$
 c) $G = 8 \cdot 10^{10} \text{ H/m}^2$, $l = 0.1 \text{ м}$, $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$, $F_X = 300 \text{ Н}$, $V = 0,01 \text{ мс}^{-1}$, $\bar{f}_{ph} = 0,75$, $r = 0,12$, $\omega = 3$
 d) $G = 8 \cdot 10^{10} \text{ H/m}^2$, $l = 0.1 \text{ м}$, $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$, $F_X = 300 \text{ Н}$, $V = 0,025 \text{ мс}^{-1}$, $\bar{f}_{ph} = 0,75$, $r = 0,12$, $\omega = 3$
 e) $G = 8 \cdot 10^{10} \text{ H/m}^2$, $l = 0.1 \text{ м}$, $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$, $F_X = 300 \text{ Н}$, $V = 0,05 \text{ мс}^{-1}$, $\bar{f}_{ph} = 0,75$, $r = 0,12$, $\omega = 3$
 f) $G = 8 \cdot 10^{10} \text{ H/m}^2$, $l = 0.1 \text{ м}$, $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$, $F_X = 300 \text{ Н}$, $V = 0,05 \text{ мс}^{-1}$, $\bar{f}_{ph} = 0,75$, $r = 0,12$, $\omega = 6$
 g) $G = 8 \cdot 10^{10} \text{ H/m}^2$, $l = 0.1 \text{ м}$, $\bar{A} = 0,014 \text{ м}^2$, $F_X = 400 \text{ Н}$, $V = 0,05 \text{ мс}^{-1}$, $\bar{f}_{ph} = 1$, $r = 0,12$, $\omega = 6$

Висновки. Розроблена у роботі методологія аналітичного опису технологічного процесу нанесення мікрорельєфу на внутрішню поверхню циліндричних деталей та отримані розрахункові залежності дають змогу стверджувати:

1. Конфігурація мікронерівностей залежать не тільки від кутової швидкості обертання тіла та складової привідного моменту, який примушує тіло обробки здійснювати відносний, коливальний рух, але й пружних коливань самого тіла.

2. Особливістю крутильних коливань є те, що вони зумовлені пружними властивостями тіла та зовнішньою дією сили, точка прикладання якої змінює своє відносне положення на внутрішній циліндричній поверхні, а відтак – відносні переміщення нормального поперечного перерізу оброблювального тіла у точці зовнішньої дії залежать від місця її знаходження.

3. Амплітудно-частотна характеристика відносних крутильних коливань залежить як від величини зовнішньої дії та фізико-механічних властивостей оброблювального тіла і для тіла із більш жорсткісними характеристиками частота пружних коливань є більшою, а амплітуда дещо меншою.

4. Достовірність отриманих розрахункових залежностей підтверджується отриманням у граничному випадку відомих, які стосуються процесу нанесення мікрорельєфу на циліндричну поверхню без урахування пружних коливань.

Список літератури

1. Устройство и эксплуатация газотурбинных установок : учебное пособие / под общ. ред. Ю.Д. Земенкова. Тюмень : ТюмГНГУ, 2015. 434 с.
2. Petrovsky, E & Bashmur, Kirill & Shadchina, Yu & Bukhtoyarov, V & Tynchenko, V. (2019). Study of microrelief forming technology on sliding bearings for oil and gas centrifugal units. *Journal of Physics: Conference Series*. 1399. 055032. 10.1088/1742-6596/1399/5/055032.
3. Hassan, A.M. The effects of ball and roller burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals. *J. Mater. Process Technol.* 1997, 72, 385–391.
4. Andrzej Dzierwa, Angelos P. Markopoulos. Influence of ball-burnishing process on surface topography parameters and tribological properties of hardened steel. *Machines*. 2019, 7, 11; doi:10.3390/machines7010011
5. Hamdi, Amine. (2020). Effect of cutting variables on bearing area curve parameters (BAC-P) during hard turning process. *Archive of Mechanical Engineering*. 67. 73-95. 10.24425/ame.2020.131684.
6. Kubatova, D. & Melichar, M. (2019). Roughness Evaluation Using Abbott-Firestone Curve Parameters, *Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium*, pp.0467-0475, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-22-8, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.063
7. Sheider, Yu.G.. Service properties of parts with regular microrelief, 2nd ed., Revised and augmented, Leningrad, Mashinostroenie, 1982. 248 p. (in Russian).
8. GOST 24773-81 Surfaces with regular microshape. Classification, parameters and characteristics, Moscow, Izd. Stand., 1988, 14p.
9. Aftanaziv, I.S.; Kyrychok P.O.; Melnychuk, P.P. Improving the reliability of machine parts by surface plastic deformation. Zhytomyr, ZhTI Publishing, 2001. 516 p. (in Ukrainian).
10. S. Slavov, D. Dimitrov, and I. Iliev, "Variability of Regular Relief Cells Formed on Complex Functional Surfaces by Simultaneous Five-Axis Ball Burnishing," *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering* 82, no. 3 (August 2020): 195–206.
11. Slavov, S. D.; Dimitrov, D.M. A study for determining the most significant parameters of the ball-burnishing process over some roughness parameters of planar surfaces carried out on CNC milling machine, *MATEC Web of Conferences* 2018 178, 02005 doi:10.1051/mateconf/201817802005.
12. Dzyura, V. O. Modeling of partially regular microreliefs formed on the end faces of rotation bodies by a vibration method. *UJMEMS*. 2020. 6(1). 30-38.
13. Lacalle, Luis. (2012). Ball burnishing application for finishing sculptured surfaces in multi-axis machines. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*. P.997-1003
14. Афтаназів І. С., Литвиняк Я. М., Кусий Я. М.. Дослідження динамічних характеристик вібраційно-відцентрового зміцнення довго вимірних циліндричних деталей . *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2004. № 515 : Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. С. 55-64.
15. Ціж Б.Р., Сокіл Б.І., Сокіл М. Б. Теоретична механіка: підручник . Львів: Сполом, 2008. 458 с.
16. Павловський М. А. Теоретична механіка. К . : Техніка, 2002. 512 с.
17. Маркович Б.М. Рівняння математичної фізики: навч. посіб. Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2010. 384с.
18. Олейник О. А. Лекции об уравнениях с частными производными . Москва : Бином, 2005. 60 с.

19. Перестюк М. О., Чернікова О. С. Деякі сучасні аспекти асимптотики теорії диференціальних рівнянь з імпульсною дією. *Укр. мат. журн.* 2008. 60. С. 81-90.
20. Капустян О. В., Перестюк М. О., Стенжицький О. М. Екстремальні задачі. Теорія. Приклади. Методи розв'язування. К.: ВПЦ Київ-унту, 2019. 71 с.
21. Дзыра Б. И. К вопросу обоснования метода усреднения для исследования одночастотных колебаний, возбуждаемых мгновенными силами. Аналитические и качественные методы исследования дифференциальных и дифференциально-разностных уравнений. Киев: Изд-во Ин-та математики, 1977. С. 34-38.
22. Дзыра Б. И., Ищук В. В. О влиянии параметрической нагрузки импульсного вида на нелинейную колебательную систему. Аналитические и качественные методы исследования дифференциальных и дифференциально-разностных уравнений. Киев: Изд-во Ин-та математики, 1977. С. 39-59.
23. Митропольский Ю. А., Мосеенков Б. И. Асимптотические решения уравнений в частных производных. Киев: Вища школа, 1976. 584 с.
24. Sokil B. I., Pukach P. Ya., Sokil M. B., Vovk M. I. Advanced asymptotic approaches and perturbation theory methods in the study of the mathematical model of single-frequency oscillations of a nonlinear elastic body. *Mathematical modeling and computing.* 2020. Vol. 7, no. 2. Pp. 269–277.
25. Дельта-функция. “Математика”. URL: <https://mathworld.wolfram.com/DeltaFunction.html> (дата звернення: 15.09.2021).
26. Cveticanin L. Period of vibration of axially vibrating truly nonlinear rod. *Journal of Sound and Vibration.* 374, 199–210 (2016).
27. Cveticanin L., Pogany T. Oscillator with a sum of non-integer order non-linearities. *Journal of Applied Mathematics.* 2012, Article ID 649050, 20 pages (2012).

References

1. Zemenkova, Ju.D. (Eds.). (2015). *Design and operation of gas turbine plants*. Tjumen': TjumGNGU [in Russian]
2. Petrovsky, E & Bashmur, Kirill & Shadchina, Yu & Bukhtoyarov, V & Tynchenko, V. (2019). Study of microrelief forming technology on sliding bearings for oil and gas centrifugal units. *Journal of Physics: Conference Series.* 1399. 055032. 10.1088/1742-6596/1399/5/055032. [in English].
3. Hassan, A.M. (1997). The effects of ball and roller burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals. *J. Mater. Process Technol.*, 72, 385–391 [in English].
4. Andrzej Dzierwa, Angelos P. (2019). Markopoulos. Influence of ball-burnishing process on surface topography parameters and tribological properties of hardened steel. *Machines* 7, 11; doi:10.3390/machines7010011 [in English].
5. Hamdi, Amine. (2020). Effect of cutting variables on bearing area curve parameters (BAC-P) during hard turning process. *Archive of Mechanical Engineering*, 67, 73-95. 10.24425/ame.2020.131684 [in English].
6. Kubatova, D. & Melichar, M. (2019). Roughness Evaluation Using Abbott-Firestone Curve Parameters, *Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium*, pp.0467-0475, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-22-8, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.063 [in English].
7. Sheider, Yu.G. (1982). *Service properties of parts with regular microrelief*. (2nd ed.). Revised and augmented, Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
8. Surfaces with regular microshape. Classification, parameters and characteristics. (1988). HOST 24773-81. Moscow, Izd. Stand. [in English].
9. Aftanaziv, I.S., Kyrychok, P.O. & Melnychuk, P.P. (2001). Improving the reliability of machine parts by surface plastic deformation. Zhytomyr: ZhTI Publishing [in Ukrainian].
10. S. Slavov, D. Dimitrov & I. Iliev, (2020). Variability of Regular Relief Cells Formed on Complex Functional Surfaces by Simultaneous Five-Axis Ball Burnishing. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 82, no. 3 (August 2020): 195–206 [in English].
11. Slavov, S.D. & Dimitrov, D.M. (2018). A study for determining the most significant parameters of the ball-burnishing process over some roughness parameters of planar surfaces carried out on CNC milling machine, *MATEC Web of Conferences* 2018 178, 02005 doi:10.1051/mateconf/201817802005 [in English].
12. Dzyura, V.O. (2020). Modeling of partially regular microreliefs formed on the end faces of rotation bodies by a vibration method. *UJMEMS*, 6(1), 30-38 [in English].
13. Lacalle, Luis. (2012). Ball burnishing application for finishing sculptured surfaces in multi-axis machines. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*. P.997-1003 [in English].

14. Aftanaziv, I.S., Lytvyniak, Ya.M. & Kusyj, Ya.M. (2004). Doslidzhennia dynamichnykh kharakterystyk vibratsijno-vidsentrovoho zmitsnennia dovho vymirnykh tsylindrychnykh detalej . *Visnyk Natsional'noho universytetu «L'vivs'ka politehnika». Optymizatsiia vyrobnychkyh protsesiv i tekhnichnyj kontrol' u mashynobuduvanni ta prykladobuduvanni – Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Optimization of production processes and technical control in mechanical engineering and instrument making.* 515, 55-64 [in Ukrainian].
15. Tsizh, B.R., Sokil, B.I. & Sokil, M. B. (2008). *Teoretychna mekhanika [Theoretical mechanics]*. L'viv: Spolom [in Ukrainian].
16. Pavlovsk'ij, M.A. (2002). *Teoretychna mekhanika [Theoretical mechanics]*. Kyiv: Tekhnika [in Ukrainian].
17. Markovych, B.M. (2010). *Rivniannia matematychnoi fizyky [Equations of mathematical physics]*. L'viv: Vyd-vo L'vivs'koi politehniki [in Ukrainian].
18. Olejnik, O.A. (2005). *Lekcii ob uravnenijah s chastnymi proizvodnymi [Lectures on partial differential equations]*. Moskva: Binom [in Russian].
19. Perestiuk, M.O. & Chernikova, O.S. (2008). *Deiaki suchasni aspekty asymptotyky teorii dyferentsial'nykh rivnian' z impul'snoi diieiu [Some modern aspects of the asymptotics of the theory of differential equations with impulse action]*. *Ukrains'kyj matematychnyj zhurnal – Ukrainian Mathematical Journal* 60, 81-90 [in Ukrainian].
20. Kapustian, O.V., Perestiuk, M.O. & Stenzhyts'kyj, O.M. (2019). *Ekstremal'ni zadachi. Teoriia. Pryklady. Metody rozv'iazuvannia [Extreme tasks. Theory. Examples. Methods of solving]*. Kyiv: VPTs Kyiv-untu [in Ukrainian].
21. Dzyra, B.I. (1977). *K voprosu obosnovanija metoda usrednenija dlja issledovanija odnochastotnyh kolebanij, vzbuzhdaemyh mgnovennymi silami . Analiticheskie i kachestvennye metody issledovanija differencial'nyh i differencial'no-raznostnyh uravnenij [On the question of substantiation of the averaging method for the study of single-frequency oscillations excited by instantaneous forces. Analytical and qualitative methods for studying differential and differential-difference equations]*. Kiev: Izd-vo In-ta matematiki [in Russian].
22. Dzyra, B.I. & Ishhuk, V.V. (1977). *O vlijanii parametriceskoj nagruzki impul'snogo vida na nelinejnuju kolebatel'nuju sistemu . Analiticheskie i kachestvennye metody issledovanija differencial'nyh i differencial'no-raznostnyh uravnenij [On the influence of parametric load of an impulse type on a non-linear oscillatory system. Analytical and qualitative methods for studying differential and differential-difference equations]*. Kiev: Izd-vo In-ta matematiki [in Russian].
23. Mitropol'skij, Ju. A. & Moseenkov, B. I. (1976). *Asimptoticheskie reshenija uravnenij v chastnyh proizvodnyh [Asymptotic solutions of partial differential equations]*. Kiev: Vishha shkola [in Russian].
24. Sokil, B.I., Pukach, P.Ya., Sokil, M.B. & Vovk, M.I.(2020). Advanced asymptotic approaches and perturbation theory methods in the study of the mathematical model of single-frequency oscillations of a nonlinear elastic body. *Mathematical modeling and computing, Vol. 7, 2*, 269–277 [in English].
25. Del'ta-funkcija. “Matematika” [mathworld.wolfram.com](https://mathworld.wolfram.com/DeltaFunction.html). Retrieved from <https://mathworld.wolfram.com/DeltaFunction.html> [in Russian].
26. Cveticanin, L. (2016). Period of vibration of axially vibrating truly nonlinear rod. *Journal of Sound and Vibration*.374, 199–210 [in English].
27. Cveticanin L. & Pogany, T. (2012). Oscillator with a sum of non-integer order non-linearities. *Journal of Applied Mathematics*, Article ID 649050, 20 pages [in English].

Volodymyr Dzyura, Assoc. Prof., DSc., **Pavlo Maruschak**, Prof., DSc., **Dmytro Radyk**, Assoc. Prof., PhD tech sci.,

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

Mariya Sokil, Assoc. Prof., PhD tech sci.

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Dynamics of Relative Torsional Oscillations During the Formation of a Regular Microrelief on Internal Cylindrical Surfaces

An analysis of modern literature sources to search for mathematical models describing the dynamics of the process of forming a regular microrelief on the inner cylindrical surface of parts, gas transmission equipment operating in severe operating conditions, in order to increase their life. It is established that there are no mathematical models describing this process and the peculiarities of its implementation under the point action of the deforming element on the workpiece surface. The molding movements accompanying the process of forming a regular microrelief on the inner cylindrical surface of the workpiece are considered and the driving forces that accompany this process are analyzed.

On the basis of the conducted analysis the mathematical model of dynamic process of formation of a regular microrelief on an internal cylindrical surface of a detail is developed. The peculiarity of this process is that the process of microrelief formation occurs by a concentrated force, the point of application of which in relation to the part is constantly changing in radial and axial directions, and then the mathematical model describing this process will be with a discrete right. It is proposed to model such an action using Dirac delta functions with linear and temporal variables, using the method of regularization of these features, in particular, existing methods of integrating the corresponding nonlinear mathematical models of torsional oscillations of a part. Analytical dependences are obtained, which describe these oscillations in the process of formation of a regular microrelief. Using Maple software, 3D changes in the torsion angle depending on different output values are constructed.

The conducted researches will allow to consider torsional fluctuations that is especially actual for long cylindrical details, such as sleeves of hydraulic cylinders, details of drilling mechanisms and others.

technology, cylindrical surface, quality parameters, vibration processing, torsional vibrations, mathematical models

Одержано (Received) 22.09.2021

Прорецензовано (Reviewed) 28.10.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

УДК 621.787.4

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.14-22](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.14-22)

Я.Б. Немировський, проф., д-р техн. наук, **І.В. Шепеленко**, доц., д-р техн. наук, **М.В. Красота**, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: kntucpfzk@gmail.com

Оцінка міцності поршневих пальців, відновлених за рахунок роздачі внутрішнього отвору

Одним із найбільш прогресивних методів відновлення поршневих пальців ДВЗ є роздача внутрішнього отвору, що забезпечує збільшення зовнішнього діаметра зношеного пальця. У процесі подальшої обробки виконується знімання припуску із зовнішньої поверхні, що викликає витончення стінки та необхідність проведення розрахунків на міцність пальця. В роботі виконані перевірочні розрахунки міцності пальців двигунів Д245. При цьому використана схема із жорстким закріпленням вільних кінців, для чого розраховано статично невизначену балку. Виконано експериментальну перевірку аналітичних розрахунків. Проведені дослідження дозволили встановити, що використання роздачі отвору при відновленні поршневих пальців не змінює міцність та геометричні характеристики деталі. Це дозволило рекомендувати дану технологію при відновленні робочих поверхонь поршневих пальців.

поршневий палець, роздача, міцність, жорсткість

Постановка проблеми. Важливим резервом підвищення ефективності використання техніки, економії матеріальних і трудових ресурсів є відновлення та зміцнення деталей [1]. У цьому сенсі надзвичайно актуальним є розробка та впровадження безвідходних технологічних процесів відновлення зношених деталей [2] та особливо тих, виробництво яких носить масових характер. До таких деталей відноситься поршневий палець двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ). Тільки в

автомобільній промисловості щорічна програма експлуатації поршневих пальців зовнішнім діаметром 20-60 мм, довжиною 45-114 мм і масою 0,1-1,75 кг складає більш ніж 10 млн. шт. [3]. В тепловозних і судових двигунах маса поршневих пальців більш значна і, наприклад, для дизеля тепловоза 10Д100 становить 4,6 кг [4].

Конструктивно всі поршневі пальці – однакові та являють собою циліндр з отвором, який має зносостійку зовнішню поверхню, та можуть відрізнятися своїми геометричними розмірами, матеріалом заготовки та термообробкою робочої поверхні.

Існуючі методи відновлення поршневих пальців розглянуті в роботах [5, 6 та ін.]. Одним із найбільш прогресивних і використовуваних є метод, при якому виконується роздача внутрішнього отвору і як наслідок – збільшення зовнішнього діаметра зношеного пальця [7, 8]. Величина цього збільшення повинна компенсувати зношений розмір та припуск під подальшу механічну обробку пальця. Слід відзначити, що збільшення внутрішнього отвору і обробка зовнішнього робочого діаметру зменшує розмір товщини стінки, що може негативно вплинути на міцність пальця. Тому, після відновлення пальця шляхом роздачі внутрішнього отвору і подальшої механічній обробці, виникає необхідність оцінки його міцності.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Існують методики оцінки міцності пальця [9, 10], згідно яких палець розглядається як балка із шарнірно-опорними кінцями, що навантажена рівномірно розподіленим навантаженням по довжині підшипника верхньої головки шатуна (рис. 1).

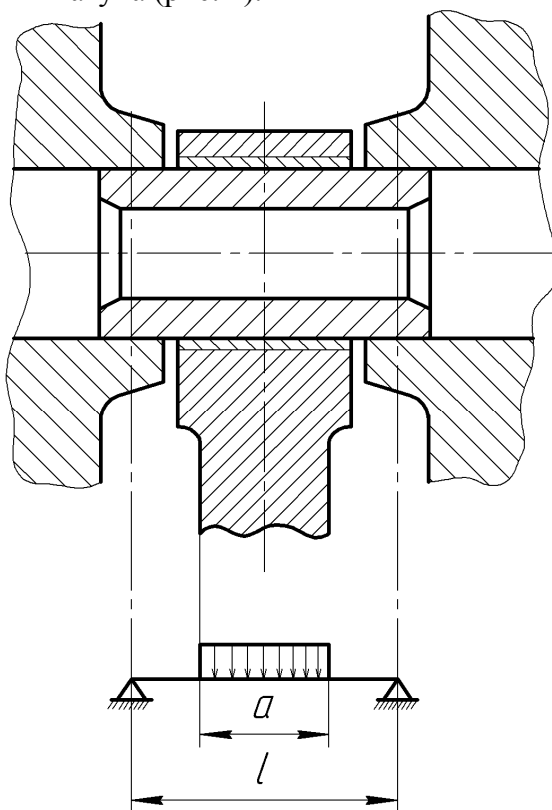


Рисунок 1 – Схема закріплення пальця в поршні

Джерело: [5]

Розглянемо ці умови для пальців двигуна Д245. Технічні характеристики поршневого пальця дизеля Д245 наведені в табл.1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики поршневих пальців двигуна Д245

№	Позначення	новий	1 відн.	2 відн.
1	Зовнішній діаметр D , мм	38	38	38
2	Внутрішній діаметр d , мм	18	18,6	19,2
3	Довжина пальця l , мм	92	92	92
4	Довжина втулки a , мм	38	38	38
5	Відстань між торцями бобишок b	42	42	42
6	Модуль пружності матеріалу пальця $E \cdot 10^{-5}$, МН/м ²	2,2	2,2	2,2
7	Максимальний тиск робочої суміші P , МН/м ²	0,041	0,041	0,041

Джерело: [5]

Необхідна умова міцності на вигин:

$$\sigma_{\text{и}} \leq [\sigma] . \quad (1)$$

Для матеріалу пальця $[\sigma] = 200 \text{ МН/м}^2$. У середньому перерізі пальця виникаючі напруження від вигину визначаються за формулою, яка запропонована в роботі [10]:

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{P(l + 2b - 1,5L)}{1,2(1 - K_y^4)D^3} , \quad (2)$$

де $K_y = \frac{d}{D}$ – коефіцієнт товстостінкості.

Зниження міцності пальця за умовою міцності на зріз у перерізах між бобишками і головкою шатуна оцінювалося за наступною залежністю:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{0,85 P(1 + K_y - K_y^2)}{(1 - K_y^4)D^2} \leq [\tau_{\text{ср}}] , \quad (3)$$

де $[\tau_{\text{порівн}}] = 120 \text{ МН/м}^2$.

Для пальців з перерізом $K_y \geq 0,4$ істотне значення для їхньої працездатності має деформація пальця в пружній області (овалізація). Згідно до роботи [9] її максимальне значення визначається з виразу:

$$\Delta D_{\text{max}} = \frac{1,35P}{EL} \left(\frac{1 + K_y}{1 - K_y} \right)^3 (0,1 - (K_y - 0,4)^3) . \quad (4)$$

Постановка завдання. Метою досліджень є проведення розрахунку на міцність поршневих пальців ДВЗ, оброблених деформуючим протягуванням.

Виклад основного матеріалу. Результати розрахунків згідно наведених залежностей (1-4) представлено в табл.2.

Таблиця 2 – Дані розрахунків міцності пальців Д245

№	Позначення	Нові	Відновлені			
		$d = 17,3$	$d = 17,9$	$d = 18,6$	Відхилення %	
					1 відн.	2 відн.
1	P , МН	0,041	0,041	0,041		
2	$K_y = d/D$	0,49	0,51	0,53	4	7,7
3	σ_n , МН/м ²	98	98,9	100	0,9	2,2
4	τ , МН/м ²	52,2	54	55,6	3,3	6,9
5	$\Delta D_{\max}$, мм за (4)	0,016	0,018	0,02	15	19,8
6	$\Delta D_{\max}$, мм			0,01	У межах допуску	

Джерело: розроблено авторами

Слід зазначити, що значення $\Delta D_{\max}$, розраховані за формулою (4), дещо завищені, як для нових пальців, так і для відновлених. Ці слід пояснити тим, що залежність (4) отримана виходячи із прийнятої в роботі [9] схеми деформації пальця під дією експлуатаційного навантаження. Відповідно неї палець розглядається, як балка із шарнірно-опорними кінцями рис. 1. Однак дані роботи [11] показують, що більш прийнятною схемою є схема, згідно якої палець в робочому стані розглядається як балка, кінці якої мають жорстке закріплення. Слід відразу зазначити, що така схема є більш жорсткою, при якій всі деформації (у тому числі овалізація зовнішньої робочої поверхні) будуть менше, ніж розраховані за схемою із шарнірним зпиранням.

Розглянемо як зміняться значення $\Delta D_{\max}$ при використанні схеми із жорстким закріпленням вільних кінців. Для цього розрахуємо статично невизначену балку (рис. 2, а) використовуючи метод сил [12]. Як основну систему вибираємо схему (рис. 2, б).

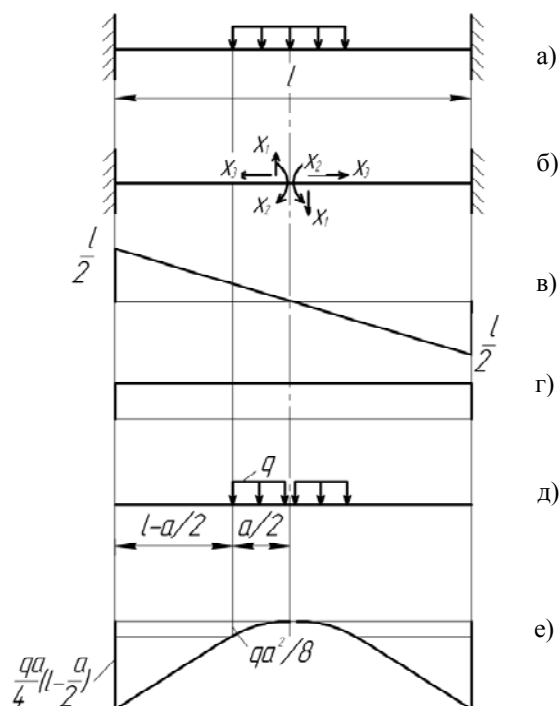


Рисунок 2 – Розрахункова схема вигину пальця

Джерело: розроблено авторами

Для невідомих сил X_1 і X_2 маємо систему канонічних рівнянь:

$$\begin{aligned} X_1 \delta_{11} + \Delta_1 &= 0; \\ X_2 \delta_{22} + \Delta_2 &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Очевидно, що поздовжня сила $X_1 = 0$.

Для визначення невідомих переміщень δ_{11} і δ_{22} будемо одиничні епюри (рис. 2, в, г).

Тоді:

$$\begin{aligned} EI\delta_{11} &= 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{l}{2} \cdot \frac{l}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{l}{2} = \frac{l^3}{12}; \\ EI\delta_{22} &= l. \end{aligned} \quad (6)$$

Для розрахунку Δ_1 і Δ_2 будемо вантажну епюру (рис. 2, е) для еквівалентної системи (рис. 2, д). Через перемножування симетричної (рис. 2, д) і кососиметричної (рис. 2, в) епюр:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= 0, \\ EI\Delta_2 &= \frac{qa}{8} \left[\frac{a^2}{3} + \frac{a(l-a)}{2} + \frac{(l-a)\left(l-\frac{a}{2}\right)}{1} \right]. \end{aligned}$$

Визначимо чисельні значення коефіцієнтів відповідно до конструктивних параметрів вузла (рис. 1, табл. 1).

Для пальців Д245 – $q = 1080$ МПа.

Для спрощення чисельних розрахунків в якості одиничної довжини приймаємо a . Тоді $l \approx 2a$ (рис. 2, д).

У цих одиницях:

$$\begin{aligned} EI\delta_{11} &= \frac{8}{12} a^3 = 0,667 a^3; \\ EI\delta_{22} &= 2a; \\ EI\Delta_2 &= \frac{qa}{8} \left[\frac{a^2}{3} + \frac{a^2}{2} + \frac{a^2}{2} \right] = 0,167 qa^3. \end{aligned}$$

Вирішуючи систему рівнянь (5):

$$\begin{aligned} X_1 &= 0; \\ X_2 &= \frac{0,167 qa^3}{2a}, \end{aligned}$$

отримуємо $X_2 = -0,13$ кНм.

Враховуючи знайдені дані значень X_1 і X_2 виконаємо розрахунок максимального прогину в середині пальця (рис.2). При цьому використовуємо схему еквівалентної системи (рис.3).

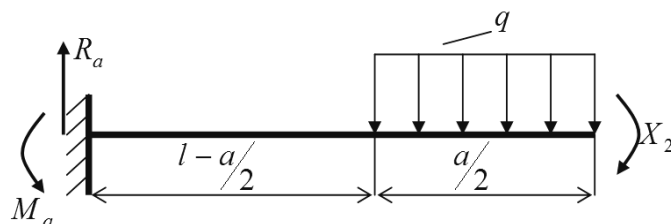


Рисунок 3 – Еквівалентна розрахункова схема вигину пальця

Джерело: розроблено авторами

Визначимо опорні реакції R_a й M_a .

$$R_a = 20,5 \text{ кН};$$

$$M_a = 0,455 \text{ кНм}.$$

Універсальне рівняння пружної лінії балки для середини перерізу має вигляд:

$$EIy_{\max} = EIy_o + EI\Theta_o \frac{l}{2} + R_a \frac{\left(\frac{l}{2} - 0\right)^3}{6} + M_a \frac{\left(\frac{l}{2} - 0\right)^2}{2} - q \frac{\left[\frac{l}{2} - \frac{l-a}{2}\right]^4}{24}.$$

Для нашої випадку $y_o = \Theta_o = 0$.

Тоді, приймаючи $l = 2a$, маємо:

$$EIy_{\max} = R_a \frac{1}{6} a^3 - M_a \frac{1}{2} a^2 - q \frac{1}{24} \frac{a^4}{16}.$$

Таким чином з урахуванням значень R_a, M_a, a для пальців Д245 маємо:

$$EIy_{\max} = -9,2 \cdot 10^{-4} \text{ Нм}^3.$$

Розрахунок прогину пальця в цьому ж перерізі для схеми балки із шарнірно-опорними кінцями показав, що $EIy_{\max} = -6,1 \cdot 10^{-4} \text{ Нм}^3$.

Таким чином, перехід від схеми із шарнірно-опорними кінцями до схеми з абсолютно жорстким закріпленням кінців значно збільшує жорсткість пальця.

Проаналізуємо умови закріплення пальця в поршні (рис. 1). Слід відзначити, що конструктивні приливи поршня, в отвір яких вставляють палець, в силу своєї конструкції, мають піддатливість. Тому, для інженерних розрахунків можна прийняти, що реальна жорсткість пальця в умовах експлуатаційного навантаження (рис. 1) в 2 рази більше жорсткості, визначеної відповідно до розрахункової схеми із шарнірно-опорними кінцями.

Експериментальну перевірку наведеного розрахунку виконували на установці, схема якої показана на рис.4.

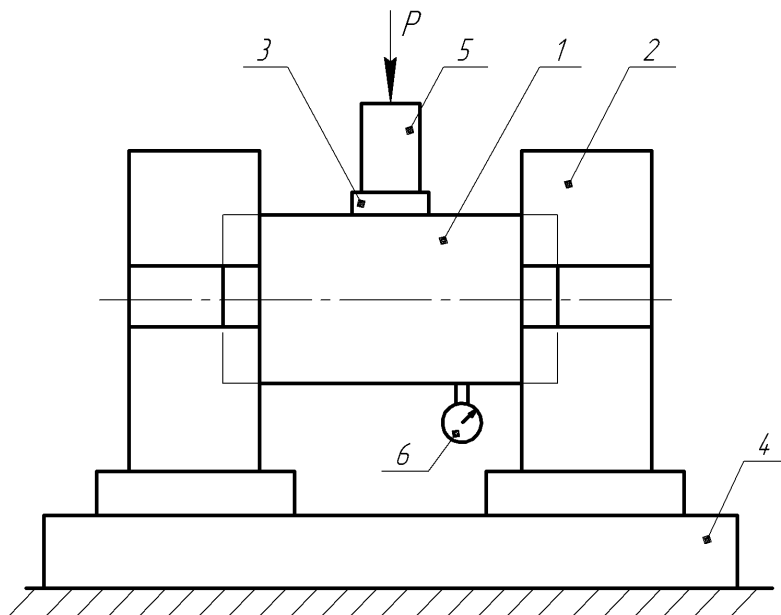


Рисунок 4 – Схема установки для дослідження жорсткості відновлених пальців
Джерело: розроблено авторами

Палець 1, що випробовується, закріплювали в роз'ємних призмах 2 (рис. 4). Зверху на ділянку, рівною довжини контакту пальця із шатуном, накладали алюмінієвий елемент 3 товщиною 10 мм, що своєю внутрішньою поверхнею сполучався із зовнішньою поверхнею пальця, а по зовнішній поверхні мав плоску контактну площадку, на якій і прикладалося навантаження. Призми співвісно закріплювалися на плиті 4, що встановлювалася на пресі ПММ-200.

Пуансоном 5 здійснювалося навантаження необхідною експлуатаційною силою. У навантаженому стані за допомогою індикаторної головки 6 вимірювся прогин в 5 перерізах по довжині.

Результати вимірів переміщень для пальця Д245, відновленого двічі під експлуатаційним навантаженням $P=141$ кН, наведені на рис. 5.

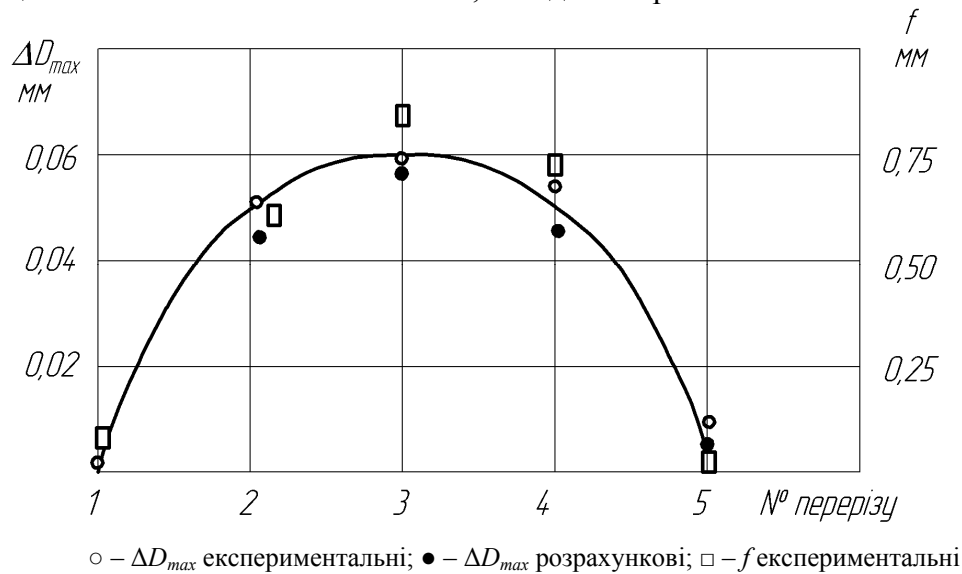


Рисунок 5 – Зміни некруглості робочої поверхні ΔD_{max} і прогину f пальця уздовж його довжини
Джерело: розроблено авторами

Як можна побачити (рис.5), максимальний прогин має місце в середньому перерізі. Крім того, спостерігається гарна кореляція між ΔD_{max} і прогином f . У середньому можна прийняти, що $\Delta D_{max} = 0,067 f_{max}$.

Це також експериментально підтверджує прийняте раніше положення про пропорційний зв'язок ΔD_{max} із прогином f , що використовувався для теоретичного розрахунку ΔD_{max} .

Оцінимо зміну вигинаючої жорсткості відновленого пальця в порівнянні із жорсткістю нового. Вигинаюча жорсткість EI для однакового матеріалу пропорційна осьовому моменту інерції: $I = \frac{\pi D^4}{64} (1 - K_y^4)$.

Розглянемо цю зміну. Зовнішній діаметр пальця не змінюється – $D = 38$ мм.

Внутрішній діаметр нового пальця $d_0 = 18,6$ мм, а вдруге відновленого – $d_2 = 19,2$ мм.

Тоді співвідношення між вигинаючими жорсткостями нового й відновленого пальця β дорівнює:

$$\beta = \frac{(1 - \alpha_0^4)}{(1 - \alpha_2^4)} = \frac{0,884}{0,856} = 1,03.$$

Можна побачити (табл.2), що незначне зменшення товщини стінки відновленого пальця змінює його вигинаючу жорсткість не більше, ніж на 3%. З відомих співвідношень для визначення вигинаючих напружень також визначаємо, що міцність відновленого пальця зменшується не більш, ніж на 3%.

Таким чином, встановлено, що навіть дворазове відновлення практично не змінює міцність та геометричні характеристики поршневих пальців.

Висновки.

1. Удосконалено методику розрахунку на міцність поршневих пальців. Використання запропонованої методики дозволило виконати перевірочні розрахунки на міцність поршневих пальців двигунів Д245.

2. Експериментальна перевірка теоретичних положень дозволила стверджувати про коректність запропонованого підходу до розрахунку на міцність.

3. Виконані аналітичні розрахунки та експериментальні дослідження показали, що використання методу роздачі внутрішнього отвору при відновленні поршневих пальців не суттєво впливає на їх міцність та геометричні характеристики. Це дозволяє рекомендувати дану технологію для відновлення даного класу деталей.

Список літератури

1. Суслов А.Г. Совершенствование и разработка конкурентоспособных технологий, обеспечивающих повышение качества изделий машиностроения. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2006. №2. С.24-29.
2. Черновол М.И., Шепеленко И.В., Варума Арифа. Комбинированный метод обработки поверхностей трения. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту*. 2011. Вип. 24, ч. 2. С.46-49.
3. Капелюшний Ф.М. Вплив експлуатаційних факторів на зношування пальців дизельних двигунів. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. 2001. Вип.2, т.17. С.113-117.
4. Балбин Н.В. Перспективы развития тепловозных дизелей нового поколения. *Двигатель*. 2007. №7. С.15-20.
5. Хромов В.Н. Восстановление поршневых пальцев тракторных дизелей гидротермической раздачей в условиях сельскохозяйственных ремонтных предприятий : автореф. дис. канд. техн. наук: 05.20.08. М., 1984. 18 с.
6. Відновлення поршневих пальців гарячим пластичним деформуванням / Ю.В. Кулешков та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2021. Вип. 4(35). С.54-62.
7. Посвятенко Е.К., Немировський Я.Б., Шепеленко І.В. Протягування та протяжний інструмент: монографія. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2020. 298 с.
8. Інженерія деталей, оброблених протягуванням: монографія / Е.К. Посвятенко та ін. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2021. 466 с.
9. Колчин А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей. М.: Высшая школа, 1971. 344 с.
10. Николаенко А.В. Теория, конструкция и расчет автотракторных двигателей. М.: Колос, 1984. 355 с.
11. Немировський Я.Б., Деревець Л.І. Відновлення поршневих пальців на основі деформуючого протягування. *Механізація та електрифікація сільського господарства: міжвідом. темат. наук. зб.* 2003. Вип.87. С.269-278.
12. Смирнов В.С. Теория обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1973. 496 с.

References

1. Suslov, A.G. (2006). Sovershenstvovanie i razrabotka konkurentosposobnyh tehnologij, obespechivajushhih povyshenie kachestva izdelij mashinostroenija [Improvement and development of competitive technologies that improve the quality of engineering products]. *Vestnik Brjanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta – Bulletin of the Bryansk State Technical University, Vol.2*, 24-29. [in Russian].
2. Chernovol, M.I., Shepelenko, I.V. & Varuma Arifa (2011). Kombinirovannyj metod obrabotki poverhnostej trenija [Combined method of processing friction surfaces]. *Zbirnik naukovih prac'*

- Kirovohrads'kogo nacional'nogo tehničnogo universitetu – Collected Works of Kirovohrad National Technical University. Machinery in Agricultural Production, Industry Machine Building, Automation, Vol.24 (2), 46-49. [in Russian].*
3. Kapel'jushnij, F.M. (2001). Vpliv ekspluataciynih faktoriv na znoshuvannja pal'civ dizel'nih dviguniv// Praci Tavrijs'koї derzhavnoї agrotehničnoї akademii [Impact of operational factors on the wear of the fingers of diesel engines]. *Praci Tavrijs'koї derzhavnoї agrotehničnoї akademii – Proceedings of the Tavriya State Agrotechnical Academy, Vol.2 (17), 113-117. [in Ukrainian].*
 4. Balbin, N.V. (2007). Perspektivy rozvittja teplovoznih dizelej novogo pokolenija [Prospects for the development of diesel engines of a new generation]. *Dvigatel' – Engine, Vol.7, 15-20. [in Russian].*
 5. Hromov, V.N. (1984). Vosstanovlenie porshnevnyh pal'cev traktornyh dizelej gidrotermicheskoj razdachej v uslovijah sel'skohozjajstvennyh remontnyh predprijatij [Restoration of piston pins of tractor diesel engines by hydrothermal expansion in the conditions of agricultural repair enterprises]. *Extended abstract of Candidate's thesis [in Russian].*
 6. Kuleshkov, Ju.V., Krasota, M.V. & Rudenko, T.V. (2021). Vidnovlennja porshnevnyh pal'civ garjachim plastichnim deformuvannjam [Restoration of piston fingers by hot plastic deformation]. *Tsentrāl'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky. – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. Vol.4 (35). 54-62 [in Ukraine].*
 7. Posvjatenko, E.K., Nemirovs'kij, Ja.B. & Shepelenko, I.V. (2020). *Protjaguvannja ta protjazhnyj instrument [Broaching and broaching tool]. Kropyvnyts'kyj: Vydavets' Lysenko V.F [in Ukraine].*
 8. Posvjatenko, E.K., Nemirovs'kij, Ja.B., Shekin, S.E., Shepelenko, I.V. & Chernjavs'kij, O.V. (2021). *Inzhenerija detalej, obroblenih protjaguvannjam [Engineering parts machined by deforming broaching]. Kropyvnyts'kyj: Vydavets' Lysenko V.F [in Ukrainian].*
 9. Kolchin, A.I. & Demidov, V.P. (1971). *Raschet avtomobil'nyh i traktornyh dvigatelej [Calculation of automobile and tractor engines]. Moscow: Vysshaja shkola [in Russian].*
 10. Nikolaenko, A.V. (1984). *Teorija, konstrukcija i raschet avtotraktornyh dvigatelej [Theory, design and calculation of autotractor engines]. Moscow: Kolos [in Russian].*
 11. Nemirovs'kij, Ja.B. & Derevec', L.I. (2003). Vidnovlennja porshnevnyh pal'civ na osnovi deformujučogo protjaguvannja [Restoration of piston pins by deforming broaching]. *Mehanizacija ta elektrifikacija sil's'kogo gospodarstva: mizhvidom. temat. nauk. zb. – Mechanization and electrification of agriculture: interdepartmental. topic. Science. coll., Vol.87, 269-278 [in Ukrainian].*
 12. Smirnov, V.S. (1973). *Teorija obrabotki metallov davleniem [Theory of metal forming]. Moscow: Metallurgija [in Russian].*

Yakiv Nemyrovskyi, Prof., Dsc., **Ihor Shepelenko**, Assoc. Prof., Dsc., **Michael Krasota**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Evaluation of the Strength of Piston Pins Restored by Deforming Broaching

One of the most progressive methods of proceeding in the piston fingers of engines of internal combustion there is distribution of the internal opening that provides the increase of external diameter of threadbare finger. In the process of further treatment the output of assumption is executed from an external surface that causes reduction walls and necessity of realization of calculations on durability of finger. The aim of researches is realization of calculation on durability of piston fingers of engines of internal combustion, treat the deforming reaching. It is considered existing methodologies of estimation of durability of finger. The checking calculations of durability of fingers of motor-vehicle and tractor engines are in-process executed. Thus used chart with the hard fixing of free ends, for what an indefinite beam is expected static.

The terms of fixing of finger are analysed in a piston. Verification of analytical calculations executed on the experimental setting. Realization of research allowed to set next conclusions:

1. Methodology of calculation is improved on durability of piston fingers. The use of an offer methodology allowed to execute checking calculations on durability of piston fingers of motor-vehicle and tractor engines.

2. Experimental verification of theoretical positions allowed to assert about correctness offered approach near a calculation on durability.

3. The executed analytical calculations and experimental researches showed that using of method of distribution of the internal opening for proceeding in piston fingers not substantially influenced on their durability and geometrical descriptions. It allows to recommend this technology for proceeding in this class of details.

piston finger, distribution, durability, inflexibility

Одержано (Received) 06.02.2022

Прорецензовано (Reviewed) 16.02.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

А.Є. Чернай, асп.

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,
Україна

e-mail: chernayae91@gmail.com

Формування еквідистантних робочих поверхонь прецизійних спряжень деталей машин

Показано, що процеси триботехнологій припрацювання і відновлення з накладанням змінного струму та формування еквідистантних спряжених поверхонь є найбільш ефективними у порівнянні з іншими методами. Виділені основні фактори та дано їх характеристику. Розглянуті етапи припрацювання і відновлення поверхонь тертя при використанні змінного електричного струму. З'ясована сутність методу накладання змінного струму на спряжені деталі машин й отримання еквідистантних робочих поверхонь. Виявлено істотне покращення триботехнічних характеристик поверхонь тертя, їх формування під дією електрохімічної і механічної складових. Показано можливість припрацювання основних спряжень деталей гідроагрегатів, використання розроблених триботехнологій припрацювання і відновлення на основі законів електрохіміко-механічних процесів. З'ясовано дію електроліту, як рідкого адсорбенту при адсорбції на поверхнях тертя. Одним з таких адсорбентів використана олеїнова кислота. Показано, що при цьому найкращого результату можна досягти протіканням електрохімічної реакції травлення поверхонь спряжених деталей та їх механічного активування. В запропонованих технологіях використовується робоча напруга, яка не перевищує 5 В змінного електричного струму, а щільність струму 10^4 А/м². Стравлювання поверхонь відбувається з частотою анодної поляризації. Електрохімічне травлення при припрацюванні базується на законах Фарадея. Реалізація зазначеного стравлювання відбувається за допомогою пасивуючого електроліту, що забезпечує максимальне вирівнювання (еквідистантність) поверхонь впливом відносної швидкості руху і навантаження. Зазначено, що розроблені технології залежать від характеру експлуатації та режимів тертя спряжень деталей вузлів, систем і агрегатів машин.

прецизійні деталі, еквідистантні поверхні, спряження деталей, змінний електричний струм, електрохіміко-механічні процеси, припрацювання

Постановка проблеми. Проблема підвищення надійності мобільної сільськогосподарської (МСГТ) та автотранспортної техніки (АТТ) безпосередньо пов'язана з процесами зміни технічних параметрів спряжень деталей систем і агрегатів [1]. Інтенсивність і характер протікання цих процесів істотно залежать від відхилень форми і точності взаємного розташування робочих поверхонь деталей в спряженнях в процесі експлуатації. Через втрату еквідистантності та точності розташування деталей і їх переміщень в процесі експлуатації машин відбуваються заїдання, заклинювання, удари, вібрації, порушення герметичності спряжень та інші проблеми. Зазначене призводить до відмов, зниження ресурсу, значних енергетичних втрат, перегріву спряжень агрегатів, підвищення витрати паливно-мастильних матеріалів. Ефективність реалізації процесів припрацювання та відновлення ресурсовизначальних спряжень деталей можливо забезпечити високу якість і усунути відхилення взаємного розташування і форми деталей, а також підготувати їх до сприйняття експлуатаційних навантажень [2].

Разом з тим, більшість методів припрацювання і відновлення спрямовані на прискорення процесів, а не на перенесення умов пристосування спряжених поверхонь на початковий період їх роботи, що є недостатньо ефективним при підготовці робочих поверхонь деталей. Відсутність відомостей про динаміку зміни технічного стану спряжень деталей не дає можливості ефективно управляти процесами припрацювання та відновлення, які спостерігаються через певний тривалий час або з надмірним зносом.

Застосування ряду покриттів і захисних плівок в спраженнях деталей створює перехідний шар, що приховує неприпрацьовані поверхні, і після зносу, під час експлуатаційних навантажень, може викликати задири і схоплювання. Використання присадок в оливу зменшує коефіцієнт тертя, але ускладнює припрацювання деталей з геометричними відхиленнями. Їх додавання до палива – призводить до утворення абразивних продуктів зносу, що забезпечує усунення геометричних відхилень за рахунок надлишкового зносу. Використання некерованих електричних полів і неефективних олив обумовлює наявність абразивних продуктів за рахунок електроерозійного дії на робочу поверхню деталі, призводить до максимального локального зміцнення і, в той же час, зменшує ресурс [3].

При використанні змінного електричного струму та електроліту в процесах припрацювання прискорюється взаємне пристосування поверхонь деталей з різних матеріалів, типів спражень і видів геометричних відхилень і одночасно реалізується ефективне підвищення надійності вузлів, систем і агрегатів машин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Досвід експлуатації МСГТ і АТТ показав, що застосування гідрооб'ємних приводів (ГОП) замість механічних передач дозволяє підвищити продуктивність машин на 20...45%. ГОП вільно комплектується в просторі та дозволяє здійснювати передачу енергії на великі відстані, простіше в експлуатації, дозволяє надійно охороняти спраження деталей трансмісії від перевантажень, автоматизувати управління МСГТ і АТТ [4]. Недоліками ГОП перед механічною передачею (МП) є: зниження коефіцієнта корисної дії (ККД) на 5...10%; зменшення моторесурсу до 3...5 тис. мото-год. замість 7...10 тис. мото-год.; зміна параметрів ГОП в процесі експлуатації за рахунок зносу деталей гідромашин, що призводить до збільшення витоків робочої рідини і зниження об'ємного ККД гідромашини. При всьому різноманітті конструкцій прецизійні спраження гідравлічних агрегатів мають характерні ознаки, що дозволяють розділити їх на п'ять типів за умовами навантаження і, як наслідок, по типовим причин підвищення тертя і пошкодження деталей (рис. 1).

Діаметральний зазор прецизійного спраження, в залежності від розміру деталей і призначення, може бути від 2 мкм до декількох десятків мікрометрів. Основними вимогами, що пред'являються до прецизійним спражень, є висока стабільність малих сил тертя і хороша герметичність. При цьому під ушкодженнями розуміються утворені в процесі роботи будь-які зміни геометрії, що підвищують шорсткість поверхні і структурні зміни матеріалу деталей [5-6].

Важливе місце при дослідженні зношування деталей в процесі експлуатації машин займають роботи [7-9], по вивченню структурних змін в матеріалах деталей спражень і впливу на них навантаження і зовнішнього середовища. Особливий інтерес при вивченні механізму і причин пошкоджуваності деталей трибоспражень представляють роботи по дослідженню умов схоплювання металів. Вивченню своєрідного процесу переносу матеріалів деталей при терті без пошкодження поверхні і без істотного підвищення тертя присвячені роботи [10,11].

Необхідною умовою для розуміння ролі зовнішнього середовища в процесах тертя, зношування і пов'язаної з ними пошкоджуваності деталей є результати, досягнуті у вивченні формування на їх поверхнях змащувальних плівок та несучої здатності [12,13]. Особливий напрямок у вивченні впливу поверхнево-активних середовищ (ПАС) на стан матеріалів деталей спражень в умовах механічного навантаження було розглянуто в роботі [14].

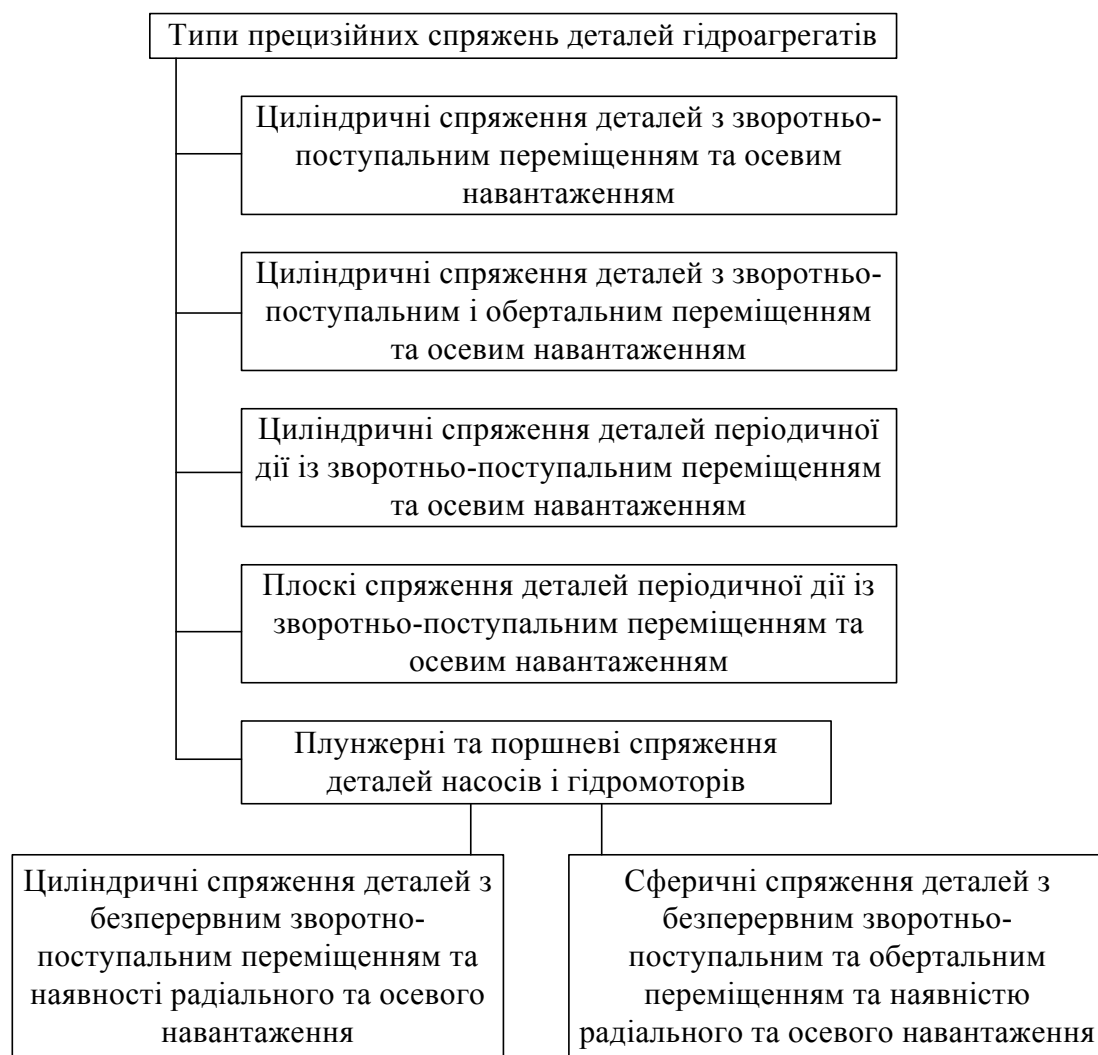


Рисунок 1 – Блок-схема існуючих типів прецизійних спряжень деталей гідроагрегатів

Джерело: розроблено автором

Однією з умов успішного дослідження механізму пошкоджуваності деталей при терті є досягнення в області розв'язання контактних завдань [15-18]. Дослідження впливу шорсткості, механічних властивостей і навантаження на формування площ контакту і контактних тисків відображені в роботах [19-21]. Значний внесок у вивчення процесів тертя і стану поверхневого шару деталей машин при фрикційної контакті відображений в роботах [22-25]. Аналіз режимів припрацювання, її тривалості в випробуваннях, проведених на ряді гідроагрегатних заводів, свідчить, що навіть для однотипних деталей і їх спряжень для гідроприводу час припрацювання змінюється від декількох годин до декількох десятків годин [26].

У гідравлічних об'ємних передачах використовуються гідронасоси і гідромотори аксіально-плунжерного типу. Одним з основних спряжень, що лімітують довговічність цих гідроагрегатів, є сферичне спряження "сталевий плунжер-бронзовий під'ятник". Під час роботи аксіально-плунжерний насос створює високий тиск, до 300 МПа, основна частина якого, сприймається сферичним спряженням [27].

Технологія ремонту сферичного спряження плунжера із застосуванням абразивного притирання із застосуванням пасти ГОІ і мікропорошків різної зернистості проводиться в два-три етапи (чорнова, чистова, остаточна). Під час притирання електродвигун разом з притиром повертають навколо вертикальної осі каретки

верстата, завдяки чому здійснюється обробка всієї площі сфери. У виготовлених під'ятниках розсвердлюють сферу, розточують її фасонним різцем, потім за допомогою спеціального притиру і додаванням пасти ГОІ здійснюють притирання [28].

Абразивне притирання знайшло широке застосування при ремонті і виготовленні не тільки розглянутого спряження, але й інших типів прецизійних спряжень гідроагрегатів, тому що технологія відновлення аналогічна технології виготовлення [29]. В процесі мікрорізання відбувається зняття припуску металу, необхідного для усунення геометричних відхилень і розмірів оброблюваної заготовки, а також дефектного шару, створеного попередніми операціями. При пластичній деформації відбувається згладжування нерівностей поверхні і заповнювання їх западин. Процес завершує формування шорсткості доведеної поверхні, висота мікронерівностей якої, при цьому, дорівнює сотих часток мікрометра [30]. Слід виділити і суттєві недоліки абразивної притирання прецизійних деталей гідроагрегатів: наявність технологічних забруднень; небезпека шаржування абразивних частинок в м'які матеріали; невідповідність шорсткості умов роботи; неповне формування фактичної площі плями контакту; негативний градієнт механічних властивостей по глибині.

В процесі абразивного притирання виникає небезпека шаржування абразивних частинок в поверхню оброблюваних деталей, оскільки під'ятники аксіально-плунжерного насоса виготовляються з бронзи марки БрАЖ 10-4-4. Ці частинки не вимиваються навіть при використанні ультразвукового очищення. Вони залишаються в деталях і під час роботи, потрапляючи в робочу рідину і викликаючи підвищений знос насоса і всіх систем гідроприводу. Тому деталі, виготовлені з м'яких матеріалів (бронза, алюміній), повинні піддаватися безабразивній обробці [31].

Великі труднощі виникають при невідповідності шорсткості поверхонь деталей спряжень деталей умов роботи. Абразивне притирання в режимі полірування забезпечує зниження висоти шорсткості [32]. Але в результаті аналізу певних експериментів, встановлено, що зі зменшенням шорсткості поверхні зразків зменшується навантаження, необхідна для схоплювання, збільшується площа контакту і одночасно погіршуються умови змащування, що ускладнює проникнення рідини до поверхонь трибоспряжень [33]. Наявність на поверхні пор, які відіграють роль оливних кишень, ефективним чином забезпечує збереження в зоні контакту оливного шару, що розділяє спряжені поверхні. Це особливо важливо для деталей, що працюють в умовах великих контактних навантажень і граничного мащення [34].

Численними дослідженнями встановлено, що зниження ресурсу спряження деталей викликається неповним формуванням фактичної площі плями контакту і фактична опорна поверхня деталей після їх механічної обробки надзвичайно мала [35,36]. Дуже важливо при припрацюванні забезпечити негативний градієнт механічних властивостей по глибині припрацювання поверхні деталі. Аналіз відмов гідроприводів в процесі проведення припрацювання показує, що основне число відмов обумовлено ушкодженнями і руйнуваннями в спряженнях внаслідок схоплювання спряжених поверхонь деталей [37]. Після абразивного притирання, особливо в режимі полірування, має місце наклеп. При цьому твердість поверхневого шару збільшується в 1,5...3,0 рази, а глибина наклепаного шару, в залежності від матеріалу деталі, становить 15...20 мкм. Чим м'якше матеріал, тим більша ступінь його наклепування. Тому має місце негативний градієнт механічних властивостей, тобто міцність адгезійного зв'язку поверхневих шарів вище, ніж міцності нижчих, що і є причиною глибинного схоплювання матеріалу деталі. В цьому випадку руйнування відбувається в більш слабкою локальної області на значній глибині.

Постановка завдання. Метою даної роботи є з'ясування сутності методу

формування еквідистантних робочих поверхонь деталей при накладанні змінного електричного струму і використанні електролітів.

Виклад основного матеріалу. Ефективність застосування триботехнологій припрацювання та відновлення для усунення геометричних відхилень спряжень деталей систем і агрегатів МСГТ і АТТ та підвищення їх довговічності спочатку виявлена завдяки проведеним експериментальним дослідженням та особливостей процесів тертя [38]. Це дало можливість поліпшити експлуатаційні характеристики поверхонь тертя основних спряжень вузлів і агрегатів машин. Інтерес викликають теоретичні дослідження, спрямовані на розкриття механізму формоутворення еквідистантних спряжених поверхонь тертя деталей в різних режимах тертя [39]. Схема впливу сукупності факторів запропонованого методу на інтенсивність зносу і знімання матеріалів деталей, представлена на рис.2.

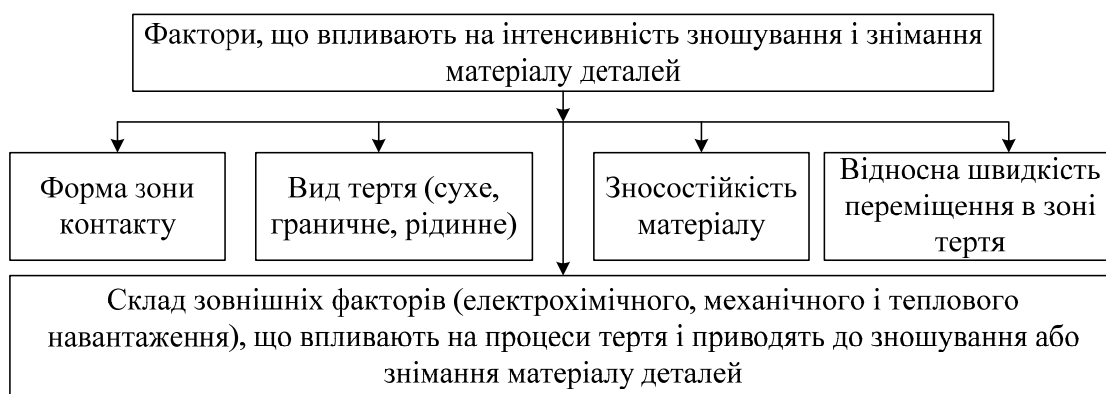


Рисунок 2 – Фактори, що впливають на інтенсивність зношування і знімання матеріалу в процесі реалізації триботехнологій припрацювання і відновлення з використанням змінного електричного струму

Джерело: розроблено автором

Можна бачити, що основними факторами методу припрацювання і відновлення є: форма зони контакту; вид і режим тертя; властивості поверхонь тертя; фактори зовнішнього впливу [40]. Очевидно, що від початкової геометрії робочих поверхонь деталей істотно залежить процес припрацювання і відновлення, якість робочих поверхонь, зносостійкість і надійність роботи спряжень деталей [41]. Поверхні тертя спряжених деталей при реалізації методів триботехнічного припрацювання та відновлення зазнають три основних етапи (табл.1), режим тертя на даних етапах визначається числом критерію Зоммерфельда S_m .

Таблиця 1 – Етапи припрацювання та відновлення поверхонь тертя спряження деталей при використанні змінного електричного струму

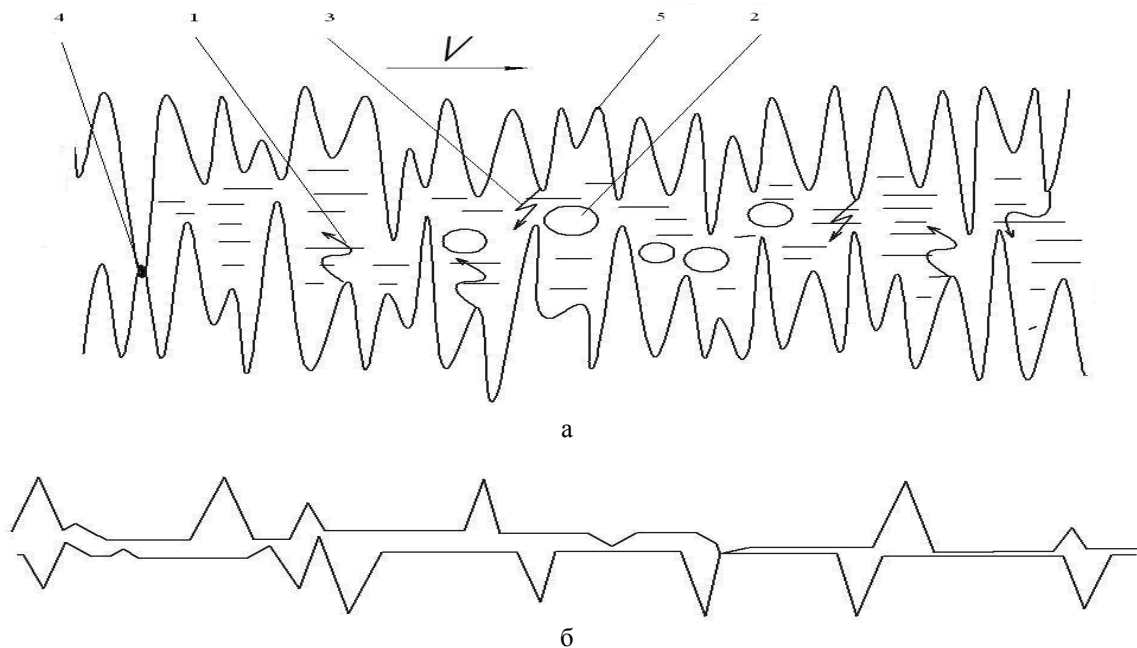
I етап	Формування початкової площі контакту; граничний режим тертя, $S_m < 10^{-5}$; прояв механічної складової процесів: механічне стирання або відтискання пластичного матеріалу.
II етап	Зростання площі плями контакту; перехід від напіврідинного режиму тертя до гідродинамічного, $S_m \approx 10^{-5}$; прояв електрохімічної і механічної складових процесів.
III етап	Остаточне формування площі плями контакту; режим гідродинамічного тертя, $S_m > 10^{-5}$; прояв електрохімічної складової процесів.

Джерело: розроблено автором

У початковий період часу ($S_m < 10^{-5}$), відбувається механічне стирання або відтискання пластичних матеріалів у поверхневому шарі спряжених деталей та формування початкової площі контакту (І етап) [42]. Знаючи, що значення критерію Зоммерфельда $S_m = 10^{-5}$ відповідає перехідному режиму тертя, легко встановити зміну станів оливи при припрацюванні спряжень поверхонь в процесі тертя. З його зростанням можливий перехід від напіввіддільного тертя до гідродинамічного (ІІ етап), а при гідродинамічному режимі тертя ($S_m > 10^{-5}$) остаточно формується пляма контакту в трибоспряженні деталей (ІІІ етап) [43].

В запропонованих триботехнологіях інноваційним рішенням є використання методу накладання змінного електричного струму малої напруги і великої по величині струму на спряженнях деталей різного типу. Характерним також є наявність електроліту в зазорі між деталями, трибологічно активних присадок до оливи, а також використання матеріалів, що є трибологічно ефективними в режимах сухого тертя [44].

Метод накладання змінного електричного струму покращує триботехнічні характеристики поверхонь тертя, зміна форми робочих поверхонь деталей відбувається на всіх трьох етапах припрацювання і відновлення, що неможливо при звичайних методах, які базуються на механічному зношуванні або створенні різного виду плівок на поверхнях тертя [45]. Формоутворення робочих поверхонь при реалізації запропонованих триботехнологій відбувається завдяки електрохімічній і механічній складових впливу на матеріали деталей в процесі припрацювання і відновлення (рис.3).



- 1 – періодичне розчинення матеріалу поверхні деталі; 2 – газоутворення;
3 – періодичне спрацювання під дією електричного поля змінного струму;
4 – механічне спрацювання; 5 – формування поверхневих плівок.

Рисунок 3 – Початковий (а) і припрацьований (б) стан поверхонь спряження деталей при реалізації процесів, що впливають на їх формоутворення під дією змінного електричного струму та наявного електроліту

Джерело: розроблено автором

Виявлено, що вплив різних чинників на спряження деталей дозволяє формувати плосковершинний рельєф шорсткості поверхонь. При цьому механічне активування сприяє травленню вершин виступів, а наявність поверхневих плівок і процесу

газоутворення – зменшує розтравлювання западини рельєфу поверхонь деталей.

Проблема підвищення надійності, зокрема, довговічності силових агрегатів машин, найбільш гостро відчувається у сфері технічного сервісу. Це спостерігається у випадках коли термін служби відремонтованого агрегату значно менше 80% терміну служби нового, при високій вартості сервісу, і ймовірність безвідмовної роботи багато в чому залежить від технічного стану і показників зношування основних спряжень деталей. Довговічність відремонтованих ДВЗ, перш за все, визначається відхиленнями форми і взаємного розташування корінних і шатунних підшипників колінчастого валу.

Відомо, що геометрія спряжень деталей значно відрізняється від правильної геометрії і шорсткість їх робочих поверхонь після механічної обробки часто не відповідає оптимальним значенням і порушується їх еквідистантність. Це призводить до підвищення питомих тисків в зоні контакту, безпосередньому контактування металевих поверхонь в наслідок чого утворюються задири, схоплювання і підвищеного зношування припрацьованих поверхонь. У цих умовах тільки високоефективні методи і способи припрацювання здатні компенсувати відхилення поверхонь тертя основних спряжень деталей.

Для компенсації неточностей форми деталей і похибок складання вузлів, системи і агрегати МСГТ і ТМ піддають обкатці, при якій відбувається припрацювання і відновлення поверхонь тертя. Найбільш ефективним прийомом прискорення припрацювання і відновлення з підвищенням показників надійності є використання суміщених процесів впливу на припрацьовані поверхні.

Розгляд факторів, що впливають на інтенсивність знімання матеріалу робочих поверхонь спряжених деталей при припрацюванні і відновленні [1,2], впливають: форма зони контакту, вид тертя, властивості поверхонь тертя і фактори зовнішнього впливу. При цьому важливим є вплив початкової геометрії поверхонь тертя на протікання процесу припрацювання і відновлення поверхонь тертя.

Характерним є і той факт, що зміна форми і стану поверхонь у деталей спряжень відбувається на всіх трьох етапах припрацювання. Звичайні методи припрацювання і відновлення, що базуються на механічному зношуванні або створенні на поверхнях тертя різного виду плівок, не забезпечують якісні робочі поверхні. Припрацювання і відновлення спряжень електрохіміко-механічним методом з використанням змінного струму дозволяє компенсувати геометричні відхилення форми деталей, як показано на прикладі циліндричного спряження конусного ролика і опори.

Під впливом різних факторів процесів запропонованих триботехнологій припрацювання і відновлення дозволяє формувати зносостійкі поверхні. Механічне активування сприяє травленню електролітом робочих поверхонь деталей спряжень в зоні їх безпосереднього контакту, а наявність поверхневих плівок і газоутворення зменшує розтравлювання поверхонь, розділених електролітом.

У ряді гідроагрегатів в якості матеріалів спряжених деталей використовуються бронза і сталь, а фінішною обробкою є абразивне доведення. При такій обробці можлива неякісна підготовка робочої поверхні і відхилення геометрії деталей. Через це має місце мала фактична площа плями контакту, що призводить до значного припрацьовального зносу при допустимих зазорах в спряженні 0,002...0,006 мм, причому зношування супроводжується схоплюванням, натирами і т.п. [4]. Крім того, в процесі абразивного доведення можливо шаржування поверхні, що значно збільшує знос в експлуатації [32].

Можливим шляхом вирішення завдання підвищення якості припрацювання основних спряжень деталей гідроагрегатів може бути розробка ТТП і ТТВ на основі законів електрохіміко-механічних процесів [46]. Однак для даних спряжень на

застосовуваних електролітах вона ускладнена, оскільки при великих навантаженнях і малих зазорах має місце граничний режим тертя, що зменшує дію електрохімічної складової на процес припрацювання і відновлення.

У даній ситуації більш ефективними є використання рідких адсорбентів в складі електроліту, які адсорбуючись на поверхнях тертя запобігають розвитку на них тріщин. У той же час, при механічній взаємодії поверхонь спостерігається їх активація в локальних місцях, очищенням від адсорбентів, і забезпечення електрохімічної взаємодії. Одним з таких адсорбентів є олеїнова кислота, широко застосовувана як присадка до технологічних олив, а в гідравлічних машинах – як протизадирний засіб [47]. Таким чином, на шорсткість спряжених поверхонь деталей впливають як режими припрацювання, так і склад електроліту.

Крім цього в зазорі спряжень деталей виявлено газоутворення і екранізація мікровпадин поверхні бульбашками газу зменшує їх розтравлювання, що сприяє зниженню шорсткості поверхні. Виходячи з такого механізму згладжування шорсткості, можна запропонувати інший шлях блокування поверхні мікровпадин – використанням адсорбентів. При цьому невирішеним завданням залишається виявлення впливу олеїнової кислоти на шорсткість поверхонь при їх електрохіміко-механічній взаємодії. Тому необхідний пошук такого складу електроліту, при якому можливий процес припрацювання при граничному режимі тертя.

Відзначимо, що основною перевагою запропонованої ТТП і ТТВ є поєднання механічного активування спряжених поверхонь деталей при їх безпосередній взаємодії і електрохімічного травлення – при відокремленні шаром електроліту. Найкращих результатів можна досягти, керуючи процесом протікання електрохімічної реакції травлення поверхонь спряжених деталей та їх механічного активування. Спорідненими до електрохімічного травлення є наступні процеси: електрохімічна обробка (ЕХО), електрохімічна розмірна обробка (ЕХРО), електрохімічне полірування (ЕХП). Основними відмінностями цих процесів є більш низька робоча електрична напруга і щільність струму. При використанні запропонованої ТТП і ТТВ звичайна робоча напруга електричного змінного струму не перевищує 5 В, а щільність струму – 10^4 А/м², в той час як, при ЕХП електрична напруга становить – 10...20 В, а щільність струму – 10^5 А/м².

Пропоновані ТТП і ТТВ використовують змінний електричний струм, що дозволяє стравлювати поверхні спряжених деталей з частотою анодної поляризації. ТТП і ТТВ подібне до електрохімічного полірування, хоча тип електроліту, протікання електрохімічних реакцій і механізми впливу на поверхні спряжених деталей різні.

Електрохімічне травлення при припрацюванні базується на фундаментальній електрохімічній теорії, основу якої складають закони Фарадея. Маса стравленого металу при цьому визначається за рівнянням:

$$m_{cmp} = \frac{M_a I t}{n F_\phi} = c_{ex} I t, \quad (1)$$

де m_{cmp} – маса стравленого металу, г;

M_a – атомна вага;

I – струм, А;

n – валентність;

F_ϕ – постійна Фарадея;

t – тривалість процесу, год;

$C_{ex} = M_a / n \cdot F$ – електрохімічний еквівалент металу, г/А·год.

Відзначимо, що за рівнянням (1) в ідеальному випадку, можна оцінити кількість стравленого матеріалу при електрохімічній реакції. Хоча, реальний стан спряжених поверхонь деталей, газотворення в зазорі, концентрація електроліту і багато інших чинників можуть змінити отримані результати.

Наявність шару електроліту з низькою електропровідністю між спряженими поверхнями тертя деталей буде, в основному, визначати електрична робоча напруга процесу U_p . При граничному режимі тертя спостерігається безпосередній металевий контакт, а електрична робоча напруга процесу є мінімальною. Малі напруги електричного струму при припрацюванні не призводять до електрохімічного травлення поверхонь, а основним фактором в таких умовах є механічне зношування.

З формуванням початкової площі контакту режим змащення переходить у перехідний [48]. Робоча напруга збільшується і починається процес електрохімічного травлення. З ростом розділової плівки електроліту в зазорі спряжених деталей відбувається повне розділення їх поверхонь, що характерно для гідродинамічного режиму змащення. Електрична робоча напруга процесу U_p при цьому наближається до напруги холостого ходу U_{xx} джерела струму. Виявлено, що наявність розділової плівки електроліту можна визначити за критерієм Зоммерфельда S_m , рівному відношенню добутку динамічної в'язкості електроліту μ , та швидкості взаємного переміщення v до тиску в контакті p : $S_m = \eta v / p$.

Підвищення ефективності ТТП і ТТВ забезпечується критерієм Зоммерфельда S_m зі значенням порядку 10^{-5} , а значення робочої напруги електричного струму – U_p має наближатися до напруги холостого ходу U_{xx} , яке підбирається експериментально для забезпечення максимальної швидкості електрохімічного знімання. Реалізація зазначеного стравлювання відбувається за допомогою пасивуючого електроліту, що забезпечує максимальне вирівнювання поверхні:

$$\begin{cases} S_m = \eta v / p \rightarrow 10^{-5}; \\ U_p \rightarrow U_{xx}; \\ (E_c - E_a) \rightarrow \max. \end{cases} \quad (2)$$

Змінити значення критерію Зоммерфельда S_m можна за допомогою швидкості взаємного переміщення припрацьовуваних поверхонь v , тиску в контакті спряжених поверхонь p і зміною в'язкості електроліту η .

Технологічно на припрацювання і відновлення спряжень найлегше впливати за допомогою швидкості v і навантаження p , а відгуком процесу можна взяти електричну робочу напругу процесу U_p , що визначаються співвідношенням:

$$\begin{cases} U_p < U_{xx}; v \rightarrow \max; \\ U_p \approx U_{xx}; v = \text{const}; p \rightarrow n_n \cdot p, \end{cases} \quad (3)$$

де n_n – коефіцієнт підвищення навантаження.

Якщо робоча напруга процесу U_p змінного електричного струму нижче напруги холостого ходу U_{xx} , то швидкість взаємного переміщення робочих поверхонь деталей слід підвищити, для створення мінімальної розділової плівки електроліту, при якій ефективність протікання просів максимальна. Показано, що в разі підвищення робочої напруги U_p до значень близьких до напруги холостого ходу U_{xx} , доцільно забезпечити мінімальну роздільну плівку електроліту підвищенням навантаження p на трибоспряження деталей.

Протікання процесів припрацювання і відновлення поверхонь тертя спряжених деталей залежить від характеру їх експлуатації та умов тертя. Умови зовнішнього тертя

поверхонь спряжених деталей визначаються наявністю розділового мастильного матеріалу між ними [49]. Режим тертя можливо визначити за діаграмою Герси-Штрибека, тобто за числом Зоммерфельда $\eta \omega / p$ або характеристикою режиму тертя – $\eta n / p$, де η – динамічна в'язкість мастильного матеріалу, ω, n – кутова швидкість і частота обертання валу. З ростом числа Зоммерфельда тертя в спряженнях переходить від граничного до перехідного режиму, а потім до гідродинамічного [50]. Використовуючи формулу залежності коефіцієнта тертя від режимів тертя в спряженні можливо розглянути добуток коефіцієнта тертя f_{mp} на товщину розділового шару мастила h від умов тертя:

$$f_{mp}h = \eta v / p, \quad (4)$$

де v – швидкість переміщення поверхні тертя. Права частина цього виразу $\eta v / p$ є характеристикою режиму рідинного тертя. З цього випливає, що процес припрацювання і відновлення за однакових зовнішніх навантажень залежатиме від того, як розвивається площа плями контакту S_k в спряженні деталей. Вид спряження деталей в свою чергу впливає на зміну площі контакту S_k в процесі припрацювання. Крім цього на характер припрацьовуваності і відновлення, здійснює вплив величина триботехнічних характеристик контакту деталей, що істотно впливає на геометричні відхилення, які виникають в процесі виготовлення і ремонту деталей.

Висновки.

1. Дано порівняльний аналіз різних технологій припрацювання при формуванні ексцентриситетних спряжених поверхонь деталей вузлів, систем і агрегатів машин.
2. З'ясовані фактори, що впливають на інтенсивність зносу і знімання матеріалу та побудовано схему їх впливу на процеси тертя і зношування.
3. Виділені основні етапи припрацювання та відновлення поверхонь тертя спряжених деталей при використанні змінного електричного струму. При цьому на основі критерію Зоммерфельда дано характеристики процесів, що відбуваються і впливають на режим тертя у спряженнях деталей.
4. Розглянуто процеси, що беруть участь у формуванні робочих поверхонь при реалізації запропонованих триботехнологій припрацювання і відновлення. Визначено механізм формування рельєфу шорсткості поверхонь деталей. З'ясовано які процеси є активуючими, а які стримують розтравлювання.
5. Обґрунтовано сукупність факторів запропонованих триботехнологій припрацювання і відновлення, що дозволяють формувати зносостійкі поверхні. Розглянуто це на прикладі основних спряжень деталей гідроагрегатів, в яких використовуються бронза і сталь.
6. Виявлено, що в зазорі спряжень деталей газоутворення і екранізація мікропадін поверхні бульбашками газу зменшує їх розтравлюванню, що сприяє зниженню шорсткості поверхонь деталей, а отже підвищенню їх якості.
7. Показано, що механізм електрохімічного травлення з формуванням ексцентриситетності і застосуванні змінного електричного струму базується на фундаментальній електрохімічній теорії з наявністю пасивуючого електроліта.

Список літератури

1. Аулін В.В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04 / Хмельниц. нац. ун-т. Хмельницький, 2015. 360 с.

2. Замота Т.Н., Аулин В.В. Управление процессами приработки основных сопряжений деталей машин при изготовлении и ремонте: монография. Кировоград: Издатель Лысенко В.Ф., 2015. 304 с.
3. Трибофiзичнi основи пiдвищення надiйностi мобiльної сiльськогосподарської та автотранспортної технiки технологiями триботехнiчного вiдновлення: монографiя. / Аулін В.В. та iн. Кропивницький: Лисенко В. Ф., 2016. 303 с.
4. Повышение функциональной надежности гидропривода грузоподъемных устройств / Бекаев А. А. и др. *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*. 2014. №2 (20). С. 8-13.
5. Четощников В. И., Деев А. Г. Обоснование возможности уменьшения зазора в сопряжении поршень-цилиндр тракторного двигателя с воздушным охлаждением. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2010. №65 (3). С. 89-94.
6. Гасангусенов О. Г. Расчетно-экспериментальное исследование влияния температуры, нагрузки и скорости скольжения на долговечность сопряжения канавка поршня – поршневое кольцо малоразмерного дизеля. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. 2013. №1. С. 111-116.
7. Гусев А.С., Щербаков В.И., Стародубцева С.А., Гребенкина М.И. Расчет прочностной надежности и усталостной долговечности элементов конструкций мобильных машин, нагруженных случайными изгибающими и крутящими моментами. *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*. 2013. 1. №2 (16). С. 54-57.
8. Ибатуллин И. Д. Кинетический критерий повреждаемости и разрушения поверхностных слоев, деформируемых трением. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета)*. 2006. №2(2). С.204-209.
9. Надежкин А. В., Даничкин В. Н. Идентификация технического состояния крейцкопфного дизеля по данным трибомониторинга на основе имитационного моделирования. *Научные труды Дальрыбвтуза*. 2011. № 23. С. 89-97.
10. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е., Колодкин П.С. Влияние динамических свойств взаимодействующих подсистем на эволюцию формирования избирательного переноса в узлах трения. *Вестник Донского государственного технического университета*. 2019. №19 (2). С. 104-112.
11. Механические свойства сервоитных пленок, формирующихся при трении в водных растворах карбоновых кислот / Бурлакова В.Э., Дроган Е.Г., Тюрин А.И., Пирожкова Т.С. *Вестник Донского государственного технического университета*. 2018. № 18 (3). С. 280-288.
12. Почкайло К. А. Моделирование противоизносных свойств моторных масел в присутствии присадок. *Успехи в химии и химической технологии*. 2015. №29 (160). С. 89-91.
13. Траскин В. Ю., Скворцова З. Н. Оценка адгезионной прочности на разрыв и истирание по работе адгезии жидкости к твердому телу. *Вестник Московского университета. Серия 2. Химия*. 2004. № 45 (6). С. 376-381.
14. Щукин Е.Д. Влияние активной среды на механическую устойчивость и повреждаемость поверхности твердого тела. *Вестник Московского университета. Серия 2. Химия*. 2012. № 53 (1). С. 50-72.
15. Кузьменко А. Г., Диха О. В., Дослiдження зносоконтактної взаємодії змашених поверхонь тертя: Монографiя. Хмельницький: ХНУ, 2005. 183 с.
16. Кузьменко А.Г. Методи розрахункiв i випробувань на зношування та надiйнiсть: монографiя. Хмельницький: ТУП, 2002. 151 с.
17. Сорокатый Р.В. Метод трибоэлементов: монография. Хмельницкий: Изд-во ХНУ. 2013. 240 с.
18. Аулін В.В., Лисенко С.В., Гриньків А.В. Модель надiйностi деталей транспортних машин за процесами реалiзацiї триботехнологiй їх припрацювання i вiдновлення. *Центральнотуркранський науковий вiсник. Технiчнi науки : зб. наук. пр.* Кропивницький : ЦНТУ. 2019. Вип. 2 (33). С. 50-64.
19. Родимов Г. А., Папшев В. А. Обеспечение качества соединений путем фрикционного упрочнения поверхностей при сборке. *Труды Международного симпозиума "Надежность и качество"*. 2012. №2. С. 178-180.
20. Влияние физико-механических характеристик материала изделия на его износостойкость / Волков И.В., Дегтярева Ю.Ю., Лубенская Л.М., Николаенко А.П. *Вiсник двигунобудування*. 2006. №4. С. 126-130.
21. Прохоров В. Ю., Быков В. В. Пути повышения долговечности и износостойкости подшипника скольжения навесного технологического оборудования. *Труды Международного симпозиума "Надежность и качество"*. 2017. №1. С. 77-79.

22. Силаев Б.М. Решение задач о трении и изнашивании поверхностей на основе обобщенной модели контактного взаимодействия твердых тел. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. № 13 (4-3). С. 1235-1237.
23. Колесников И. В. Трибоэлектрические явления на фрикционном металлополимерном контакте и их зависимости от температуры. *Инженерный вестник Дона*. 2014. № 31 (4-1). С. 70-75.
24. Корнев В. М. Количественное описание эффекта ребиндера (хрупкие и квазихрупкие тела): от замедления разрушения до самопроизвольного диспегирования. *Физическая мезомеханика*. 2003. № 6 (3). С. 9-18.
25. Жорник В.И. Формирование композитного слоя триботехнического назначения электрохимическим хромированием и химической обработкой в водной оксидосодержащей суспензии. *Вестник Витебского государственного технологического университета*. 2014. № 26. С. 121-135.
26. Дроздовский Г. П., Юсенхан В. И. Обеспечение функциональной надежности элементов гидропривода оборудования лесных машин их тестовым диагностированием. *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2008. № 21. С. 200-206.
27. Аулін В.В., Чернай А.Є., Замота Т.М. Шляхи розв'язання проблеми підвищення ресурсу золотникового гідророзподільника мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки. *Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь*: III Всеукр. наук.- практ. конф. : тез. доп., 29-30 бер. 2017 р., Житомир. Житомир, 2017. С. 236-237.
28. Аулін В.В., Замота Т.М., Чернай А.Є. Підвищення довговічності золотникового гідророзподільника МСГТ та АТТ триботехнологіями припрацювання і відновлення. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів : науковий журнал*. 2017. № 8. С.121-127.
29. Величко С. А., Чумаков П. В., Коломейченко А. В. Оценка технического состояния силовых гидроцилиндров серии с навесных гидросистем тракторов. *Инженерные технологии и системы*. 2019. № 29 (3). С. 396-413.
30. Дмитриев В. А. Стратегии внедрения инновационных технологий механической обработки. *Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования*. 2015. №4 (9). С. 95-100.
31. Озерский А. И. Повышение эффективности гидросистем мобильных машин и оборудования, работающих в тяжёлых условиях эксплуатации. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2009. №3. С. 79-84.
32. Ковалев М. А. Упреждающее обслуживание гидросистем на основе анализа параметров частиц загрязнения рабочей жидкости. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета)*. 2009. №3(1). С. 89-96.
33. Кузьмінський Р. Д. Структура, параметри та ефективність технологічних процесів ремонту. *Вісник ЛДАУ: Агроінженерні дослідження*. Львів. 2005. №9. С.50-60.
34. Калимуллин Р. Ф., Коваленко С. Ю. Концепция ресурсосберегающей эксплуатации автомобильных двигателей. *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2013. № 2 (71). С. 29-34.
35. Чуфистов Е. А., Родайкин Н. В., Чуфистов О. Е. Конструкторско-технологическое повышение надежности подшипниковых узлов коленчатых валов среднеоборотных дизельных двигателей. *Известия высших учебных заведений, Поволжский регион. Технические науки*. 2009. № 2. С. 156-165.
36. Храпцов Н. В., Королев А. Е., Бай Р. Ф. Влияние конструкторско-технологических факторов на износостойкость автотракторных двигателей. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2013. №6(1). С. 127-131.
37. Корнилович, С. А. Повышение контактной выносливости поверхностного слоя зубьев шестерен при их изготовлении и ремонте. *Омский научный вестник*. 2012. №2 (110). С. 75-76.
38. Можливості технологій триботехнічного відновлення для підвищення зносостійкості і довговічності спряжень деталей транспортних засобів / Аулін В.В. та ін.. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті : наук. жур.* Луцьк : Луцький НТУ. 2018. №1(10). С. 5-11.
39. Aulin V., Lysenko S., Hryniv A., Velykodnyi D., Chernai A., Lukashuk A. Regularities of dynamics of change in tribotechnical characteristics of coatings formed by tribotechnologies of restoration. *Problems of tribology*. 2019. №1. P.73-80.
40. Aulin V., Lysenko S., Hryniv A. et al. Creation of theoretical bases of tribotechnologies of running-in and restoration as means of effective increase of operational wear resistance of motor transport and mobile agricultural machinery. *Problems of tribology*. 2021. № 1. С. 51-58.

41. Dykha A., Aulin V., Makovkin O., Lysenko S., Posonskiy S. Determining the characteristics of viscous friction in the sliding supports using the method of pendulum. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 3 (7-87). Pp. 4-10.
42. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах: монографія. Кіровоград: Вид. Лисенко В.Ф., 2014. 370 с.
43. Aulin V., Hrinkiv A., Dykha A. et al. Substantiation of diagnostic parameters for determining the technical condition of transmission assemblies in trucks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 2 (1-92). Pp. 4-13.
44. Замота Т. Н., Аулин В. В. Доводка торцевого уплотнения турбокомпрессора электрохимико-механическим способом. *Наука- образованию, производству, экономике: Материалы Восьмой международной научно-технической конференции*, г. Минск: Белорусский национальный технический университет, 2010. С.92-93.
45. Aulin V., Lysenko S., Lyashuk O., Hrinkiv A., Velykodnyi D., Vovk Y., Holub D., Chernai A. Wear resistance increase of samples tribomating in oil composite with geo modifier KgMf-1. *Tribology in Industry*. 2019. 41 (2). Pp. 156-165.
46. Кроитору Д. М., Гурьянов Г.В., Бобанова Ж.И., Ботошан Н.И. Технология восстановления и упрочнения цилиндров двигателей износостойкими покрытиями. *Электронная обработка материалов*. 2008. №6. С. 16–26.
47. Замота Т. Н., Аулин В. В. Исследование процессов выделения пузырьков газа в смазывающей среде при приработке и их влияние на изменение режима трения. *Проблемы трибологии*, ХНУ. 2011. №1. С.95-99.
48. Aulin V., Hryniv A., Lysenko S., Zamota T., Pankov A., Tykhyi A. Determining the rational composition of tribologically active additive to oil to improve characteristics of tribosystems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 6 (12-102). Pp. 52-64.
49. Моделирование параметров трения и износа цилиндропоршневой группы двигателя в реальном эксплуатационном цикле / Шабанов А. Ю., Зайцев А. Б., Метелев А. А., Пустовалов Ю. П. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Естественные и инженерные науки*. 2015. № 1 (214). С. 22-29.
50. Слободянюк Д. И., Колегаев М. А., Горюк А. А. Экспериментальные изотермы расклинивающего давления в пленках цилиндрического масла судового дизеля. *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2014. № 1 (23). 42-48.

References

1. Aulin, V.V. (2015). Trybofizychni osnovy pidvyshchennia znosostiikosti detalei ta robochych orhaniv silskohospodarskoi tekhniki [Tribophysical bases of increase of wear resistance of details and working bodies of agricultural machinery]. *Candidate's thesis*. Khmelnyts. nats. un-t. Khmelnytskyi [in Ukrainian].
2. Zamota, T.N. & Aulin, V.V. (2015). *Upravlenie processami prirabotki osnovnykh sopryazhenij detalej mashin pri izgotovlenii i remonte* [Management of the processes of running-in of the main interfaces of machine parts in the manufacture and repair]. Izdatel' Lysenko V.F. [in Russian].
3. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Kuzyk, O.V., Hryniv, A.V. & Holub, D.V. (2016). *Trybofizychni osnovy pidvyshchennia nadiinosti mobilnoi silskohospodarskoi ta avtotransportnoi tekhniki tekhnolohiiamy trybotekhnichnoho vidnovlennia* [Tribophysical bases of increase of reliability of mobile agricultural and motor transport technics by technologies of tribotechnical restoration]. Kropyvnytskyi: Lysenko V. F. [in Ukrainian].
4. Bekaev, A.A., Maksimov, Yu.V., Stokov, P.I., Musakova, T.V., Paponov, A.V. (2014). Povyshenie funktsionalnoy nadezhnosti gidroprivoda gruzopod'emnykh ustroystv [Improving the functional reliability of the hydraulic drive of load-lifting devices]. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI - Proceedings of the Moscow State Technical University MAMI*, 2 (20), 8-13 [in Russian].
5. Chetoshnikov, V.I. & Deev, A.G. (2010). Obosnovanie vozmozhnosti umensheniya zazora v sopryazhenii porshen-tsilindr traktornogo dvigatelya s vozdushnyim ohlazhdeniem [Substantiation of the possibility of reducing the gap in the piston-cylinder interface of an air-cooled tractor engine]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta - Bulletin of the Altai State Agrarian University*, 65 (3), 89-94 [in Russian].
6. Gasangusenov, O.G. (2013). Raschetno-eksperimentalnoe issledovanie vliyaniya temperatury, nagruzki i skorosti skolzheniya na dolgovechnost sopryazheniya kanavka porshnya – porshnevoe koltso malorazmernogo dizelya [Calculation and experimental study of the effect of temperature, load and sliding speed on the durability of the piston groove-piston ring coupling of a small diesel engine]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tehnologiya* -

- Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine equipment and technology, 1*, 111-116 [in Russian].
7. Gusev, A.S., Scherbakov, V.I., Starodubtseva, S.A. & Grebenkina, M.I. (2013). Raschet prochnostnoy nadezhnosti i ustalostnoy dolgovechnosti elementov konstruksiy mobilnykh mashin, nagruzhennykh sluchaynyimi izgibayushchimi i krutyaschimi momentami [Calculation of Strength Reliability and Fatigue Life of Structural Elements of Mobile Machines Loaded with Random Bending and Torque Moments]. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI - Bulletin of the Moscow State Technical University MAMI*, 1, 2 (16), 54-57 [in Russian].
 8. Ibatullin, I.D. (2006). Kineticheskiy kriteriy povrezhdaemosti i razrusheniya poverhnostnykh sloev, deformiruemyykh treniem [Kinetic criterion for damage and fracture of surface layers deformed by friction]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Korolyova - Bulletin of the Samara State Aerospace University. Academician S.P. Koroleva (natsionalnogo issledovatel'skogo universiteta)*, 2(2), 204-209 [in Russian].
 9. Nadezhkin, A.V. & Danichkin, V.N. (2011). Identifikatsiya tekhnicheskogo sostoyaniya kreytskopfnogo dizelya po dannym tribomonitoringa na osnove imitatsionnogo modelirovaniya [Identification of the technical condition of a crosshead diesel engine according to tribomonitoring data based on simulation]. *Nauchnyye trudy Dalrybvtuza - Scientific works of Dalrybvtuz*, 23, 89-97 [in Russian].
 10. Zakovorotnyy, V.L., Gvindzhiliya, V.E. & Kolodkin, P.S. (2019). Vliyanie dinamicheskikh svoystv vzaimodeystviyushchikh podsistem na evolyutsiyu formirovaniya izbiratel'nogo perenosa v uzlah treniya [Influence of dynamic properties of interacting subsystems on the evolution of formation of selective transfer in friction units]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta - Bulletin of the Don State Technical University*, 19 (2), 104-112 [in Russian].
 11. Burlakova, V.E., Drozan, E.G., Tyurin, A.I. & Pirozhkova, T.S. (2018). Mehanicheskie svoystva servovitnykh plenok, formiruyushchiesya pri trenii v vodnykh rastvorakh karbonovykh kislot [Mechanical properties of servovite films formed during friction in aqueous solutions of carboxylic acids]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta - Bulletin of the Don State Technical University*, 18 (3), 280-288 [in Russian].
 12. Pochkaylo, K.A. (2015). Modelirovanie protivoznosnykh svoystv motornykh masel v prisutstvii prisadok [Modeling of anti-wear properties of motor oils in the presence of additives]. *Uspehi v himii i himicheskoy tekhnologii - Advances in Chemistry and Chemical Technology*, 29 (160), 89-91 [in Russian].
 13. Traskin, V.Yu. & Skvortsova, Z.N. (2004). Otsenka adgezionnoy prochnosti na razryv i istiranie po rabote adgezii zhidkosti k tverdomu telu [Estimation of adhesive tensile strength and abrasion according to the work of adhesion of a liquid to a solid body]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2. Himiya - Bulletin of Moscow University. Series 2. Chemistry*, 45 (6), 376-381 [in Russian].
 14. Schukin, E.D. (2012). Vliyanie aktivnoy sredy na mekhanicheskuyu ustoychivost i povrezhdaemost poverhnosti tverdogo tela [Influence of the active medium on the mechanical stability and damage of the surface of a solid body]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2. Himiya - Bulletin of Moscow University. Series 2. Chemistry*, 53 (1), 50-72 [in Russian].
 15. Kuzmenko, A.H. & Dykha, O.V. (2005). *Doslidzhennia znosokontaktnoi vzaємodii zmashchenykh poverkhon tertia: Monohrafiya* [Investigation of wear-contact interaction of lubricated friction surfaces: Monograph]. Khmelnytskyi: KhNU [in Ukrainian].
 16. Kuzmenko, A.H. (2002). *Metody rozrakhunkiv i vyprobuvan na znoshuvannia ta nadiinist. [Methods of calculations and tests for wear and reliability]*. Khmelnytskyi: TUP [in Ukrainian].
 17. Sorokatyiy, R.V. (2013). *Metod triboelementov [Method of triboelements]*. Hmelnytskyi: Izd-vo HNU [in Russian].
 18. Aulin, V.V., Lysenko, S.V. & Hryniv, A.V. (2019). Model nadiinosti detalei transportnykh mashyn za protsesamy realizatsii trybotekhnolohii yikh prypratsiuvannia i vidnovlennia [Model of reliability of details of transport cars on processes of realization of tribotechnologies of their running in and restoration]. *Tsentralkoukrainskyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky: zb. nauk. pr. - Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical sciences: coll. Science*. Kropyvnytskyi: TsNTU, Vol. 2 (33), 50-64 [in Ukrainian].
 19. Rodimov, G.A. & Papshev, V.A. (2012). Obespechenie kachestva soedineniy putem friksionnogo uprochneniya poverhnostey pri sborke [Ensuring the quality of joints by friction hardening of surfaces during assembly]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost i kachestvo" - Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*, 2, 178-180 [in Russian].
 20. Volkov, I.V., Degtyareva, Yu.Yu., Lubenskaya, L.M. & Nikolaenko, A.P. (2006). Vliyanie fiziko-mekhanicheskikh harakteristik materiala izdeliya na ego iznosostoykost [Influence of physical and mechanical characteristics of the product material on its wear resistance]. *Visnik dvigunobuduvannya - Bulletin of movement industry*, 4, 126-130 [in Russian].

21. Prohorov, V.Yu. & Byikov, V.V. (2017). Puti povysheniya dolgovechnosti i iznosostoykosti podshipnika skolzheniya navesnogo tehnologicheskogo oborudovaniya [Ways to improve the durability and wear resistance of the sliding bearing of mounted technological equipment]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost i kachestvo" - Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality", 1*, 77-79 [in Russian].
22. Silaev, B.M. (2011). Reshenie zadach o trenii i iznashivani poverhnostey na osnove obobschennoy modeli kontaktnogo vzaimodeystviya tverdykh tel [Solving problems of friction and wear of surfaces based on a generalized model of contact interaction of solids]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk - Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 13 (4-3), 1235-1237 [in Russian].
23. Kolesnikov, I.V. (2014). Triboelektricheskie yavleniya na friktsionnom metalopolimernom kontakte i ih zavisimosti ot temperatury [Trieoelectric Phenomena on a Friction Metal-Polymer Contact and Their Dependence on Temperature]. *Inzhenernyi vestnik Dona - Engineering bulletin of the Don*, 31 (4-1), 70-75 [in Russian].
24. Kornev, V.M. (2003). Kolichestvennoe opisanie effekta rebintera (hrupkie i kvazihrupkie tela): ot zamedleniya razrusheniya do samoproizvolnogo dispegirovaniya [Quantitative description of the rebinder effect (brittle and quasi-brittle bodies): from fracture retardation to spontaneous dispersion]. *Fizicheskaya mezomehanika - Physical mesomechanics*, 6 (3), 9-18 [in Russian].
25. Zhornik, V.I. (2014). Formirovanie kompozitnogo sloya tribotekhnicheskogo naznacheniya elektrohimicheskimi hromirovaniem i himicheskoy obrabotkoy v vodnoy oksidosoderzhaschey suspensii [Formation of a composite layer for tribotechnical purposes by electrochemical chromium plating and chemical treatment in an aqueous oxide-containing suspension]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta - Bulletin of the vitebsk state technological university*, 26, 121-135 [in Russian].
26. Drozdovskiy, G.P. & Yusenhan, V.I. (2008). Obespechenie funktsionalnoy nadezhnosti elementov gidroprivoda oborudovaniya lesnykh mashin ih testovym diagnostirovaniem [Ensuring the functional reliability of the elements of the hydraulic drive of the equipment of forest machines by their test diagnostics]. *Aktualnye problemy lesnogo kompleksa - Actual problems of the forest complex*, 21, 200-206 [in Russian].
27. Aulin, V.V., Chernai, A.Ie. & Zamota, T.M. (2017). Shliakhy rozv'iazannia problemy pidvyshchennia resursu zolotnykovoho hidrozpodilnyka mobilnoi silskohospodarskoi ta avtotransportnoi tekhniki [Ways to solve the problem of increasing the life of the spool hydraulic distributor of mobile agricultural and motor vehicles]. Prospects and trends in the development of structures and technical service of agricultural machinery and implements: *III Vseukr. nauk.- prakt. konf. : (29-30 ber. 2017 r.) – 3d All-Ukrainian Scientific and Practical Conference* (pp. 236-237). Zhytomyr [in Ukrainian].
28. Aulin, V.V., Zamota, T.M. & Chernai, A.Ie. (2017). Pidvyshchennia dohovichnosti zolotnykovoho hidrozpodilnyka MSHT ta ATT trybotekhnolohiiamy prypratsiuvannya i vidnovlennia [Increasing the durability of the spool hydrodistributor MSGT and ATT tribotechnologies running-in and recovery]. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv: naukovyi zhurnal - Technical service of agro-industrial, forest and transport complexes: scientific journal*, 8, 121-127 [in Ukrainian].
29. Velichko, S.A., Chumakov, P.V. & Kolomeychenko, A.V. (2019). Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya silovykh gidrotsilindrov serii s navesnykh gidrosistem traktorov [Assessment of the technical condition of power hydraulic cylinders of a series with mounted hydraulic systems of tractors]. *Inzhenernyie tehnologii i sistemy - Engineering technologies and systems*, 29 (3), 396-413 [in Russian].
30. Dmitriev, V.A. (2015). Strategii vnedreniya innovatsionnykh tekhnologiy mekhanicheskoy obrabotki - Strategies for the implementation of innovative machining technologies. *Innovatsionnaya ekonomika: perspektivy razvitiya i sovershenstvovaniya - Innovative economy: prospects for development and improvement*, 4 (9), 95-100 [in Russian].
31. Ozerskiy, A.I. (2009). Povyshenie effektivnosti gidrosistem mobilnykh mashin i oborudovaniya, rabotayushchikh v tyazholykh usloviyakh ekspluatatsii [Improving the efficiency of hydraulic systems of mobile machines and equipment operating in difficult operating conditions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki - News of higher educational institutions. North Caucasian region. Technical Sciences*, 3, 79-84 [in Russian].
32. Kovalev, M.A. (2009). Uprezhdayuschee obsluzhivanie gidrosistem na osnove analiza parametrov chastits zagryazneniya rabochey zhidkosti [Predictive maintenance of hydraulic systems based on the analysis of the parameters of particles of contamination of the working fluid]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Korolyova (natsionalnogo issledovatel'skogo universiteta) - Bulletin of the Samara State Aerospace University. Academician S.P. Koroleva (National*

- Research University), 3(1), 89-96 [in Russian].
33. Kuzminskyi, R.D. (2005). Struktura, parametry ta efektyvnist tekhnologichnykh protsesiv remontu [Structure, parameters and efficiency of technological processes of repair]. *Visnyk LDAU: Ahroinzhenerni doslidzhennia - Bulletin of LSAU: Agroengineering research*, 9, 50-60 [in Ukrainian].
 34. Kalimullin, R.F. & Kovalenko, S.Yu. (2013). Kontseptsiya resursoberegayushey ekspluatatsii avtomobilnykh dvigateley [The concept of resource-saving operation of automobile engines]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta - Bulletin of the saratov state technical university*, 2 (71), 29-34 [in Russian].
 35. Chufistov, E.A., Rodaykin, N.V. & Chufistov, O.E. (2009). Konstruktorsko-tehnologicheskoe povyshenie nadezhnosti podshipnikovyykh uzlov kolenchatykh valov sredneoborotnykh dizelnykh dvigateley [Design and technological improvement of the reliability of bearing assemblies of crankshafts of medium-speed diesel engines]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy, Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki - News of higher educational institutions, Volga region. Technical Sciences*, 2, 156-165 [in Russian].
 36. Hramtsov, N.V., Korolev, A.E. & Bay, R.F. (2013). Vliyanie konstruktorsko-tehnologicheskikh faktorov na iznosostoykost avtotraktornykh dvigateley [Influence of design and technological factors on the wear resistance of autotractor engines]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki - News of the Tula State University. Technical Sciences*, 6(1), 127-131 [in Russian].
 37. Kornilovich, S.A. (2012). Povyshenie kontaktnoy vyinoslivosti poverhnostnogo sloya zubev shesteren pri ih izgotovlenii i remonte [Increasing the contact endurance of the surface layer of gear teeth during their manufacture and repair]. *Omskiy nauchnyy vestnik - Omsk scientific bulletin*, 2 (110), 75-76 [in Russian].
 38. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Hrynkiv, A.V. et al. (2018). Mozhlyvosti tekhnologii trybotechnichnoho vidnovlennia dlia pidvyshchennia znosostiosti i dovhovichnosti spriazhen detalei transportnykh zasobiv [Possibilities of tribotechnical restoration technologies for increase of wear resistance and durability of couplings of details of vehicles]. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni ta transporti: nauk. zhur. Lutsk - Modern technologies in mechanical engineering and transport: science. jury Lutsk*, 1(10), 5-11 [in Ukrainian].
 39. Aulin, V., Lysenko, S., Hrynkiv, A., Velykodnyi, D., Chernai, A. & Lukashuk, A. (2019). Regularities of dynamics of change in tribotechnical characteristics of coatings formed by tribotechnologies of restoration. *Problems of tribology*, 1, P.73-80 [in English].
 40. Aulin, V., Lysenko, S., Hrynkiv, A. et al. (2021). Creation of theoretical bases of tribotechnologies of running-in and restoration as means of effective increase of operational wear resistance of motor transport and mobile agricultural machinery. *Problems of tribology*, 1, 51-58 [in English].
 41. Dykha, A., Aulin, V., Makovkin, O., Lysenko & S., Posonskiy, S. (2017). Determining the characteristics of viscous friction in the sliding supports using the method of pendulum. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7-87), pp. 4-10 [in English].
 42. Aulin, V.V. (2014). *Fizychni osnovy protsesiv i staniv samoorhanizatsii v trybotechnichnykh systemakh: monohrafiia [Physical bases of processes and states of self-organization in tribotechnical systems: monograph]*. Kirovohrad: Vyd. Lysenko V.F. [in Ukrainian].
 43. Aulin, V., Hrinkiv, A., Dykha, A. et al. (2018). Substantiation of diagnostic parameters for determining the technical condition of transmission assemblies in trucks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(1-92), pp. 4-13 [in English].
 44. Zamota, T.N. & Aulin, V.V. (2010). Dovodka tortseвого uplotneniya turbokompressora elektrohimiemo-mekhanicheskim sposobom [Fine-tuning of the mechanical seal of a turbocharger by an electrochemical-mechanical method]. Science - education, production, economics: *Vosma mezhdunarodna nauchno-tehnicheskha konferentsiia – 8 th Eighth International Scientific and Technical Conference (pp.92-93)*. Minsk: Belorusskiy natsionalnyy tekhnicheskiiy universitet [in Russian].
 45. Aulin, V., Lysenko, S., Lyashuk, O., Hrinkiv, A., Velykodnyi, D., Vovk, Y., Holub, D. & Chernai, A. (2019). Wear resistance increase of samples tribomating in oil composite with geo modifier KgMf-1. *Tribology in Industry*, 41(2), pp. 156-165 [in English].
 46. Kroitoru, D.M., Guryanov, G.V., Bobanova, Zh.I. & Botoshan, N.I. (2008). Tehnologiya vosstanovleniya i uprochneniya tsilindrov dvigateley iznosostoykimi pokrytiyami [Technology of restoration and hardening of engine cylinders with wear-resistant coatings]. *Elektronnaya obrabotka materialov - Electronic processing of materials*, 6, 16 [in Russian].
 47. Zamota, T.N. & Aulin, V.V. (2011). Issledovanie protsessov vyideleniya puzyrkov gaza v smazyivayushey srede pri prirabotke i ih vliyanie na izmenenie rezhima treniya [Investigation of the processes of release of gas bubbles in a lubricating medium during running-in and their influence on the change in the friction mode]. *Problemi tribologiyi - Problems of tribology*, 1, 95-99 [in Russian].
 48. Aulin, V., Hrynkiv, A., Lysenko, S., Zamota, T., Pankov, A. & Tykhyi, A. (2019). Determining the

- rational composition of tribologically active additive to oil to improve characteristics of tribosystems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(12-102), pp. 52-64 [in English].
49. Shabanov, A.Yu., Zaytsev, A.B., Metelev, A.A. & Pustovalov, Yu.P. (2015). Modelirovanie parametrov treniya i iznosa tsilindroporshnevoy gruppyi dvigatelya v realnom ekspluatatsionnom tsikle [Simulation of friction and wear parameters of the engine cylinder-piston group in a real operating cycle.]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennyie i inzhenernyie nauki - Scientific and technical statements of SPbPU. Natural and Engineering Sciences*, 1 (214), 22-29 [in Russian].
50. Slobodyanyuk, D.I., Kolegaev, M.A. & Goryuk, A.A. (2014). Eksperimentalnyie izotermyi rasklinivayushchego davleniya v plenkah tsilindrovogo masla sudovogo dizelya [Experimental isotherms of disjoining pressure in marine diesel cylinder oil films]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S.O. Makarova - Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet. Admiral S.O. Makarova*, 1 (23), 42-48 [in Russian].

Andrii Chernai, Post-graduate

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Formation of Equidistant Working surfaces of Precision Conjugations of Machine parts

The purpose of this work is to clarify the essence of the method of forming equidistant working surfaces of parts when applying an alternating electric current and using electrolytes.

It is shown that the processes of tribotechnologies of running-in and recovery with the application of alternating current and the formation of equidistant conjugate surfaces are the most effective in comparison with other methods. The main factors are highlighted and their characteristics are given. The stages of running in and restoration of friction surfaces using alternating electric current are considered. The essence of the method of applying alternating current on conjugate parts of machines and obtaining equidistant working surfaces is clarified. Significant improvement of tribotechnical characteristics of friction surfaces, their formation under the action of electrochemical and mechanical components is revealed. Possibility of running-in of the main couplings of details of hydraulic units, use of the developed tribotechnologies of running-in and restoration on the basis of laws of electrochemical-mechanical processes is shown. The action of the electrolyte as a liquid adsorbent during adsorption on friction surfaces has been elucidated. One of these adsorbents used oleic acid. It is shown that the best result can be achieved by the electrochemical reaction of etching the surfaces of conjugate parts and their mechanical activation. The proposed technologies use an operating voltage not exceeding 5 V AC, and a current density of 10^4 A/m². Surface erosion occurs with the frequency of anodic polarization. Electrochemical etching during running-in is based on Faraday's laws. Realization of the specified draining occurs by means of the passivating electrolyte providing the maximum alignment (equidistance) of surfaces by influence of relative speed of movement and loading.

It is noted that the developed technologies depend on the nature of operation and modes of friction of the joints of components, systems and units of machines.

precision parts, equidistant surfaces, conjugation of parts, alternating electric current, electrochemical and mechanical processes, running-in

Одержано (Received) 11.02.2022

Прорецензовано (Reviewed) 21.02.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

УДК 631.3.631.31.021:62-192 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.40-47](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.40-47)

М.І. Денисенко, доц., канд. техн. наук

ВСП «Немішаївський фаховий коледж НУБіП України», смт Немішаєве, Бучанський район, Київська область

e-mail: mdenisenko317@gmail.com

Підвищення технічного ресурсу і довговічності робочих органів ґрунтообробних сільськогосподарських машин

Робочі органи ґрунтообробних сільськогосподарських машин (леміш, полиця плугу, лапа культиватора, диск борони) працюють в умовах абразивного спрацювання, ударних навантажень та впливу зовнішнього агресивного середовища. Їх ремонт полягає у відновленні вихідних розмірів деталей та зносостійкості функціональних робочих поверхонь. В процесі експлуатації ґрунтообробних машин і агрегатів робочі поверхні зазнають нерівномірного зношування, що зменшує ресурс деталей та збільшує витрати на їх заміну і відновлення.

леміш плугу, поверхня тертя, абразивне спрацювання, експлуатаційна довговічність, точкове зварення

Постановка проблеми. На думку засновника землеробської механіки академіка В.П.Горячкіна, оранка, як найбільш розповсюджена енерговитратна технологічна операція обробки ґрунту, є найбільш тривалою та дорого вартісною. На її виконання витрачається до 40% енергетичних і 25% трудових витрат [1].

Як показують статистичні дослідження, леміш плугу в середньому підлягає заміні після 20 га обробленого ґрунту (ця цифра може бути різною, в залежності від типу ґрунту) відновлення зносостійкими покриттями дозволяє експлуатувати леміш більше 100 га. Відповідно до технічних умов гарантійне напрацювання лапи культиватора повинна бути не менше 25 га. Але, як показує практика експлуатації таких деталей, їх наробіток на відмову на різних ґрунтах не перевищує 14-19 га [2].

В процесі експлуатації ґрунтообробних сільськогосподарських машин і комбінованих агрегатів поверхні тертя їх робочих органів зазнають нерівномірного абразивного зношування, що призводить до зменшення ресурсу деталей та зростання витрат на їх заміну і відновлення, так наприклад середній наробіток на відмову долотоподібних лемешів складає від 5 до 20 га, грудин полиць – від 10 до 100 га, польових дощок – від 20 до 60 га, а лап культиваторів – від 7 до 18 га [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підвищення довговічності та зменшення металоємності робочих органів ґрунтообробних машин в останні роки постає особливо актуальними. Дослідження показують, що інтенсивність спрацювання робочих органів настільки велика, що в окремих випадках необхідність в ремонті виникає через 2-3 години роботи лемеша плугу або лапи культиватора.

При обробці твердих ґрунтів з каменистими домішками спостерігається значна деформація ріжучої кромки і втомні вищербини. Працездатність ґрунтообробних машин визначається доремонтним ресурсом робочих органів, тому його підвищення дуже актуально. В результаті інтенсивного абразивного спрацювання змінюються

геометрія ріжучої кромки і леза, та загальні розміри робочих органів, що є причиною порушення агротехнічних вимог, зниження якості обробки ґрунту, суттєве підвищення енерговитрат.

За даними досліджень [4] при зношуванні леза плужного лемеша до 5-7 мм по товщині, нерівномірність глибини ходу досягає 62-68%, тяговий опір зростає до 153-156%, витрати палива зростають до 125-138%, а продуктивність агрегатів зменшується до 52-59%. У більшості випадків робочі органи, втративши в результаті зношування вихідну форму, працюють значну частину терміну служби з такими показниками: неякісним заглибленням і підрізанням кореневої системи рослин, зростанням тягового опору. Лапи культиватору під час роботи затуплюються і зменшуються по ширині захвату. Як відомо, для виготовлення змінних деталей (лемешів плугів, лап культиваторів, дисків борін) робочих органів використовуються конструкційні сталі 40, 40Х, Л53, 65Г та традиційні методи термічної обробки (гартування і відпускання), при цьому твердість поверхні тертя складає 39-48 HRC_e, показник міцності не перевищує 900 – 1000 МПа. Леміш плугу ремонтують тоді, коли ширина його зменшується на 10 мм у порівнянні з шириною нової деталі або коли довжина носка лемеша зменшується на 25 мм у порівнянні з довжиною носка нової деталі.

Але, як свідчить практика, така термообробка не дає суттєвого ефекту і не виключає прямого пошкодження їх ріжучої частини шляхом шкрябання і різання частинками кварцу. Інтенсивність спрацювання таких деталей досягає 0,3 мм/км [5]. Були проведені масштабні дослідження та здійснено серійне впровадження технологій індукційного наплавлення твердими сплавами «сормайт» деталей робочих органів ґрунтообробних машин [5,6] на підприємствах сільськогосподарського машинобудування України. Але такий спосіб зміцнення не дозволяє отримати ефект самозагострювання леза робочого органу від великої різноманітності ґрунтів, і, як наслідок, суттєве підвищення тягового опору агрегатів і паливно-мастильних матеріалів.

Постановка завдання. Таким чином, метою роботи є підвищення технічного ресурсу і довговічності деталей та робочих органів ґрунтообробних машин шляхом використання та вдосконалення дугового точкового зварення (ДТЗ) порошковим самозахисним дротом – плавким електродом ПП-АН170 (ПП-АН170М) відкритою дугою.

Виклад основного матеріалу. Підвищення довговічності деталей і робочих органів машин є складним завданням, наукові основи якого розроблені не достатньо аргументовано і дуже слабкі, ніж основи забезпечення поверхневої міцності. Аналіз завдань в царині підвищення зносостійкості деталей і робочих органів машин переконує у недостатності рішень, заснованих тільки на виборі матеріалів з підвищеною зносостійкістю: таким чи іншим методом можливо лише зменшити швидкість зношування, але не керувати самими процесами тертя і спрацювання і, що особливо важливо, тими змінами технічного стану і працездатності деталей, котрі визиваються зносом поверхонь тертя.

Проблема підвищення зносостійкості лемеша плугу, лапи культиватора, дисків борін поєднана зі специфічними умовами їх технічної експлуатації та деякими порушенням технологічного процесу при виготовленні, котрі призводять до надвеликих масштабів випуску названих деталей (млн. штук) та малому технічному ресурсу (8-12 га в посушливих південних районах України лемеші плугів, лапи культиваторів і диски борін треба ремонтувати або замінювати щозміни [3,5].

Одним з резервів збільшення технічного ресурсу і довговічності даних деталей сільськогосподарської техніки треба вважати різноманітні методи їх зміцнення на

стадіях як виробництва, так і експлуатації при відновленні. Для ремонту найбільш перспективно використання дугового точкового(крапкового) зварення (ДТЗ) плавким електродом – порошковим дротом. Вказаний метод зміцнення розроблено науковцями Інституту електрозварювання імені Є.О.Патона НАН України [8], і відомий при виготовленні зварних конструкцій, але ще не отримав широкого використання.

Випробуванню підлягали наступні робочі органи машин:

- лемеші вальцовані з носком, зміцненим по методу фірми «РАБА»Угорщина (ПНЧС-702Р),
- лемеші вальцовані з намороженим носком по методу фірми «Рабаверк», Німеччина (ПНЧС-702ВН),
- лемеші ПНЧС-702У з точковим (крапковим) зміцненням лезу і носка
- вальцьовані з намороженим носком і точковим (крапковим) зміцненням леза (ПНЧС-702ВУН).

Оранка здійснювалася на глибину 25 – 27 см після збирання зернових культур. Критеріями граничного стану – це затуплення леза лемеша, або їх поламка та згин носка. В процесі проведення випробувань регулярно здійснювалися вимірювання параметрів робочих органів, що визначають їх знос. Всі робочі органи пройшли первинну технічну експертизу, промарковані, після закінчення випробувань проведена підсумкова технічна експертиза. Вдосконалений спосіб ДТЗ (крапкового зміцнення) дозволяє зменшити витрати на виготовлення робочих органів за рахунок суміщення операцій отримання заглиблень в основному металі та зміцнення дільниць твердим сплавом (рис.1, 3), а зносостійкість досягаємо за рахунок виконання наплавлених дільниць зі зменшеним перерізом по товщині деталі і часткового суміщення між собою крапок зміцнення. Наплавлення порошковими дротами можливо виконувати під флюсом, у захисному газі або відкритою дугою. Суть дугового крапкового процесу полягає у наступному: під впливом електричної дуги відбувається вкраплення твердого сплаву (порошковий дріт) на певну глибину і по відповідній експоненті.

Геометрична форма крапки зміцнення сприяє швидкому відведенні теплоти від наплавочної ванни в основний метал і зовнішнє середовище, тому крапки застигають з великою швидкістю і за короткий час. При ДТЗ особливого значення набуває визначення моменту дійсного збудження дуги. Пояснюється це тим, що при зваренні плавким електродом, дуга не завжди починає горіти з першого дотику, і це чинить суттєвий вплив на розміри крапок шва. На рис.1 показана схема поперечного розрізу крапки зміцнення (геометрія крапки зміцнення), яка може мати форму сферичного сектору або шарового сегменту.

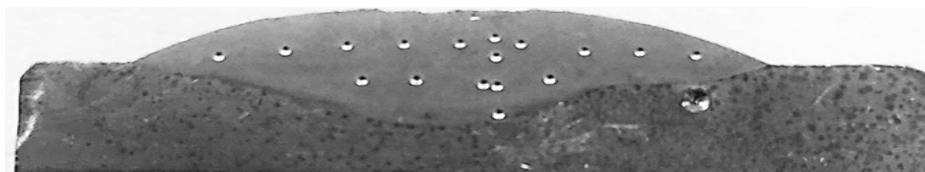


Рисунок 1 – Геометрія крапки зміцнення

Джерело: розроблено автором

Вилучити такий вплив вдалося завдяки створенню електронного обладнання, що забезпечує фіксацію дійсного моменту збудження дуги. Наплавлені крапки виконують також частково суміщеними між собою на величину до 1/5 діаметрів їх основ, що забезпечує спрацювання основного металу від заданої сторони і за рахунок цього утворення процесу самозагострювання і, відповідно, зниження зносу [8].

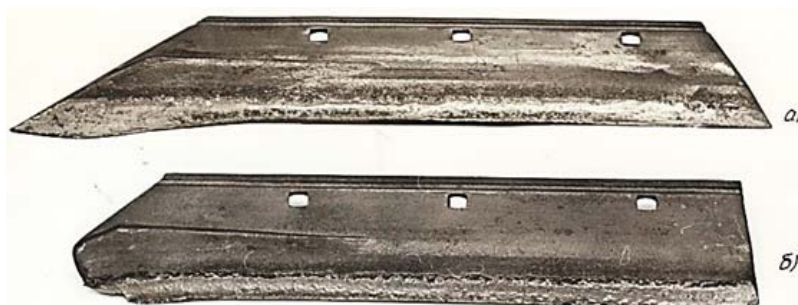
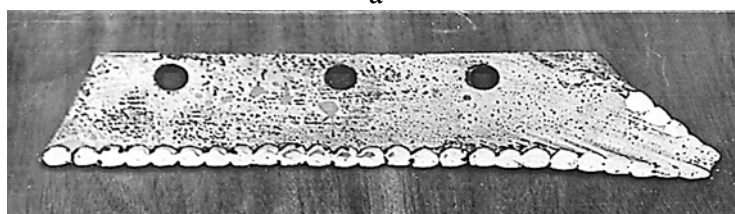


Рисунок 2 – Леміш ПНЧС01-702У серійний, наробіток 29,2 га

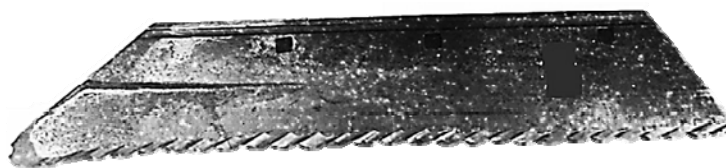
Джерело: розроблено автором



а



б



в

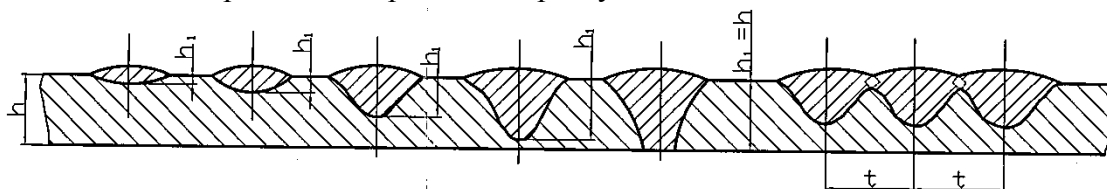
а) –точкове, крапкове зміцнення; б, в. – поверхня лемеша після наробітку 49,1 га

Рисунок 3 – Вихідна поверхня

Джерело: розроблено автором

На рисунку 2 зображено леміш серійний, зміцнений сплавом ПГ-С27: а) новий леміш, б) леміш після наробітку 29,2 га.

Дуже помітно, що утворюється пилкоподібний профіль, ефект самозагострювання на лемешах з крапковим зміцненням (рис.3 б,в), який зберігається протягом усього терміну експлуатації, забезпечуючи ефективне різання навіть при спрацьованих лезах. Оптимальну висоту крапки зміцнення вибираємо в залежності від функціонального призначення робочого органу машин.



h – товщина основного металу, h_1 – глибина проплавлення при дуговому крапковому наплавленні,
 t – крок проставлення крапок

Рисунок 4 – Можливі профілі крапки зміцнення при ДТЗ

Джерело: розроблено автором

Основні параметри точкового (крапкового) зміцнення відпрацьовані та уніфіковані для деталей і робочих органів ґрунтообробної техніки (рис.4): лемешів плугів зі сталі Л53, 65Г, польових дощок, доліт культиваторів зі сталі 45, лап і ножів культиваторів, грудин відвалів. Для наплавлення використовували самозахисний дріт марки ПП-Нп80Х20РЗТ С 2,0 3,2 (ПП-АН170), після зміцнення твердість 60-65 HRC_e; ПП-Нп150Х15РЗТ2 С 2,2 3,2 (ПП-АН170М), твердість 50-58 HRC_e.

Для деталей, що працюють в умовах абразивного зношування рекомендується наплавлений матеріал наступного складу: С 2,25-4,5%; Si 0,2-0,4%; Mn 0,50-6,0%; Cr 24,0-35,0% з твердістю від 48 до 60 HRC, і використовується для зміцнення деталей сільськогосподарської техніки. Найбільш широке використання у промисловості знаходять електроди системи легування вуглець-хром-бор, що забезпечує утворення у структурі наплавленого покриття значну кількість зміцнюючої фази, що містить бор у карбідах або борідах.

Карбіди можуть бути первинними або вторинними, а також утворювати різноманітні карбідні (борідні) евтектики [9]. Розташування карбідів і форма їх утворень впливають на властивості матеріалів: їх твердість, зносостійкість, ударостійкість. (рис.5)

Суттєвий вплив на зносостійкість наплавленого металу чинить структурний стан його матриці. Дослідження та досвід показує, що кращі результати при інтенсивному абразивному зношуванні забезпечує мартенситно-аустенітна матриця.

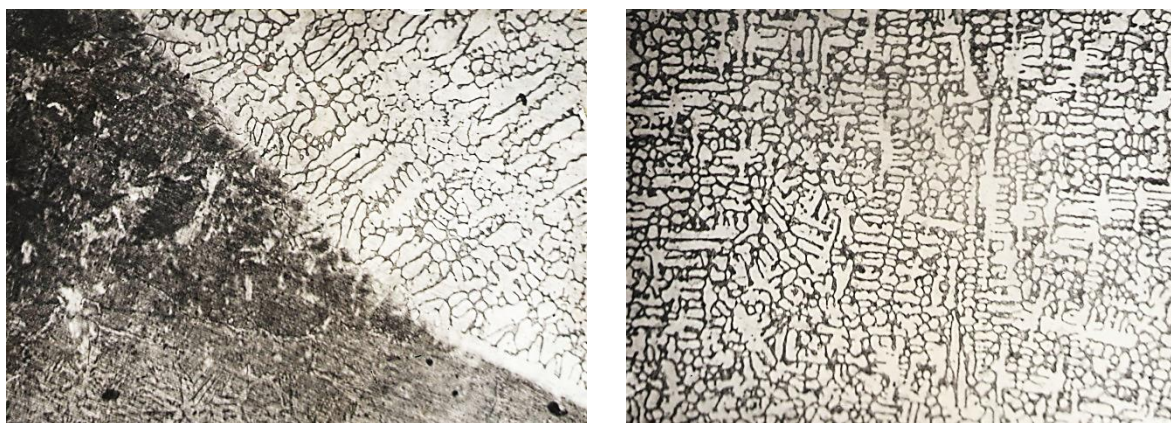
*a**б*

Рисунок 5 – Мікроструктура перехідної зони (а) і крапкового покриття (б), зміцненого порошковим дротом ПП-АН170 на сталі Л53:х100

Джерело: розроблено автором

Мікроструктура металу шва складається з карбідів, борідної евтектики і мартенсита (рис.5 а, б). В зоні термічного впливу структура феритно - перліто-бейнітна. Метал дільниці неповної перекристалізації складається з фериту і розрихленого перліту. Борида розподілені по границям кристалізаційних дільниць.

Основний метал має (рис.6.) ферито-перлітно-бейнітну структуру з різною величиною зерна. В основному металі і в зоні термічного впливу багато сульфідних включень. У зразку на лінії сплавлення спостерігається перемішування металу покриття з основним металом. Твердість наплавленого покриття висока, суттєве підвищення твердості спостерігається поблизу лінії сплавлення. На лінії сплавлення не утворюється кристалізаційних прошарків, а бачимо плавний перехід від металу наплавлення до основного металу. В основному металі присутнє велика кількість рядкових сульфідів.

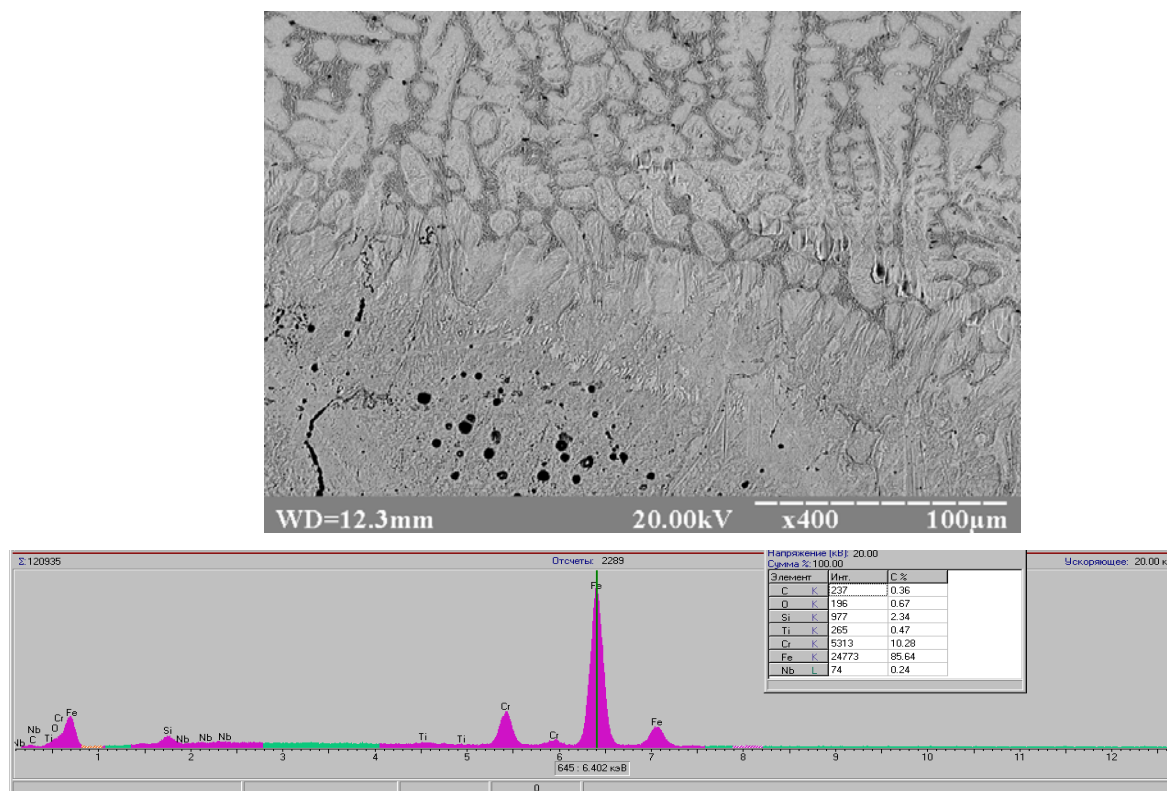


Рисунок 6 – Електронна фотографія та будова поверхневого шару точкового покриття на сталі 65Г (порошковий дріт ПП-АН170)

Джерело: розроблено автором

Висновки. Точкове зміцнення порошковим дротом плавким електродом ПП-АН170 (ПП-АН170М) робочих органів ґрунтообробних машин у порівнянні з індукційним наплавленням твердим сплавом ПГ-С27 та іншими технологіями зміцнення підвищує їх технічний ресурс і довговічність у 2-3 рази.

Точкове зміцнення можливо здійснювати як в невеличких майстернях сільськогосподарських підприємств, а також у польових умовах за наявності джерела живлення.

Дугове точкове зварення порошковим дротом, (FCAW) дозволяє здійснювати наплавлення на деталях різної геометрії, має високу продуктивність, можливе використання у польових умовах, завдяки проведенню зварювання відкритою дугою; при зварюванні самозахисними дротами не треба використовувати захисні гази.

Вдосконалено технологію дугового точкового зварювання (ДТЗ), що дозволяє зменшити на порядок витрати електроенергії за рахунок зменшення тривалості зміцнення поверхні тертя робочого органу.

Список літератури

1. Бобрицький В.М. Підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.02.04. Київ, 2007. 20 с.
2. Аулін В.В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.02.04. Хмельницький, 2015. 36 с.
3. Новиков В.С. Обеспечение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.20.03. Москва, 2008. 39 с.
4. Износ и коррозия сельскохозяйственных машин / М.М. Севернев, Н.Н. Подлекарёв, В.Ш. Сохадзе, В.О. Китиков. Минск: Белорус. Навук, 2011. 333 с.

5. Ткачев В.Н. Работоспособность деталей машин в условиях абразивного изнашивания . М.: Машиностроение, 1995. 336 с.
6. Денисенко М.І., Рубльов В.І. Підвищення довговічності робочих органів ґрунтобробних машин з використанням точкового зміцнення . *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту*. 2011. Вип.24(2). С.28-35.
7. Денисенко М.І., Опальчук А.С. Зношування та підвищення довговічності робочих органів сільськогосподарських машин . *Вісник ТНТУ*. 2011. Спецвипуск. Ч.2. С.201-210.
8. Клюенко В.Н., Балан В.П. Точечное упрочнение рабочих органов почвообрабатывающих машин . Тракторы и сельскохозяйственные машины. М. : Тракторы и сельскохозяйственные машины, 1989. С.54-57.
9. Структура и износостойкость при абразивном изнашивании наплавленного металла, упрочненного карбидами различных типов / И.А.Рябцев и др. *Автоматическая сварка*. № 5-6. 2015. С.84-88.

References

1. Bobryts'kyu, V.M. (2007). *Pidvyshchennya znosostiykosti rizal'nykh elementiv robochykh orhaniv hruntobrobnykh mashyn* [Improving the wear resistance of the cutting elements of the working bodies of tillage machines] . *Extended abstract of Candidate's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
2. Aulin, V.V. (2015). Trybofizychni osnovy pidvyshchennya znosostiykosti detaley ta robochykh orhaniv sil'skohospodars'koyi tekhniki [Tribophysical bases of increase of wear resistance of details and working bodies of agricultural machinery] . *Extended abstract of Doctor's thesis*. Khmel'nyts'kyu [in Ukrainian].
3. Novykov, V.S. (2008). Obespechenye dolhovechnosti robochykh orhanov pochvoobrabatyvayushchykh mashyn [Ensuring the durability of the working bodies of tillage machines] . *Extended abstract of Doctor's thesis*. Moscow [in Russian].
4. Severnev, M.M., Podlekarev N.N., Sokhadze V.Sh. & Kytykov V.O. (2011). *Yznos y korrozyya sel'skokhozyaystvennykh mashyn* [Wear and corrosion of agricultural machinery]. Mynsk: Belorus.Navuk [in Russian].
5. Tkachev, V.N. (1995). Rabotosposobnost' detaley mashyn v uslovyakh abrazyvnogo yznashyvannya [Performance of machine parts under abrasive wear conditions]. Moscow : Mashynostroenye [in Russian].
6. Denysenko, M.I. & Rubl'ov V.I. (2011). Pidvyshchennya dovhovichnosti robochykh orhaniv hruntobrobnykh mashyn z vykorystanniam tochkovoho zmitsnennya [Increasing the durability of the working bodies of tillage machines with the use of point reinforcement]. *Zbirnyk naukovykh prats Tsentralnoukrainskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Collected Works of Kirovohrad National Technical University. Machinery in Agricultural Production, Industry Machine Building, Automation , Vol.24(2), 28-35* [in Ukrainian].
7. Denysenko, M.I. & Opal'chuk, A.S. (2011). Znosuvannya ta pidvyshchennya dovhovichnosti robochykh orhaniv sil'skohospodars'kykh mashyn [Wear and tear of working bodies of agricultural machines] . *Visnyk TNTU – Scientific journal of TNTU, Special issue, part 2, 201-210* [in Ukrainian].
8. Klyuenko, V.N. & Balan, V.P. (1989). *Tochechnoe uprochnenye robochykh orhanov pochvoobrabatyvayushchykh mashyn* [Point hardening of the working bodies of tillage machines]. Moscow : *Traktory y sel'skokhozyaystvennye mashyny* [in Russian].
9. Ryabtsev, Y.A., Panfylov, A.Y., Babynets, A.A., Ryabtsev, Y.Y., Hordan', H.N. & Babyychuk, Y.L. (2015). *Struktura y yznosostoykost' pry abrazyvnom yznashyvanny naplavlennoho metalla, uprochnennoho karbydamy razlychnykh typov* [Structure and wear resistance during abrasive wear of deposited metal hardened with various types of carbides]. Kiev: Avtomaticheskaya svarka [in Russian].

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

Nemishayev Vocational College of NUBiP of Ukraine, Nemishayeve township, Bucha district, Kyiv region, Ukraine

Improving the Technical Resource and Durability of the Working Bodies of Tillage Agricultural Machines

The working bodies of tillage agricultural machines (ploughshare, plow shelf, cultivator paw, harrow disc) work in conditions of abrasive operation, shock loads and the impact of external aggressive environment. Their repair is to restore the original size of parts and wear resistance of functional work surfaces. During the

operation of tillage machines and units, the working surfaces are subjected to uneven wear, which reduces the life of parts and increases the cost of their replacement and restoration.

The working bodies of tillage agricultural machines (ploughshare, plow shelf, cultivator paw, harrow disc) work in conditions of abrasive operation, shock loads and the impact of external aggressive environment. Their repair is to restore the original size of parts and wear resistance of functional work surfaces. During the operation of tillage machines and units, the working surfaces are subjected to uneven wear, which reduces the life of parts and increases the cost of their replacement and restoration.

The current level of operation of agricultural machinery is characterized by increased speeds and high productivity, which, in turn, leads to increased wear of parts. accordingly, the reliability of the recovered machines will depend on the wear resistance and fatigue strength of the recovered parts. The leading place in the repair of machines is occupied by welding and surfacing processes, which account for about 80% of all restorative parts.

Surfacing makes it possible to obtain layers of any thickness and chemical composition on the working surfaces of parts; apply a welded layer with different properties, ie high hardness and wear resistance. In this work we use point (point) hardening, which consists in micro-dripping of the hard alloy into the surface structure of parts that undergo intense abrasive wear. The geometry of the hardening point is a spherical sector, which facilitates the rapid removal of heat from the surfacing bath in the base metal and the environment, so the hardening points harden at high speed and in a short time. At point strengthening of details one of the main conditions providing stable quality of process - coordination of welding current and arc voltage. The sawtooth profile of the ploughshare blade (cultivator paws) is maintained throughout its service life. providing effective cutting even with the blades worked.

share plough, friction surface, abrasive wear, operating longevity, point welding

Одержано (Received) 17.01.2022

Прорецензовано (Reviewed) 03.02.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

УДК 621.577:658

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.47-54](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.47-54)

М.В. Босий, ст. викл., **В.М. Кропівний**, проф. канд. техн. наук., **О.В. Кузик**, доц. канд. техн. наук., **А.В. Кропівна**, доц., канд. техн. наук. **Л.А. Молокост**, ст. викл.

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, України
e-mail: bosiytmv@ukr.net; kuzykov1985@gmail.com*

Термодинамічна енергоефективність парокомпресійного теплового насоса на ґрунтових водах

В статті розглянуто термодинамічну енергоефективність парокомпресійного теплового насоса (ПКТН) при використанні природних джерел теплової енергії довкілля, зокрема ґрунтових вод. Представлені схема ПКТН «вода-вода» для системи тепlopостачання, температурні рівні в загальній системі ПКТН «вода-вода» та наведено приклад роботи циклу ПКТН «вода-вода» в $p-h$ діаграмі для пропана (R290). Приведено результати термодинамічного дослідження енергоефективності застосування ПКТН при використанні ґрунтових вод як джерела низькопотенційної теплової енергії. Розглянуто застосування чистих вуглеводнів як робочих речовин для ПКТН, а також метод оцінки енергоефективності за ексергетичним аналізом термодинамічних процесів перетворення енергії, що відбуваються в ПКТН, робочим тілом якого є холодильний агент R290. Енергетичну ефективність ПКТН оцінювали коефіцієнтом перетворення ТН COP, він за розрахунками дорівнює 4,5. Термодинамічну ефективність ПКТН в системах тепlopостачання розглядали за допомогою ексергетичного ККД в залежності від середньотермодинамічних температур теплоносіїв в конденсаторі і випарнику, який характеризує досконалість перетворення енергії і становить 44 %.

тепловий насос, низькопотенційне джерело енергії, енергоефективність, коефіцієнт перетворення ТН (COP), ексергетичний ККД ТН, система тепlopостачання

Постановка проблеми. Скорочення запасів твердих, рідких і газоподібних видів органічного палива та зростанням цін на енергоносії сприяє впровадженню технологій з використанням поновлюваних альтернативних джерел енергії, які відкривають можливість до енергозбереження і зменшення викидів парникових газів в атмосферу [1,2,5].

Альтернативою застосування традиційних теплоенергетичних установок є використання теплових насосів (ТН). ТН ефективні енергозберігаючі пристрої, які економлять паливно-енергетичні ресурси, знижують забруднення довкілля та задовольняють потреби споживачів у виробництві технологічної теплоти [3-5].

Найбільш екологічне та найефективніше джерело енергії для системи опалення є використання енергії землі, що міститься у ґрунті та воді. ТН типу «вода-вода» працюють з високими показниками ефективності, це є актуальним у використанні їх в системах тепlopостачання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. ТН застосовують для переносу теплової енергії від тіла з більш низькою температурою до тіла з більш високою температурою, які працюють за зворотним циклом Карно, вони утилізують низькопотенційну теплоту природних, технологічних і побутових джерел. При використанні ТН первинної енергії витрачається в 1,2-2,3 рази менше, ніж у разі прямого спалювання палива [6,7]. ТН витрачає електричну енергію більш ефективно, ніж інше енергетичне обладнання. По оцінкам розробників ТН при використанні 1 кВт·год електричної енергії виробляється (3-4) кВт·год теплової енергії [2, 5, 7].

Класифікація ТН за принципом дії наступна: парокомпресійні (ПКТН), абсорбційні (АБТН), струминні (СТН), термоелектричні (ТЕТН). Найбільш широкого використання набули ПКТН.

ТН – це основний компонент більш загальної системи під назвою «теплонасосна установка» (ТНУ), до якої входять: устаткування, прилади і комунікації, що забезпечують експлуатаційні зв'язки ТН з низькопотенційними джерелами теплоти та об'єктами теплоспоживання [4, 5].

ТНУ застосовують для тепlopостачання, гарячого водопостачання житлових і виробничих будівель, забезпечення тепловою енергією потрібного потенціалу ряду технологічних процесів (сушіння, дистиляція, теплове оброблення); тепло- та холодопостачання сільськогосподарських об'єктів (молочних ферм, фруктових садових, зернохранилищ та ін.) [1-5, 7].

Використання в тепlopостачанні потоків низькопотенційних вторинних енергоресурсів значно розширює ресурсну базу тепlopостачання, робить її менш залежною від постачання паливних ресурсів.

Наразі більше уваги приділяється використанню новітньої технології ТН, як альтернативних джерел тепlopостачання для промислових та побутових потреб.

Для тепlopостачання використовують наступні потоки низькопотенційних природних джерел теплоти (атмосферне повітря -10...+15 °С; повітря витяжної вентиляції приміщень + 15...+25 °С; ґрунтові води + 8...+15 °С; ґрунт 5...+10 °С; природні води 4...+17 °С) та вторинних енергоресурсів (вода систем оборотного водопостачання 25...40 °С; технологічні скидання рідин і газів 40...65 °С; теплоносії сонячних колекторів 20...40 °С) [4,5]. На показники ефективності роботи ТН впливають температури підведення до ТН і відведення від нього теплоти, а також довкілля [2, 3].

Перспективним є використання ТН в комбінованих схемах за умови поєднання з іншими технологіями, наприклад, поновлюваними джерелами енергії – сонячною та геотермальною [4].

З екологічної точки зору при виборі робочих речовин для теплонасосної техніки перспективним є застосування чистих вуглеводнів та їх сумішей [4, 6, 10]. Використання в ТН пропан-бутанової суміші замість R22 приведе до підвищення коефіцієнта перетворення ТН на 5-10% [9].

Природні холодоагенти, на яких працюють ТН, з точки зору термодинамічних характеристик є найпоширенішими і безпечними для довкілля. Наприклад, холодоагент R290 сучасний і безпечний при використанні в ТН і відноситься до групи вуглеводнів, його виробництво не вимагає великих витрат, легко виділяється з природного газу. Він не руйнує озоновий шар ($ODP = 0$) і має низький потенціал впливу на глобальне потепління ($GWP = 3$) [10,11].

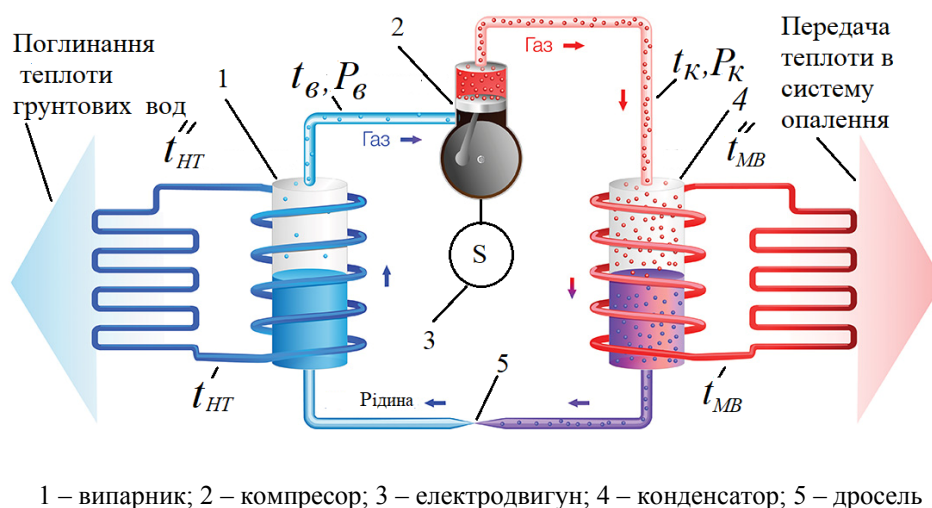
ПКТН дозволяють максимально економити первинні високопотенційні енергоресурси в порівнянні з котельними установками, ця економія становить 60% і вище в залежності від коефіцієнта перетворення [5].

Таким чином, проведення досліджень з підвищення енергоефективності використання ПКТН в системах теплопостачання є актуальним.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження термодинамічної енергоефективності використання ПКТН «вода-вода» в системі теплопостачання.

Виклад основного матеріалу. Принцип дії ПКТН «вода-вода» базується на енергообміні робочої речовини з джерелами низької і високої температур. При цьому робоча речовина (холодоагент), здійснює зворотний термодинамічний цикл з витратою роботи. Особливістю ПКТН «вода-вода» є зміна агрегатного стану робочої речовини, тому що більшість процесів проходять в області насиченої пари. ПКТН «вода-вода» функціонує з вищими значеннями T_K і T_B , не змінюючи при цьому цикл ТН, $T_B \approx T_{н.с.}$, $T_K > T_{н.с.}$.

Розглянемо вплив температур на показники енергоефективності роботи ПКТН «вода-вода», схема якого наведена на рис. 1, а температурні рівні в системі ПКТН «вода-вода» зображені на рис. 2.



1 – випарник; 2 – компресор; 3 – електродвигун; 4 – конденсатор; 5 – дросель

Рисунок 1 – Схема ПКТН «вода-вода» для системи теплопостачання

Джерело: розроблено автором на підставі [2,4]

На рис. 2 представлені температурні рівні в загальній системі ПКТН «вода-вода». T_K і T_B – температури конденсації і випаровування робочої речовини; $T_{тп}$, $T_{тх}$ – середні термодинамічні температури проміжних теплоносіїв (використовуються для передачі теплоти від нижнього джерела теплоти T_x до випарника і від конденсатора до приміщення, верхнього джерела теплоти T_n).

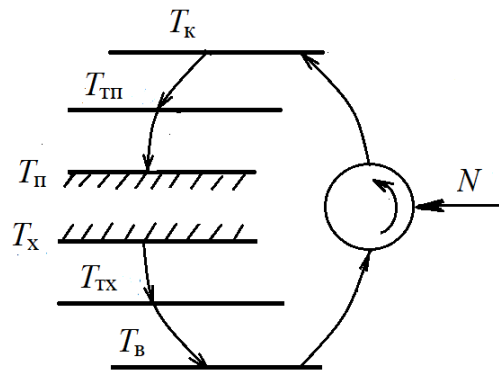


Рисунок 2 – Схема температурних рівнів в системі ПКТН «вода-вода»

Джерело: на підставі [16]

Робочі температури ТН при заданих температурах джерел теплоти T_X і $T_T = T_P$ визначаються таким чином: температура кипіння робочої речовини: $T_B = T_X - \Delta T_X - \Delta T_B$; температура конденсації: $T_K = T_P + \Delta T_{оп} + \Delta T_K$ [16].

Пониження температурних напорів (ΔT_X , ΔT_B , ΔT_K , $\Delta T_{оп}$) зменшує необоротності і підвищує ефективність енергетичних перетворень в ПКТН [16].

На рис. 3 наведено приклад роботи циклу ПКТН «вода-вода» в $p-h$ діаграмі для робочого тіла пропана. Лінія 4-1 відповідає процесу кипіння пропана у випарнику ПКТН при температурі кипіння $+3^\circ\text{C}$ і тиску кипіння 0,50 МПа (т. 4 – пропан у стані вологої насиченої пари; т. 1' – суха насичена пара; лінія 1'-1 – підігрів насичених парів пропана теплотою гарячого рідкого пропана до стану перегрітої пари. У випарнику ПКТН «вода-вода» завдяки охолодженню низькотемпературного теплоносія $\Delta t_{нт} = t'_{нт} - t''_{нт}$ випаровується рідина пропана (процес 4-1) за умови незмінної температури $t_B = t'_{нт} - \Delta t_{нт}$, де $\Delta t_{нт} = 3-5^\circ\text{C}$ – кінцева різниця температур у випарнику. Суха насичена пара пропана, яка утворилась у випарнику, адіабатно стискається в компресорі (процес 1-2), внаслідок чого підвищується тиск і температура пропана. В конденсаторі ПКТН «вода-вода» пара пропана після компресора конденсується за умови сталої температури $T_K = \text{const}$ (процес 2-3), віддаючи теплоту мережевій воді системи теплофікації, яка підігрівається від температури $t'_{мв}$ до температури $t''_{мв} = t_K - \Delta t_K$ (конденсація пропану відбувається при температурі конденсації $+73^\circ\text{C}$ і тиску конденсації 2,8 МПа). Далі конденсат пари пропана дрослюється ($h_3 = h_4$) в дросельному вентилі (процес 3-4) і з температурою T_B знов надходить у випарник.

Енергетична ефективність ПКТН залежить від характеристик теплових джерел, що беруть участь у термотрансформації: від температурного рівня нагрівання середовища споживача теплового навантаження і від температури надходження утилізованого низькопотенційного середовища [2-5].

За ексергетичним методом оцінюємо енергоефективність термодинамічних процесів перетворення енергії, що відбуваються у ТН [2-5].

Аналіз енергоефективності ПКТН «вода-вода», проводився для робочого тіла холодоагента R290 [2]. Для R290 температура випаровування становить $t_B = 2...5^\circ\text{C}$, а конденсації – $t_K = 73^\circ\text{C}$. Вибираємо низькопотенційне джерело теплоти – ґрунтову воду, яка на вході у випарник має температуру $t'_{нт} = 8...15^\circ\text{C}$, а на виході з нього $t''_{нт} = 4...10^\circ\text{C}$. Температура мережевої води (теплоносія) на вході в конденсатор становить $t'_{мв} = 35^\circ\text{C}$, а на виході з нього – $t''_{мв} = 55^\circ\text{C}$.

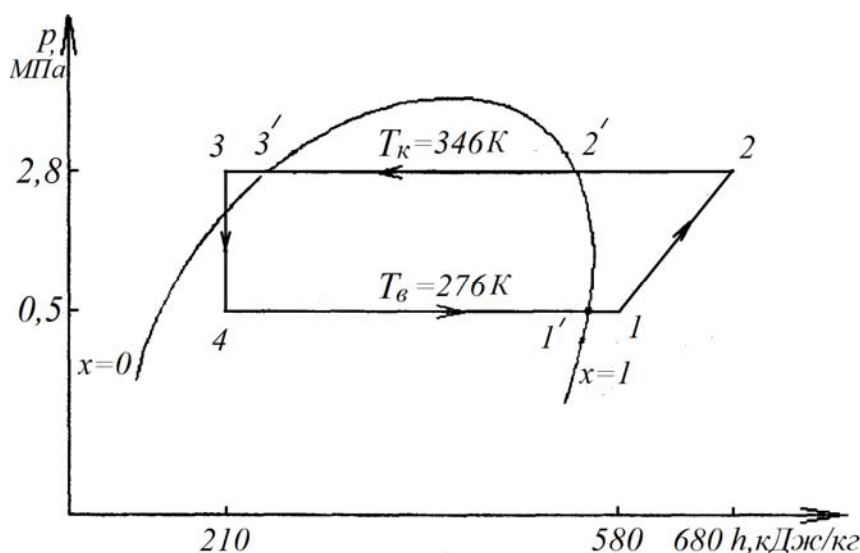


Рисунок 3 – Цикл роботи ПКТН «вода-вода» в p - h -діаграмі для робочого тіла R290
Джерело: розроблено автором на підставі [2,4]

Розглянемо визначення показників енергоефективності циклу ПКТН «вода-вода» для системи теплопостачання.

Питома теплота, яка підводиться до R290 у випарнику

$$q_v = h_1 - h_4, \quad (1)$$

де h_1 , h_4 – ентальпії R290 на виході з випарника та вході у випарник.

Робота стиснення в компресорі

$$l_{ст} = h_2 - h_3. \quad (2)$$

Питома робота компресора

$$l_{км} = (h_2 - h_1) / \eta_{км}, \quad (3)$$

де $\eta_{км}$ – внутрішній ККД компресора.

Питома робота, яка витрачається на привід компресора

$$l_{пр} = l_{км} / \eta_{пр}, \quad (4)$$

де $\eta_{пр}$ – ККД привода компресора.

Питома теплота, яка віддається R290 в конденсаторі воді

$$q_k = h_2 - h_3 = q_v + l_{км}, \quad (5)$$

де h_2 , h_3 – ентальпії R290 на вході в конденсатор та виході з нього.

Рівняння енергетичного балансу для ПКТН «вода-вода»

$$l_{ст} + q_v = q_k = q_{тн}. \quad (6)$$

За допомогою коефіцієнта перетворення теплоти COP оцінюємо енергетичну ефективність роботи ПКТН «вода-вода» [2-5]

$$COP = \mu = q_k / l_{пр} = (q_v + l_{км}) / l_{пр}. \quad (7)$$

Для визначення термодинамічної ефективності ПКТН «вода-вода» використовуємо ексергетичний метод.

Критерієм термодинамічної досконалості ПКТН «вода-вода», як відомо, є ексергетичний ККД [2-6, 12-16]

$$\eta_{\text{ex}} = e_{\text{вих.}} / e_{\text{вх.}} = e_{\text{к}} / (e_{\text{в}} + l_{\text{пр}}) = q_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{с}}^{\text{к}} / (q_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{с}}^{\text{в}} + l_{\text{пр}}), \quad (8)$$

де $e_{\text{вх.}}$, $e_{\text{вих.}}$ – ексергія входу у випарник і в компресор та виходу з конденсатора;

$\eta_{\text{с}}^{\text{в}} = 1 - T_{\text{нс}} / T_{\text{ср}}^{\text{в}}$ – ексергетична температурна функція для входу теплоти у випарник;

$\eta_{\text{с}}^{\text{к}} = 1 - T_{\text{нс}} / T_{\text{ср}}^{\text{к}}$ – ексергетична температурна функція для виходу теплоти з конденсатора;

$T_{\text{ср}}^{\text{в}}$ і $T_{\text{ср}}^{\text{к}}$ – середньотермодинамічні температури входу і виходу теплоти;

$T_{\text{нс}}$ – абсолютна температура довкілля.

Результати проведеного вище термодинамічного розрахунку ПКТН «вода-вода» наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Термодинамічний розрахунок ПКТН «вода-вода»

Параметр	Розмірність	Формула, рисунок	Розрахункові значення
Температура випаровування R290, $T_{\text{в}}$	К	Рис. 3	276
Ентальпія R290 після випарника, h_1	кДж/кг	Рис. 3	580
Тиск R290 у випарнику, $P_{\text{в}}$	МПа	Рис. 3	0,5
Температура конденсації R290, $T_{\text{к}}$	К	Рис. 3	346
Ентальпія R290 після конденсатора, h_3	кДж/кг	Рис. 3	210
Тиск конденсації R290, $P_{\text{к}}$	МПа	Рис. 3	2,8
Ентальпія R290 на вході в компресор, h_1	кДж/кг	Рис. 3	580
Ентальпія R290 після компресора, h_2	кДж/кг	Рис. 3	680
Ентальпія R290 перед випарником, h_4	кДж/кг	Рис. 3	210
Питоме теплове навантаження випарника, $q_{\text{в}}$	кДж/кг	(1)	370
Питоме теплове навантаження конденсатора, (теплового насоса), $q_{\text{к}} = (q_{\text{тн}})$	кДж/кг	(5)	470
Робота стиснення в компресорі, $l_{\text{ст}}$	кДж/кг	(2)	100
Питома робота компресора, $l_{\text{км}}$	кДж/кг	(3)	94,14
Питома робота, яка витрачається на привід компресора, $l_{\text{пр}}$		(4)	104
Перевірка теплового балансу	-	(6)	470
Коефіцієнт перетворення теплоти, COP	-	(7)	4,5
Ексергетичний ККД ТН, η_{ex}	-	(8)	0,44

Джерело: розроблено автором на підставі [2,6]

Втрата ексергії через необоротну передачу теплоти і гідравлічного тертя тим більша, чим нижчий температурний рівень у процесі. Зміна $\Delta T_{\text{в}}$ більше впливає на термодинамічну ефективність циклу η_{ex} , ніж $\Delta T_{\text{к}}$. Тому вибору величини $\Delta T_{\text{в}}$, тобто, вибору теплообмінного апарату для процесу підведення теплоти до робочої речовини R290 від теплоносія з низькою температурою необхідно приділяти більше уваги [16].

Таким чином, показники енергоефективності роботи циклу ПКТН «вода-вода», коефіцієнт перетворення COP ТН «вода-вода» і ексергетичний ККД η_{ex} ТН «вода-вода» суттєво залежать від середньотермодинамічних температур входу і виходу теплоти, а також довкілля. Проведений аналіз впливу температур на енергоефективність ПКТН «вода-вода» дозволяє прогнозувати оптимальні температурні режими роботи.

Висновки.

1. Проведено термодинамічне дослідження ефективності застосування ПКТН «вода-вода» для системи опалення приміщення при використанні ґрунтових вод як джерела низькопотенційної теплової енергії.

2. Оцінка енергоефективності термодинамічних процесів перетворення енергії, що відбуваються в ПКТН «вода-вода», робочим тілом якого є холодильний агент R290, виконана методом ексергетичного аналізу.

3. Визначено енергетичну ефективність ПКТН «вода-вода» за коефіцієнтом перетворення COP ТН, який за розрахунками дорівнює 4,5.

4. Показано, що ексергетичний ККД ПКТН «вода-вода» в залежності від середньотермодинамічних температур випаровування та конденсації становить 44 %.

Список літератури

1. Драганов Б.Х., Долінський А.А., Міщенко А.В., Письменний Є.М. (за ред. Драганова Б.Х.) Теплотехніка: підр. Київ «ІНКОС», 2005. 504 с.
2. Ткаченко С.Й., Остапенко О.П. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2009. 176 с.
3. Остапенко О.П. Холодильна техніка та технологія. Теплові насоси: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2015. 123 с.
4. Арсеньєв В.М., Мелейчук С.С. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку: навч. посіб. Суми. СДУ, 2018. 364с.
5. Арсеньєв В.М. Теплонасосная технология энергосбережения. Суми: Вид-во СДУ, 2009. 251 с.
6. Трубаев П.А. Гришко Б.М. Тепловые насосы: учеб. пособие. Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. 134 с.
7. Босий М.В., Кузик О.В. Ефективність циклу теплового насоса для теплопостачання. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. Вип. 3(34). С.136-142.
8. Малярєнко В.А. Енергетичні установки. Загальний курс: навч. посіб. Х.: “Видавництво САГА”, 2008. 320с.
9. Шевель В. И. Работа компрессоров серийного исполнения на смеси пропан-бутан в теплонасосном режиме работы. *Компрессорная техника и пневматика в XXI веке: материалы XIII Международной научно-технической 62 конференции по компрессоростроению*. Сумы: СумГУ, 2004. С. 239-244.
10. Хмельнюк М. Г., Мартынюк М. О. Повышение эффективности установки низкотемпературной конденсации природного газа. *Технические газы*. 2008. № 4. С. 30-35.
11. Сайт. URL: <http://aerum.com.ua/gree-vypuskaet-kondicionery-na-propane/>
12. Мартыновский В.С. Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов / под ред. Бородянского В.М. М.: Энергия, 1979. 288 с.
13. Соколов Е.Я., Бродянский В.М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. М.: Энергоиздат, 1981. 320 с.
14. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа. М.: Энергия, 1973. 296 с.
15. Арсеньєв В.М., Гречаненко В.А. Ексергетическа оцєнка ефєктивності теплонасосної технології енергосбереження. *Вісник Сумського державного університету*. 2002. №9(42). С.81-85.
16. Кудєля П.П., Соломаха А.С., Очеретянко М.Д. Оцінка ефєктивності опалювальних теплових насосів з використанням методу циклів. *Відновлювальна енергетика*. 2016. №4. С.74-85.

Referencis

1. Draganov, B.H., Dolinsky, A.A., Mishchenko, A.V. & Written, E.M. (2005). *Heat engineering*. Draganova B.H. (Ed.). Kyiv: INCOS [in Ukrainian].
2. Tkachenko, S.Y. & Ostapenko, O.P. (2009). *Parokompresijni teplonasosni ustanovky v systemakh teplopостachannia* [Steam compression heat pump installations in heat supply systems]. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
3. Ostapenko, O.P. (2015). *Kholodyl'na tekhnika ta tekhnolohiia. Teplovi nasosy* [Refrigeration equipment and technology. Heat pumps]. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
4. Arsenyev, V.M. & Meleischuk, S.S. (2018). *Teplovi nasosy: osnovy teorii i rozrakhunku* [Heat pumps: the basics of the theory and design]. Sumy, SDU [in Ukrainian].
5. Arsenyev, V.M. (2009). *Teplonasosnaja tehnologija energozberezhenja* [Heat pump technology of energy saving]. Sumy: SDU Publishing House [in Ukrainian].

6. Trubaev, P.A. & Grishko, B.M. (2010). *Teplovye nasosy [Heat pumps]*. Belgorod: BSTU Publishing House [in Russian].
7. Bosiy, M.V. & Kuzyk, O.V. (2020). Efektyvnist' tsykladu teplovoho nasosa dlia teplopostachannia [Heat pump cycle efficiency for heat supply]. *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical sciences, Vol. 3 (34)*, 136-142 [in Ukrainian].
8. Malyarenko, V.A. (2008). *Enerhetychni ustanovky. Zahal'nyj kurs [Power plants. General course]*. Tutorial. H: SAGA Publishing House [in Ukrainian].
9. Shevel, V.I. (2004). Rabota kompressorov seriynogo ispolnenija na smeci propan-butan v teplonasosnom rezhime raboty [Operation of serial compressors on a propane-butane mixture in a heat pump operation mode]. *Compressor technology and pneumatics in the XXI century: materialy XIII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy 62 konferencii po kompressorostroeniju – XIII International Scientific and Technical Conference on Compressor Engineering* (P. 239-244). Sumy: Sumy State University, [in Ukrainian].
10. Khmelnyuk, M.G. & Martynyuk, M.O. (2008). Povyshenie jeffektivnosti ustanovki nizkotemperaturnoj kondensacii prirodnogo gaza [Increasing the efficiency of low-temperature condensation of natural gas]. *Tekhnicheskie gazy – Technical gases*. Odessa: ODAH. Technical Gases, 4, 30-35 in Ukrainian].
11. Site. *aerum.com.ua*. Retrieved from <http://aerum.com.ua/gree-vypuskaet-kondicionery-na-propan/> [in Ukrainian].
12. Martynovsky, V.S. (1979). *Cycles, schemes and characteristics of thermal transformers*. Brodyansky V.M. (Ed.). Moscow: Energy [in Russian].
13. Sokolov, E.Y. & Brodyansky, V.M. (1981). *Jenergeticheskie osnovy transformacii tepla i processov ohlazhdenija [Energy bases of heat transformation and cooling processes]*. Moscow: Energoizdat [in Russian].
14. Brodyansky, V.M. (1973). *Jeksergeticheskij metod termodinamicheskogo analiza [Exergetic method of thermodynamic analysis]*. Moscow: Energy, [in Russian].
15. Arsenyev, V.M. & Grechanenko, V.A. (2002). Jeksergeticheskaja ocenka jeffektivnosti teplonasosnoj tehnologii jenergosberezhenij [Exergetic evaluation of the efficiency of heat pump technology of energy savings]. *Visnik Sums'kogo derzhavnogo universitetu – Bulletin of Sumy State University*, 9 (42), 81-85[in Ukrainian].
16. Kudelya, P.P., Solomakha, A.S. & Ocheretyanko, M.D. (2016). Otsinka efektyvnosti opaliuval'nykh teplovykh nasosiv z vykorystanniam metodu tsykliv [Evaluation of the efficiency of heating heat pumps using the method of cycles]. *Vidnovliuval'na enerhetyka – Renewable energy, №4*, 74-85 [in Ukrainian].

Mykola Bosiy, Sen. Lect., **Volodymyr Kropivnyi**, Prof., PhD in tech. sci., **Olexandr Kuzyk**, Assoc. Prof., PhD in tech. sci., **Alena Kropivna**, Assoc. Prof., PhD in tech. sci., **Ludmyla Molokost**, Sen. Lect.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Thermodynamic Energy Efficiency of a Groundwater Heat Pump

The thermodynamic energy efficiency of a steam compression heat pump (PKTN) using natural sources of environmental heat, in particular groundwater, is considered in the article.

The scheme of PKTN "water-water" for the heat supply system, temperature levels in the general system of PKTN "water-water" are presented and the example of work of the PKTN "water-water" cycle in the p-h diagram for propane (R290) is given. The results of a thermodynamic study of the energy efficiency of the use of PKTN when using groundwater as a source of low-potential thermal energy are presented. The article considers the use of pure hydrocarbons as working substances for PKTN, as well as a method for assessing energy efficiency by exergy analysis of thermodynamic energy conversion processes occurring in PKTN, the working fluid of which is the refrigerant R290. The energy efficiency of PKTN was estimated by the conversion coefficient of TH COP, it is calculated to be 4.5. The thermodynamic efficiency of PKTN in heat supply systems was considered using exergy efficiency depending on the average thermodynamic temperatures of heat carriers in the condenser and evaporator, which characterizes the perfection of energy conversion and is 44%.

A thermodynamic study of the effectiveness of PKTN "water-water" for the space heating system using groundwater as a source of low-potential thermal energy. Evaluation of energy efficiency of thermodynamic processes of energy conversion occurring in PKTN "water-water" whose working fluid is a refrigerant R290 (propane) is performed by the method of exergetic analysis. It is shown that the exergetic efficiency of PKTN "water-water" depending on the average thermodynamic temperatures of evaporation and condensation is 44%.

heat pump, low-potential energy source, energy efficiency, HP conversion factor (COP), exergy HP efficiency, heat supply system

Одержано (Received) 07.02.2022

Прорецензовано (Reviewed) 21.02.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

УДК 621.891:631.31:631.37 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.55-70](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.55-70)

В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук, **А.В. Гриньків**, канд. техн. наук, **С.В. Лисенко**, доц., канд. техн. наук, **О.М. Лівіцький**, ст. наук. співр., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна
e-mail: AulinVV@gmail.com

А.В. Бабій, доц., д-р техн. наук

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м.Тернопіль, Україна
e-mail: ababiy@ukr.net

Закономірності впливу високомодульних наповнювачів на розподіл полів напружень в поверхневих шарах деталей машин, виготовлених з полімерних композитних матеріалів

В даній роботі на основі комп'ютерного моделювання контактної взаємодії спряжень зразків (деталей), навантажених тертям, виявлено основні зміни розподілу полів напружень в контактних областях гомогенних і гетерогенних (композитних) полімерних матеріалів. Поля напруження досліджували як в статичних, так і динамічних умовах навантаження. Увага була зосереджена на виявленні областей з максимальним тангенціальним напруженням $\tau_{\max}$, їх конфігурації та глибини залягання. При цьому була використана теорія N.P. Suh, яка стосується зародження руйнуючих процесів в матеріалах зразків і деталей, ініційована наявністю зон дії максимальних тангенціальних напружень на певній глибині поверхневого шару.

Запропоновано критерій, що відповідає оптимальному об'ємному вмісту високомодульному наповнювача, який дорівнює відношенню усереднених відстаней між центрами сусідніх частинок наповнювача і їх розміру. Наведені відповідні оцінки цього критерію.

полімерні композитні матеріали, високомодульний наповнювач, синергетична концепція, трибоспрямлення, дотичні напруження

Постановка проблеми. Використання деталей, виготовлених з полімерних композитних матеріалів (ПКМ) та відновлених нанесенням покриттів з цих матеріалів в процесі експлуатації, показало ефективність підвищення довговічності систем і агрегатів машин [1-3]. Разом з тим постає проблема оптимізації складу полімерних композитів від вмісту наповнювачів, розподілу полів напружень в полімерній матриці, від геометричної форми та концентрації наповнювача.

Специфічні особливості роботи ПКМ з мікро-, мезо- та макрогетерогенною структурою обумовлюють необхідність аналізу напружено-деформованого стану (НДС), що виникає в умовах навантаження в процесі експлуатації [4,5] силами тертя. Оскільки одна і та величина деформації може привести до крихкого руйнування однієї компоненти, до в'язкого – другого компоненту і утомленого – третього компоненту [6]. Тому в такому випадку визначальним є міцнісні характеристики кожної з компонент ПКМ. Дослідженнями НДС поверхневих шарів, зміцнених ПКМ [7-9], виявлено необхідність урахування взаємодії сусідніх контурних та фактичних контактів в процесі тертя ковзання. В науковій літературі це питання недостатньо досліджено й розглядаються не всі види зношування в спряженнях деталей машин [10-11]. Слід також враховувати процеси викришування та відшарування в ПКМ. Зазначимо, що при

реалізації такої експлуатаційної властивості матеріалів як їх зносостійкість, завдання ускладнюється через суттєву залежність напружень від об'ємного співвідношення компонентів, їх розмірів, форми, а також конструктивних особливостей спряжених деталей та властивостей робочого (технологічного) середовища. Потребує виявлення сам механізм передачі НДС через контактну взаємодію нижче розташованим шарам в поверхневих шарах деталей з ПКМ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На думку авторів робіт [12-15] основною причиною руйнуючих процесів у поверхневих шарах ПКМ є НДС, що виникає в результаті контактних напружень і деформацій під впливом дотичних і нормальних навантажень при терті та зношуванні [16,17]. Це обумовлює необхідність детального дослідження особливостей НДС у поверхневих шарах матеріалів спряжених деталей. Вивчення особливостей НДС ПКМ як фактора, що визначає процес їх тертя і зношування, дозволяє підійти з єдиних позицій до нерозв'язаних проблем. При цьому ефективним є використання фізико-математичних моделей [18-20] та проведення оцінки НДС за розподілом навантаження в плямі контакту поляризаційно-оптичним та іншими методами [9]. Спроби співставлення зносостійкості і НДС поверхневих шарів ПКМ зроблено в роботі [8]. Згідно досліджень, проведених в роботі [7] є необхідність релаксації локальних максимальних напружень у поверхневих шарах деталей. Виявлено, що зі збільшенням об'ємного вмісту і розміру наповнювача інтенсивність зносу зменшується, але при цьому недостатньо з'ясовано зв'язок зазначених факторів з величиною максимальних дотичних напружень в ньому [21,22].

Спроби оцінки НДС поверхневих шарів ПКМ, навантажених силами тертя, з використанням теорії Герца [23,24], відображені в роботах В.П. Бондаренка [7], В.Я. Белоусова [13], А.В. Ковальського [8], В.В. Ауліна [9]. Загальним недоліком при цьому є статичність і схематичність картин НДС, відсутність врахування сусідніх контактуючих локальних областей. Існуючі експериментальні і теоретичні дослідження [22,11,25] не дозволяють в повній мірі орієнтуватися в дійсному розподілі поля напружень і деформацій за реальних умов тертя, оскільки залишається не виявленим вплив структурних особливостей ПКМ на НДС та характер і величину зносу, а також їх зв'язок з умовами контактування. Для вивчення цих питань перспективними є фізико-хімічні методи [26] та комп'ютерне моделювання [27,28] з використанням моделей реальних структур ПКМ мікро-, мезо- та макрорівня.

Постановка завдання. Метою даної роботи є на основі порівняльного аналізу полів напружень, що виникають в поверхневих шарах гомогенних і гетерогенних полімерних матеріалів зразків (деталей), навантажених тертям виявити закономірності впливу високомодульних наповнювачів на їх розподіл, при зміні форми наповнювача, відстані між ними та вмісту, а також з'ясувати умови найбільш ефективної експлуатації деталей машин, виготовлених з полімерних композитних матеріалів.

Виклад основного матеріалу. При комп'ютерному моделюванні контактів спряжених поверхонь гомогенних полімерних матеріалів деталей, враховували, що при їх взаємодії виділяються декілька ділянок як контурних площинок, обумовлених хвилястістю поверхні, тобто нерівністю першого порядку, а також точки контакту, як плями фактичного контакту, обумовлені нерівностями другого порядку [29,30].

Гомогенний полімерний матеріал поверхневих шарів деталей вважали пружної моделлю, що являє собою однорідну півплощину навантажену одночасною дією нормальної $\vec{N}_n$ і тангенціальної $\vec{N}_\tau$ складових ($N_n > N_\tau$) силового навантаження, які забезпечують повільне його ковзання по границі спряжених півплощин. Розподіл навантаження по плямі контакту має характер зосередженої сили, що дає можливість оцінити напружений стан за величиною максимального дотичного напруження $\tau_{\max}$:

$$\tau_{\max} = 0,5(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (1)$$

де σ_1, σ_2 – головні напруження, що лежать в площині моделі поверхневого шару деталі.

Епюри напружень в контактних зонах спряжень гомогенних однорідних матеріалів зразка і деталі в стані спокою і в процесі відносного руху наведено на рис. 1.

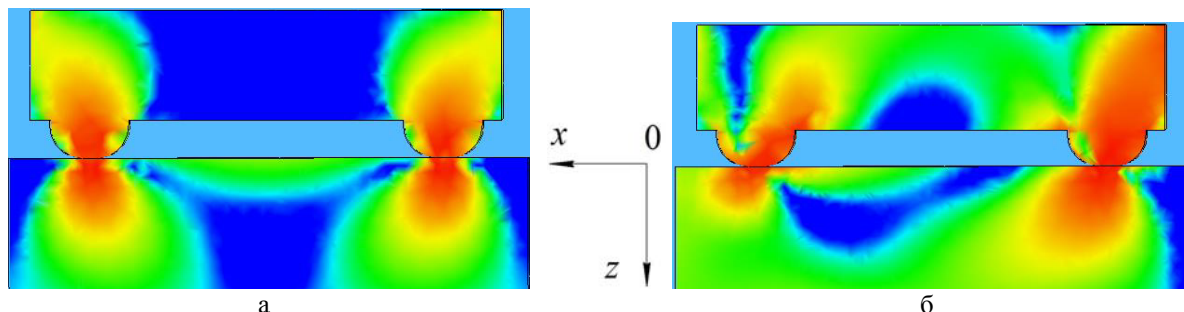


Рисунок 1 – Характерні епюри напружень в контактній зоні зразків з гомогенними однорідними полімерними матеріалами в стані спокою (а) $\bar{v} = 0$ і відносного руху (б) $\bar{v} \neq 0$

Джерело: розроблено авторами

Аналіз картин розподілу напружень в поверхневих шарах гомогенного полімерного матеріалу в процесі тертя ковзання свідчить про необхідність врахування наступної інформації: товщина поверхневого шару; розташування зон максимальних напружень $\tau_{\max}$ в ньому; зв'язок характеру розподілу поля напружень з параметрами контактування; періодичний характер коливань напружень. Виявлено, що в певний момент часу максимальні стискуючі напруження поверхневого шару знаходяться під точками контакту і спадають в горизонтальному напрямку в бік сусіднього контакту. За глибиною поверхневого шару спостерігається інший вид залежності напруження $\tau_{\max}$: характерні різкі збільшення величини напруження фіксуються на глибині $h = (0,34 \dots 0,38)a$, де a – відстань між контактами, а потім йде різке зменшення, практично до поверхні зразка (деталі). Наявність локальної області з різким збільшенням $\tau_{\max}$ реалізує від'ємний градієнт напружень відносно поверхні. Ця область розташована на глибині $(0,18 \dots 0,42)a$, нижче якої на глибині $(0,52 \dots 0,56)a$ знаходиться ізоотропна локальна область: $\sigma_1 = \sigma_2$ і $\tau_{\max} = 0$, в якій має місце всебічне стискування матеріалу [7].

Визначено, що при збільшенні дотичного навантаження картина розподілу поля напруження наближається до поверхні і зсувається в сторону прикладання навантажень N_τ . Розташування ізоотропної області наближено співпадає з нижньою межею зони найбільших напружень $\tau_{\max}$, а швидкість їх зміни збільшується зі збільшенням відносної швидкості спряженого матеріалу. На увагу заслуговує активний поверхневий шар деталі, розташований на певній глибині, в якому найбільш імовірно відбуваються зародження і протікання руйнівних процесів. В зв'язку з цим існують активні шари першого порядку, що відповідають за процеси руйнування на глибині десятків та сотні мікрметрів, та активні шари другого порядку, що визначають процеси зношування поверхневого шару в області мікронерівностей.

Згідно з теорією N.P. Suh [31-33], зародження руйнуючих процесів в матеріалах деталей часто ініціюється наявністю зон дії напружень $\tau_{\max}$ на певній глибині поверхневого шару. Результати комп'ютерного моделювання в даній роботі, підтверджуючи справедливості цієї теорії, дають можливість побудувати узагальнену схему розташування виявлених характерних областей з напруженням $\tau_{\max}$ за глибиною поверхневого шару полімерного гомогенного матеріалу зразків (деталей), що

знаходиться в відносному рухомому і нерухомому випадках (рис. 2).

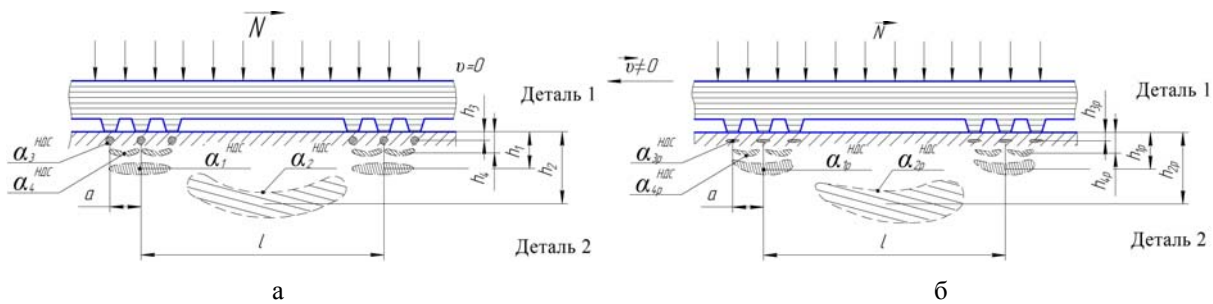


Рисунок 2 – Узагальнена схема розташування характерних локальних областей напруження $\tau_{\max}$ за глибиною полімерного гомогенного матеріалу нерухомих зразків (деталей) (а) та при відносному їх русі зі швидкістю v (б): h_1, h_2, h_{1p}, h_{2p} – глибини розташування областей $\alpha_1^{\text{HДС}}, \alpha_2^{\text{HДС}}, \alpha_{1p}^{\text{HДС}}, \alpha_{2p}^{\text{HДС}}$ з $\tau_{\max}$ утворених контурним тиском (нерівностями I порядку); h_3, h_4, h_{3p}, h_{4p} – глибина розташування областей $\alpha_3^{\text{HДС}}, \alpha_4^{\text{HДС}}, \alpha_{3p}^{\text{HДС}}, \alpha_{4p}^{\text{HДС}}$ з $\tau_{\max}$ утворених фактичним тиском (нерівностями II порядку)

Джерело: розроблено авторами

Згідно узагальненої схеми (рис.2) глибина розміщення локальних областей напруження $\tau_{\max}$ в гомогенному полімерному матеріалі визначається шириною контактної площинки a та відстанню між центрами контактних площинок l . Виявлено, що глибина локальних областей $\alpha_3^{\text{HДС}}$ і $\alpha_1^{\text{HДС}}$, де $\tau_{\max}$ досягає найбільшого значення (рис. 2, а), не залежить від пружних властивостей матеріалу та сил тертя [88]. При збільшенні номінального навантаження спостерігається збільшення фактичної площі контакту і ще в більшому степені самої контурної площини. Це відбудеться, в основному, не за рахунок збільшення розмірів площинок контакту, а за рахунок збільшення їх кількості. В зв'язку з чим локальні області $\alpha_2^{\text{HДС}}$ і $\alpha_4^{\text{HДС}}$ переміщуються ближче до поверхні при зменшенні відстаней l і a , а локальні області $\alpha_1^{\text{HДС}}$ і $\alpha_3^{\text{HДС}}$ залишаються на місці. Комп'ютерне моделювання свідчить, що можливі випадки, коли локальні області $\alpha_3^{\text{HДС}}$ і $\alpha_4^{\text{HДС}}$ та $\alpha_1^{\text{HДС}}$ і $\alpha_2^{\text{HДС}}$ будуть розміщуватися на одній глибині від поверхні деталі. Звісно, що така ситуація є небажаною для деталей машин, оскільки весь поверхневий шар на цій глибині буде мати найбільше напруження $\tau_{\max}$, створюючи безперервний від'ємний їх градієнт. В зв'язку з цим знизиться утомна міцність матеріалу деталі [34,35].

Оскільки для гомогенних полімерних матеріалів деталей локальні області найбільших напружень $\tau_{\max}$ розташовані на глибині $h_1 = (0,45 \dots 0,50)a$, і $h_2 = (0,32 \dots 0,36)l$, то при $h_1 = h_2$, маємо: $l/a = 1,58 \dots 1,79$. При виконанні умови $l/a > 1,75$ локальна область $\alpha_2^{\text{HДС}}$ в поверхневому шарі розташовується нижче рівня області $\alpha_1^{\text{HДС}}$. Зазначене свідчить, що на характер розподілу НДС в гомогенному матеріалі деталі трибоспряження суттєвий вплив здійснює геометрія поверхні тертя. При переміщенні плям контакту деталей від мінімуму до вершини хвилястості поверхні локальна область $\alpha_3^{\text{HДС}}$ має найбільші напруження $\tau_{\max}$. В локальній області $\alpha_2^{\text{HДС}}$ при терті поширюються мікротріщини в мікровиступі. Локальна область $\alpha_4^{\text{HДС}}$ розташована під виступом паралельно поверхні. Основна частина напружень при цьому концентрується у виступах.

Дослідження свідчать, що в процесі переміщення контактуючих ділянок (рис. 2, б) від основи виступів до вершини, в поверхневому шарі полімерного матеріалу

зразків (деталей) трибоспряження, глибина залягання розглянутих локальних областей суттєво не змінюється. Виявлена зміна їх конфігурацій: α_{1p}^{HDC} , α_{2p}^{HDC} , α_{3p}^{HDC} , α_{4p}^{HDC} в процесі відносного руху зразків (деталей). Аналіз результатів досліджень, проведених моделюванням на ПК, свідчить, що знаючи параметри контактування зразків (деталей), взаємне розташування локальних областей з $\tau_{\max}$ та товщину активного поверхневого шару, можна цілеспрямовано змінювати, забезпечуючи найбільш сприятливі режими тертя в трибоспряженні. З трибофізичної точки зору, на відміну від пружно-пластичної деформації мікронерівностей зразків (деталей) їх поверхневий шар підлягає переважно пружним деформаціям, а руйнування при зношуванні має утомний характер, як результат зміни НДС. Установлено, що в кожній точці активного поверхневого шару виникають внутрішні зусилля коливального характеру у напрямку перпендикулярному вектору відносної швидкості рухомого спряженого зразка або деталі, які можуть слугувати додатковим джерелом енергії при підвищенні температури поверхневого шару в процесі тертя і зношування. В таких умовах мікрогеометрія поверхні зразків і деталей зазнає значних змін внаслідок протікання процесів пластичного відтиснення, утомного руйнування і у деяких випадках, мікрорізання та глибинного виривання. Ці зміни відбуваються до оптимального значення рівноважної шорсткості, характерної для даних спряжень зразків і деталей і умов тертя [36-38].

За даними І.В. Крагельського [39] зі збільшенням чистоти поверхні частка пружної деформації збільшується. При цьому математичний опис шорсткості поверхонь тертя, їх нерегулярність, потребує застосування теоретико-імовірнісних та фрактальних методів [40-41]. Загальні закономірності і особливості НДС поверхневих шарів в областях виступів виявлені в залежності від товщини деформованого шару, його напруженого стану, від форми виступів, їх висоти і кроку та від рівня навантаження на спряження зразків (деталей) [19,36,37]. Виявлено, що концентрація напружень локалізується у виступах при будь-якій їх геометрії, а величина напружень під вільною поверхнею в межах активного шару на 1...2 порядки менша ніж у виступі. Характер навантаження мікронерівностей в процесі тертя залежатиме як від їх геометрії, так і співвідношення контактних тисків матеріалів зразків (деталей), а початкове руйнування в процесі контактування слід очікувати у верхній частині виступу [43,44].

Комп'ютерне моделювання НДС зразків і деталей з полімерного композитного матеріалу, дало можливість виявити вплив на нього розташування твердих частинок наповнювача та найбільш вигідний розподіл напружень в поверхневому шарі. Частинки наповнювача варіювали за геометричною формою (куля, куб, циліндр), по розмірам та порівнювали з масштабами контактування, а по щільності – розташували їх в поверхневому шарі з вмістом c_V , тобто з певною відстанню між ними.

Порівняльний аналіз епюр напружень в поверхневих шарах зразків трибоспряження на рис. 1 та рис. 3 свідчить, що наявність наповнювачів на 18...32% знижує рівень напружень в матриці ПКМ. Сприйняття основного контактного навантаження і передача його полімерній матриці відбувається твердими частинками наповнювача [20]. Виявлено, що характер розподілу напружень в поверхневій шарі залежить як від геометричної форми частинок наповнювача, так і відстані між ними (рис. 3-5). Спостерігається різке збільшення напружень на межі "матриця-наповнювач" для наповнювачів кубічної форми (рис. 3): створюється додаткове напруження на кутах кубічного наповнювача на відміну від випадку круглої форми (рис. 4). Зі зменшенням розмірів частинок наповнювача зменшується рівень напружень та змінюється їх розподіл за глибиною поверхневого шару. Змінюється розподіл напружень у випадках різного розташування наповнювача відносно зони контакту. Найкраще передається

зовнішнє навантаження у випадку (рис. 3, в, рис. 4, в, рис. 5, а,в) коли наповнювач знаходиться в поверхневому шарі зони контакту зразків з ПКМ. Виявлено, що рівень напружень в полімерній матриці під наповнювачем зменшується на 15...18% при зменшенні його розміру в 2 рази. В самому ж наповнювачі зменшення концентрації напруження спостерігається зі збільшенням його розміру.

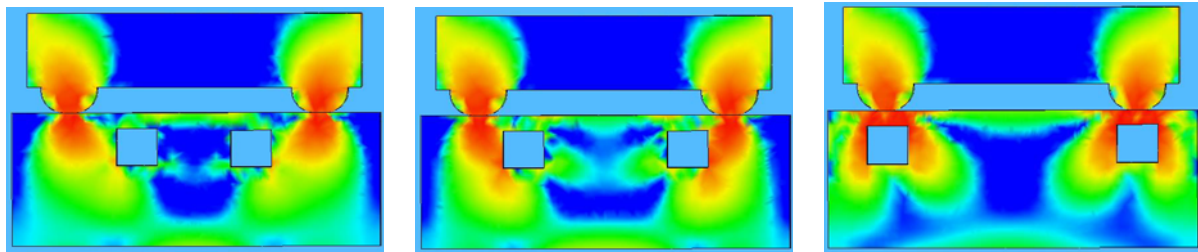


Рисунок 3 – Характерні епюри напруження в зоні контакту поверхонь зразків (деталей) при різних відстані розташування наповнювачів кубічної форми: а – λ_1 ; б – λ_2 ; в – λ_3 ; $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$

Джерело: розроблено авторами

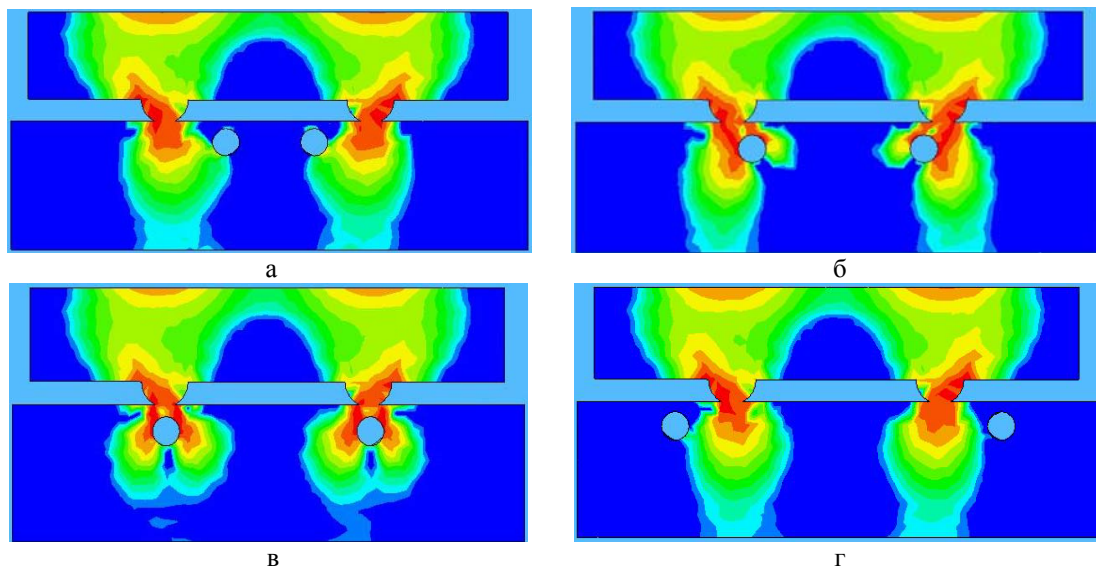


Рисунок 4 – Характерні епюри напруження в зоні поверхонь зразків (деталей) контакту при різних відстані розташування наповнювачів кулястої форми: а– λ_1 ; б – λ_2 ; в – λ_3 ; г – λ_4 ; $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3 < \lambda_4$

Джерело: розроблено авторами

У порівнянні зі стаціонарним і динамічним навантаженнями, при наявності у поверхневому шарі ПКМ наповнювачів циліндричної форми (рис. 5), характер розподілу напружень істотно змінюється: поле напружень при русі спряженого зразка дещо переміщується до поверхневого шару і залежить від спрямування твірної наповнювачів циліндричної форми у поверхневому шарі спряженого зразка (рис. 5, б,г). Виявлено, що для умов тертя більш сприйнятливим є вертикальне розташування наповнювача циліндричної форми (твірна перпендикулярно робочій поверхні), оскільки при цьому відводиться напруження із зони тертя. Спостерігаються малі за розміром небезпечні зони під наповнювачами та в локальних областях між ними. Динаміка зміни поля напружень від зміни відстані між вертикально розміщеними наповнювачами циліндричної форми наведено на рис. 6. Найбільш сприйнятлива картина для зон тертя наведена на рис. 6 а, коли максимальні напруження зосереджені у зоні контакту.

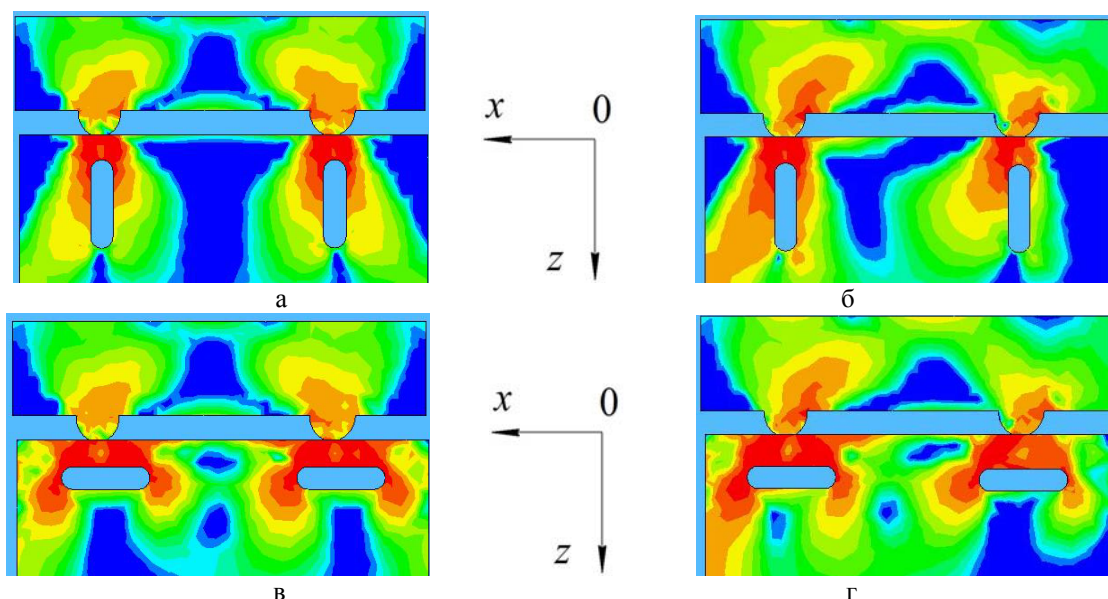


Рисунок 5 – Характерні епюри напруження в зоні контакту поверхонь зразків (деталей) при різному спрямуванні наповнювачів циліндричної форми у поверхневому шарі: вертикальному $\bar{v} = 0$ (а); вертикальному $\bar{v} \neq 0$ (б); горизонтальному $\bar{v} = 0$ (в); горизонтальному $\bar{v} \neq 0$ (г)

Джерело: розроблено авторами

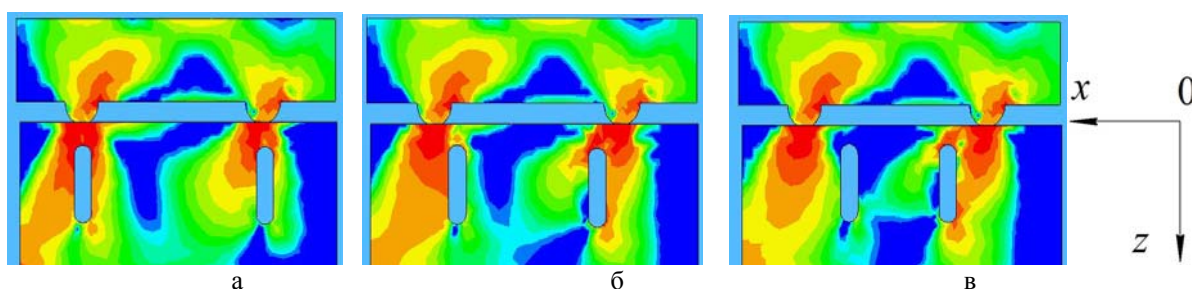


Рисунок 6 – Характерні епюри напруження в зоні контакту трибоспряження зразків з частинками наповнювача циліндричної форми у поверхневому шарі при терті $\bar{v} \neq 0$: в контактній (а) та міжконтактній (б, в) областях

Джерело: розроблено авторами

Змінюється характер розподілу напружень і від концентрації наповнювача у поверхневому шарі зразків (деталі) (рис. 7). Спостерігається відведення максимальних напружень із зон контактування. Зі збільшенням товщини шару ПМК напруження перерозподіляються між наповнювачами.

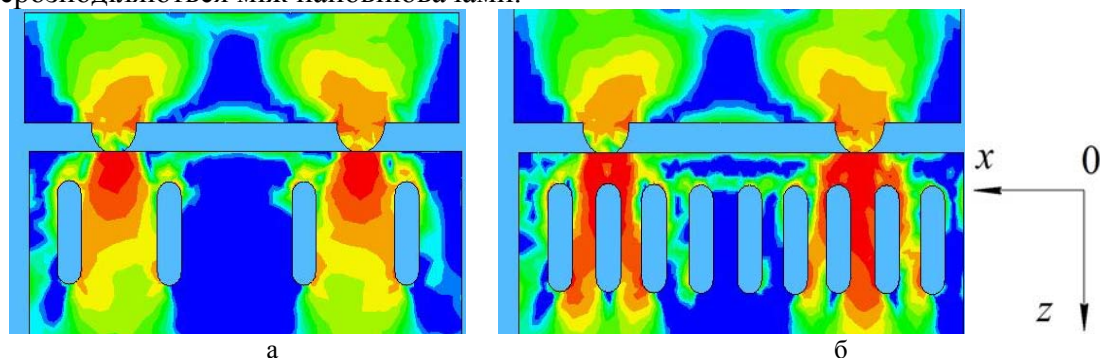


Рисунок 7 – Характерні епюри напруження в зоні контакту зразків при різних концентрації наповнювачів: c_{v1} (а), c_{v2} (б); $c_{v2} > c_{v1}$

Джерело: розроблено авторами

Дослідження показали, що для даного ПКМ існує така його товщина, коли поле напружень (рис. 8, г) не поширюється в перехідну область, що відрізняється від випадків, поданих на рис. 8, а,б,в.

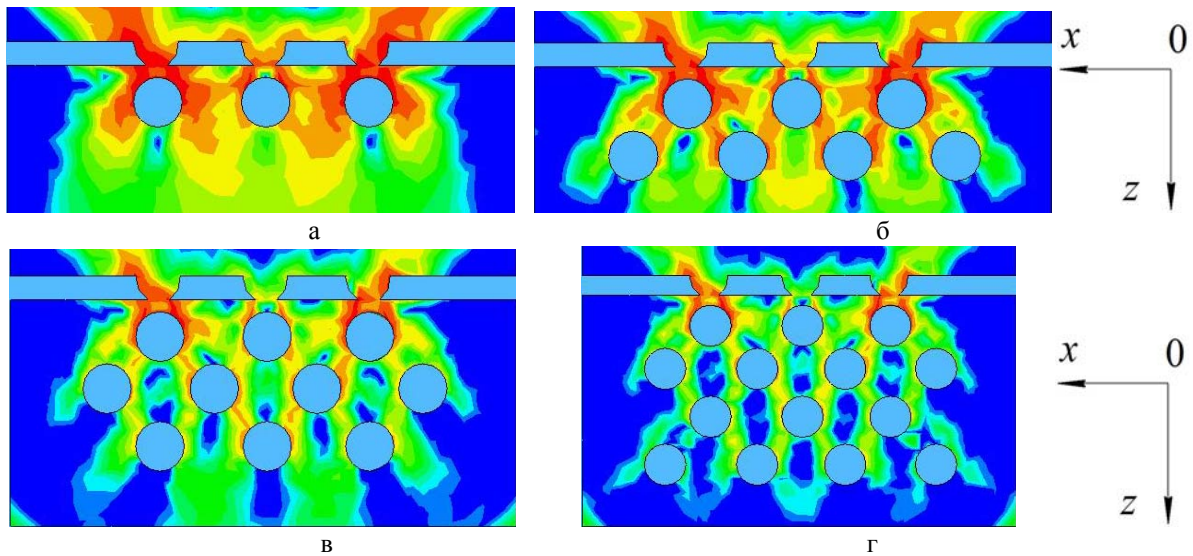


Рисунок 8 – Характерні епюри напруження в багатоконтактній області трибоспряження зразків в режимі стаціонарного навантаження: зразок, зміцнений одношаровим (а); двошаровим (б); тришаровим (в); чотиришаровим (г) ПКМ

Джерело: розроблено авторами

Це свідчить про те, що зміцнювальна ефективність шару ПКМ є максимальною при його оптимальній товщині $h_{пкм} \Rightarrow opt$. Подальше збільшення товщини зміцненого полімерного шару є недоцільним через збільшення витрат на його формування.

Характер сприйняття навантажень у зміцненому ПКМ зразку дещо змінює картину поля напружень і розміщення небезпечних зон в гетерогенному поверхневому шарі у порівнянні з гомогенним. Аналіз отриманих результатів дав можливість побудувати узагальнену схему розташування характерних локальних областей максимальних дотичних напружень τ_{max} в ПКМ, в стаціонарному та динамічному (в процесі тертя ковзання) режимах навантаження (рис. 9).

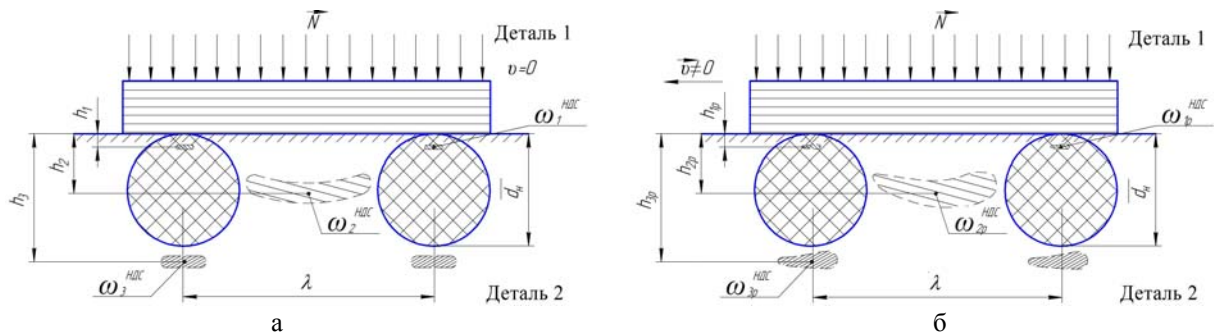


Рисунок 9 – Узагальнена схема розташування характерних локальних областей напружень τ_{max} у матеріалі зразка, зміцненого ПКМ: спряжені зразки знаходяться у стані спокою (а) та відносного руху (б) зі швидкістю $\vec{v}$

Джерело: розроблено авторами

У випадку, коли наповнювач в ПКМ не виступає над поверхнею, реалізується локальна область ω_2^{HDC} (рис. 9, а) підвищених напружень $\tau_{\max}$ аналогічна локальним областям α_1^{HDC} і α_4^{HDC} (рис. 2, а) для однорідного гомогенного матеріалу зразка. Це свідчить про те, що контактне навантаження у ПКМ передається, в основному, через наповнювачі і визначається їх геометрією та взаємним розташуванням. Можна припустити, що при розмірі наповнювача порядку однієї нерівності поверхні зразка (деталі) механізм утворення рівноважної шорсткості принципово не відрізняється від випадку однорідного матеріалу [181].

Важливою особливістю є поява третьої локальної області ω_3^{HDC} найбільших напружень $\tau_{\max}$ під наповнювачем (рис. 9, а). Вона аналогічна областям α_1^{HDC} і α_2^{HDC} (рис. 2, а). Спостерігається також стабільність напружень в активному поверхневому шарі. Виявлено, що при відносному ковзанні зразків з ПКМ, закономірності розподілу напружень в поверхневих шарах істотно не змінюються. Виявлено трансформування конфігурацій їх локальних областей (рис. 9,б): ω_{1p}^{HDC} , ω_{2p}^{HDC} , ω_{3p}^{HDC} .

За рахунок значної відмінності в твердості та модулі пружності полімерної матриці та високомодульного наповнювача у ПКМ наповнювач переймає роль індентора й здійснює навантаження на матрицю. Реалізація локальної області ω_2^{HDC} у поверхневому шарі ПКМ, вимагає набагато більших навантажень ніж для утворення аналогічних областей α_2^{HDC} і α_4^{HDC} у випадку гомогенного матеріалу зразку, оскільки наповнювачі у гетерогенному ПКМ перерозподіляє поле напружень. Зазначимо, що локальна область ω_1^{HDC} , що виникає в матеріалі наповнювача і є безпечною через його достатню міцність. Значну небезпеку й послаблення поверхневого шару здійснюють випадки, коли локальні області ω_2^{HDC} і ω_3^{HDC} , розташовані на одному рівні від поверхні під наповнювачами, що може обумовити їх викришування. Небажаним також є розташування локальної області ω_2^{HDC} між наповнювачами через послаблення міцності матриці між ними.

Результати досліджень свідчать, що найбільш доцільним є розташування областей ω_2^{HDC} і ω_3^{HDC} на глибинах $h_2 > h_3$. Заглиблення в матеріалі ПКМ, області ω_2^{HDC} знижує напруженість матриці між наповнювачами і забезпечує в ній позитивний градієнт напружень. Глибина розташування локальної області ω_3^{HDC} визначається розміром частинок наповнювача: $h_3 = (0,42...0,48)\bar{\lambda}$, де $\bar{\lambda}$ – усереднена відстань між центрами сусідніх частинок наповнювача, аналогічно розташуванню α_1^{HDC} і α_3^{HDC} в однорідному матеріалі під площинкою контакту. Область ω_2^{HDC} знаходиться на глибині $h_2 = (0,48...0,52)\bar{\lambda}$. Якщо вважати, що локальні області ω_2^{HDC} і ω_3^{HDC} знаходяться на одному рівні ($h_2 = h_3$), то умовою цього випадку є: $\bar{\lambda} = (4,2...4,5)\bar{d}_n$, $\bar{d}_n$ – усереднене значення діаметра наповнювача. Для того, щоб область ω_2^{HDC} була глибше області ω_3^{HDC} повинно виконуватись умова: $\bar{\lambda}/\bar{d}_n > 4,2$. Зазначений критерій відповідає оптимальному об'ємному вмісту наповнювача в ПКМ – 20...30% [45, 48].

Оскільки більша частина напружень для ПКМ, що виходять на поверхню, концентрується в області контакту, то локальна область ω_2^{HDC} в цьому випадку, як правило, не реалізується за рахунок того, що лінії однакових напружень витягуються вглиб матеріалу вздовж межі "матриця-наповнювач", збільшуючи глибину активного

поверхневого шару. Визначено, що напруження в об'ємі наповнювача набагато більші ніж в матриці. Це стосується і високомодульних наповнювачів, що не виходять на поверхню і не знаходяться в безпосередньому контакті з спряженою поверхнею зразків (деталей), тобто вони є сильними концентраторами напружень, а знаходячись в контакті несуть на собі основне навантаження. При цьому чим більший їх розмір, тим більше сприйнятна ними частка номінального навантаження на поверхні тертя. Визначено, що циліндрична форма твердих високомодульних наповнювачів є найбільш сприйнятливою при зміцненні полімерного матеріалу, оскільки локальна область ω_2^{HDC} при цьому є незначною або не утворюється взагалі, а локальна область ω_3^{HDC} , як показують дослідження, завжди буде розташовуватися набагато глибше активного поверхневого шару, що виключає небезпеку викришування наповнювачів. Це підтверджують роботи [49-52].

Висновки:

1. Адаптовано метод комп'ютерного моделювання поля напруження для зони контакту гомогенного і гетерогенного полімерного матеріалу в статичному та динамічному режимах.
2. Виявлено характерні чотири зони з максимальним тангенціальним напруженням та їх трансформацію під час відносного руху спряжень зразків (деталей). Проаналізовано до яких наслідків можуть привести зміна глибини залягання в поверхневих шарах матеріалу деталей. Отримано умови, які слід дотримуватись і які слід запобігати при використанні деталей з полімерних матеріалів.
3. Наведено результати комп'ютерного дослідження поля напружень полімерного композитного матеріалу з високомодульним наповнювачем кубічної форми, у вигляді кулі та циліндричної форми та різних відстаням між частинками наповнювача. Встановлено сприйнятливі випадки розташування частинок наповнювача та при різній їх концентрації як по горизонталі, так і по вертикалі поверхневого шару.
4. На основі аналізу результатів комп'ютерного моделювання композитного матеріалу побудована узагальнена схема розташування трьох характерних локальних областей тангенціальних напружень в статичному та динамічному випадках. Проаналізовані зміни глибин залягання цих областей та їх вплив на ефективне функціонування деталей машин, виготовлених з полімерних композитних матеріалів. Запропоновано критерій оцінки якості таких матеріалів, що являє собою відношення усереднених відстань між центрами сусідніх частинок наповнювача і їх розміром. З'ясовано вплив об'ємного вмісту високомодульного наповнювача на ефективне функціонування деталей, виготовлених з полімерних композитних матеріалів.
5. Дослідження з використанням комп'ютерне моделювання дає можливість виявити фактори, що впливають на глибину розташування локальних областей напружень τ_{max} в полімерному шарі деталі, знайти умови оптимізації розподілу в них наповнювачів, що забезпечить максимальну зносостійкість, з урахуванням відстані між частинками, їх розмірами та об'ємним вмістом, та можливість управління параметрами контактної взаємодії трибоспряження, визначити глибину активованого поверхневого шару і цілеспрямовано впливати на опір зношуванню деталей, зміцнених полімерно композитними матеріалами.

Список літератури

1. Аулін В.В., Бруцький О.П. Про доцільність використання полімерних композицій з нанонаповнювачів при відновлюванні та виготовленні ресурсовизначальних деталей СГТ.

- Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації с.-г. техніки*: матеріали X Міжнар. наук.-практичної конференції. Кіровоград: КНТУ, 2015. С.138-140.
2. Аулін В.В., Крилов О.О., Матвієнко О.О. Підвищення триботехнічних характеристик вузлів тертя сільськогосподарської техніки шляхом застосування полімерних матеріалів. *Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації с.-г. техніки*: матеріали X Міжнар. наук.-практичної конференції. Кіровоград: КНТУ, 2015. С.159-160.
 3. Аулін В.В., Бруцький О.П., Голуб Д.В. Застосування тонкошарових полімерних покриттів для підвищення надійності деталей і спряжень с/г техніки. *Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації с/г техніки*: матеріали IX-ї Міжнар. наук.-практ. конф., вип. 1. Кіровоград: КНТУ, 2013. С. 185-187.
 4. Аулін В.В., Бруцький О.П., Лисенко С.В. Дослідження закономірностей процесів тертя та зношування в металополімерних трибосистемах. *"Трибологія, енерго- та ресурсозбереження" яка проводилась в рамках "Ольвійського форуму - 2015"*: зб. тез матеріалів міжнар. наук.-практ. конф., 3-6 червня 2015, Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2015. С.3-4.
 5. Аулін В.В., Деркач О.Д., Макаренко Д.О., Гриньків А.В. Вплив режимів експлуатації на зношування деталей, виготовлених з полімерно-композитного матеріалу. *Проблеми трибології*. 2018. №4. С.65-69.
 6. Головач В.Т. О параметрах микроструктуры трехфазного композитного материала. *Сверхтвердые материалы*. 2009. №2. С. 17-21.
 7. Бондаренко В.П. Триботехнические композиты с высокомолекулярными наполнителями. К.: Наук. думка, 1987. 232 с.
 8. Ковальський А.В. Напряженное состояние и изнашивание композиционных материалов при трении: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04, 05.16.06/ Киев, 1987. 189 с.
 9. Аулін В.В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04 / Хмельниц. нац. ун-т. Хмельницький, 2015. 360 с.
 10. Сороков С. Кластерний підхід до розрахунку фізичних характеристик композитних матеріалів. Львів: Ін-т фізики конденс. систем НАНУ, 2003. 23 с.
 11. Ивановкин П.Г. Контактные задачи для узлов трения с двухслойными композициями триботехнического назначения: автореф. дисс. степени д-ра техн. наук.: 01.02.04, 05.02.04 / Ростов-на Дону, 2009. 38с.
 12. Бабушкин Г. А., Буланов В.Я., Синицкий И.А. Металлические композиты. Свердловск: УНУ АН СССР, 1987. 312 с.
 13. Белоусов В.Я. Долговечность деталей машин с композиционными материалами. Львів: Вища школа, 1984. 180 с.
 14. Ванин Г.А. Микромеханика композиционных материалов: монографія. К.: Наук. думка, 1985. 304с.
 15. Савуляк В.І. Наукові засади формування на сплавах заліза композиційних металокарбідних шарів зі стабільними структурами та підвищеними триботехнічними характеристиками: Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.02.01 / НАН України. Ін-т проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича. К., 2004. 39 с.
 16. Богданович П.Н. Изнашивание твердых тел: монография. Гомель: Бел. ГУТ, 1998, 304 с.
 17. Браун Э.Д., Буше Н.А., Буяновский И.А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка). М.: Центр "Наука и техника", 1995. 778с.
 18. Сорокатый Р.В. Метод трибозлементов: монография. Хмельницкий: ХНУ, 2009. 242 с.
 19. Аулін В.В. Поле напружень в композиційному матеріалі та композиційному покритті в умовах тертя ковзання. *Зб. наук. праць ЛНАУ. Серія: Технічні науки*. 2006. №.65(88). С.13-20.
 20. Аулін В.В. Визначення об'ємного вмісту наповнювача в антифрикційному композиційному покритті. *Машинознавство*. 2004. №7(85). С. 49-53.
 21. Аулин В.В., Соловых Е.К., Крылов А.В. Триботехнические свойства полимерометаллических покрытий восстановленных деталей. *Проблемы трибологии*. 2003. №3. С.76-84.
 22. Берсудский А.Л., Логинов О.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя при упрочнении с покрытием. *Вестник Самарского госуд. университета. Естественно-научная серия*. 2003. №4(30). С.103-111.
 23. Кузьменко А.Г., Дыха А.В., Бабак О.П. Контактная механика и износостойкость смазанных трибосистем. Теоретическая и экспериментальная трибология: в 12 т.; т. 8 (1): монография. Хмельницкий: ХНУ, 2011. 250 с.
 24. Кузьменко А.Г., Дыха О.В. Дослідження зносоконтатної взаємодії змащених поверхонь тертя:

- монографія. Хмельницький: ХНУ, 2005. 183 с.
25. Любичева А.Н. Контактное взаимодействие и изнашивание неоднородных тел: дисс. ... канд. физ-мат. наук: 01.02.04. М.: 2005. 88 с.
 26. Соколовская Е.М., Гузей Л.С. Физикохимия композиционных материалов. М.: Моск. ун-та, 1978. 256 с.
 27. Алямовский А.А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. М.: ДМК Пресс, 2004. 432 с.
 28. Воробьев В.А., Илюхин А.В. Математическое моделирование в компьютерном материаловедении. *Российская академия архитектуры и строительных наук. Вестник отделения строительных наук*. 1999. Вып. 2. С.117-125.
 29. Машков Ю.К. Трибофизика металлов и полимеров: монография. Омск: ОмГТУ, 2013. 240 с.
 30. Аулін В.В. Напружено-деформований стан поверхневих шарів гомогенних і гетерогенних матеріалів при терті і зношуванні. *Сучасні проблеми триботехніки*: м-ли міжн. наук. техн. конф. 27-29 вересня. Миколаїв: НУК, 2007. С. 83-86.
 31. Suh N.P. The delamination theory of wear. *Wear*. 1978. Vol.1. P1-162.
 32. Suh N.P. The delamination theory of wear. Massachusetts Institute of Technology, 1975. 158p.
 33. Suh N.P. The delamination theory of wear. *Wear*. 1973. Vol.25. №1. P 11-124.
 34. Буше Н.А. Трение, износ и усталость в машинах. М.: Транспорт, 1987. 223с.
 35. Ибатуллин И.Д. Новые методы и приборы для экспериментальной оценки энергетических параметров усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: автореф. дисс. д-ра. физ-мат. наук: 01.04.01. Тольятти, 2010. 36с.
 36. Аулін В.В. Динамічна адаптація спряжень деталей до умов експлуатації з реалізацією процесів самоорганізації. *Актуальні проблеми інженер. механіки*: м-ли II міжнар. наук.-техн. конф., 22-24 жовтня 2012р. Миколаїв: НУК, 2012. С73-74.
 37. Аулін В.В., Кузик О.В. Динамічне матеріалознавство зон тертя деталей сільськогосподарської техніки. *Вісник ЖНАЕУ: наук.-теор. збір.* 2014. № 2(45), т.4, ч.II. С. 102-110.
 38. Аулін В.В., Лізунов С.М. Теоретичне обґрунтування зміни шорсткості поверхні деталей після лазерної обробки. *Зб. наук. праць КНТУ "Техніка в сільгосп. виробн., галузеве машинобуд., автотранс."* 2007. Вип. 18. С.98-104.
 39. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. К.: Техника, 1970. 304 с.
 40. Аулін В.В., Лізунов С.М. Дослідження мікрогеометрії поверхонь тертя деталей фрактальним методом. *Констр., виробництво та експлуатація сільгосп. машин*. 2009. Вип.39. С. 280-286.
 41. Божокін С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы. *Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика"*, 2001. 128 с.
 42. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.
 43. Иванова В.С., Кузеев И.Р., Закиричная М.М. Синергетика и фракталы. Универсальности механического поведения материалов. Уфа: УГГТУ, 1998. 363с.
 44. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
 45. Aulin V., Derkach O., Makarenko D., Hrynkiv A., Pankov A., Tykhyi A. Analysis of tribological efficiency of movable junctions "polymeric-composite materials – steel". *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4 (12-100). P. 6-15.
 46. Aulin V.V., Derkach O.D., Kabat O.S., Makarenko D.O., Hrynkiv A.V., Krutous D.I. Application of polymer composites in the design of agricultural machines for tillage. *Problems of Tribology*, V.25, No2/96-2020. 49-58.
 47. Aulin V., Kobets A., Derkach O., Makarenko D., Hrynkiv A., Krutous D., Muranov E. Design of mated parts using polymeric materials with enhanced tribotechnical characteristics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 5 (12-107). P. 49-57.
 48. Aulin V., Derkach O., Makarenko D., Hrynkiv A., Krutous D., Muranov E. Development of a system for diagnosing bearing assemblies with polymer parts during operation. *Technology audit and production reserves*. 2020. № 5/1(55), pp.18-20.
 49. Мельниченко И.М. Восстановление и повышение долговечности подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники с использованием композиционных материалов и покрытий: автореф. дисс. д-ра. техн. наук. Челябинск, 1992. 31 с.
 50. Aulin V.V., Hrynkiv A.V., Smal V.V., Lysenko S.V., Pashynskiy M.V., Katerynych S.E., Livitskiy O.M. Basic approaches and requirements for the design of tribological polymer composite materials with high-modulus fillers. *Problems of Tribology*, V.26, No 4/102-2021, P. 51-60.

51. Аулін В.В. Вплив характеристик компонентів контактуючих композиційних матеріалів і покриттів на параметри та властивості зони тертя. *Проблеми трибології*. 2006. №4 (42). С. 110-112.
52. Аулін В.В. Деякі закономірності зношування елементів трибосистеми "РОГМ-грунт". *Ольвійський форум – 2012*: зб. тез матеріалів міжнародної науково-практичної конференції, 6-10 червня 2012, Ялта., т. 12. С.57-59.

References

1. Aulin, V.V. & Brutskyi, O.P. (2015). Pro dotsilnist vykorystannia polimernykh kompozytsii z nanonapovniuvachiv pry vidnovliuvanni ta vyhotovlenni resursovyznachalnykh detalei SHT [On the feasibility of using polymer compositions of nanofillers in the restoration and manufacture of resource-determining parts of HRT]. *Problemy konstruiuvannia, vyrobnytstva ta ekspluatatsii s.-h. tekhniky - Problems of design, production and operation of agriculture techniques: materialy X Mizhnar. nauk.-praktychnoi konferentsii*. Kirovohrad: KNTU, 138-140 [in Ukrainian].
2. Aulin, V.V., Krylov, O.O. & Matviienko, O.O. (2015). Pidvyshchennia trybotechnichnykh kharakterystyk vuzliv tertia silskohospodarskoi tekhniky shliakhom zastosuvannia polimernykh materialiv [Improving the tribotechnical characteristics of friction units of agricultural machinery through the use of polymeric materials]. *Problemy konstruiuvannia, vyrobnytstva ta ekspluatatsii s.-h. tekhniky - Problems of design, production and operation of agriculture techniques: materialy X Mizhnar. nauk.-praktychnoi konferentsii*. Kirovohrad: KNTU, 159-160 [in Ukrainian]
3. Aulin, V.V., Brutskyi, O.P. & Holub, D.V. (2013). Zastosuvannia tonkosharovykh polimernykh pokryttiv dlia pidvyshchennia nadiinosti detalei i spriazhen s/h tekhniky [The use of thin-layer polymer coatings to increase the reliability of parts and couplings of agricultural machinery]. *Problemy konstruiuvannia, vyrobnytstva ta ekspluatatsii s/h tekhniky - Problems of design, production and operation of agricultural machinery: materialy IX-yi Mizhnar. nauk.-prakt. konf., vyp. 1*. Kirovohrad: KNTU, 185-187 [in Ukrainian].
4. Aulin, V.V., Brutskyi, O.P. & Lysenko, S.V. (2015). Doslidzhennia zakonmironosti protsesiv tertia ta znoshuvannia v metalopolimernykh trybosystemakh [Research of regularities of friction and wear processes in metal-polymer tribosystems]. *"Trybologhiia, enerho- ta resursozbezehennia" yaka provodylas v ramkakh "Olviiskoho forumu - 2015" - Tribology, energy and resource conservation" held as part of the "Olbia Forum - 2015"*: zb. tez materialiv mizhnar. nauk.-prakt. konf., 3-6 chervnia 2015, Mykolaiv: Vyd-vo ChDU im. Petra Mohyly, 3-4 [in Ukrainian].
5. Aulin, V.V., Derkach, O.D., Makarenko, D.O. & Hrynkiv, A.V. (2018). Vplyv rezhymiv ekspluatatsii na znoshuvannia detalei, vyhotovlenykh z polimerno-kompozytnoho materialu [Influence of operating modes on wear of parts made of polymer-composite material]. *Problemy trybologhii - Problems of tribology*, 4, 65-69 [in Ukrainian].
6. Golovchan, V.T. (2009). O parametrah mikrostrukturyi trehfaznogo kompozitnogo materiala [On the parameters of the microstructure of a three-phase composite material]. *Sverhtverdyie materialy - Superhard materials*, 2, 17-21 [in Russian].
7. Bondarenko, V.P. (1987). *Tribotechnicheskie kompozityi s vyisokomodulnyimi napolnitelyami [Tribological composites with high-modulus fillers]*. Kiev: Nauk. dumka [in Russian].
8. Kovalskiy, A.V. (1987). Napryazhennoe sostoyanie i iznashivanie kompozitsionnykh materialov pri trenii [Stress state and wear of composite materials during friction]: *Candidate's thesis*. Kiev [in Russian].
9. Aulin, V.V. (2015). Trybofizychni osnovy pidvyshchennia znosostiikosti detalei ta robochykh orhaniv silskohospodarskoi tekhniky [Tribophysical bases of increase of wear resistance of details and working bodies of agricultural machinery]. *Candidate's thesis*. Khmelnyts. nats. un-t. Khmelnytskyi [in Ukrainian].
10. Sorokov, S. (2003). *Klasternyi pidkhid do rozrakhunku fizychnykh kharakterystyk kompozytnykh materialiv [Cluster approach to the calculation of physical characteristics of composite materials]*. Lviv: In-t fizyky kondens. system NANU [in Ukrainian].
11. Ivanochkin, P.G. (2009). Kontaktnyye zadachi dlya uzlov treniya s dvuhsloynnyimi kompozitsiyami tribotechnicheskogo naznacheniya [Contact problems for friction units with two-layer compositions for tribotechnical purposes]. *Extended abstract of doctor's thesis*. Rostov-na Donu [in Russian].
12. Babushkin, G. A., Bulanov, V.Ya. & Sinitskiy, I.A. (1987). *Metallicheskie kompozityi [Metal composites]*. Sverdlovsk: UNU AN SSSR [in Russian].
13. Beloysov, V.Ya. (1984). *Dolgovechnost detaley mashin s kompozitsionnyimi materialami [Durability of machine parts with composite materials]*. Lviv: Vischa shkola [in Russian].

14. Vanin, G.A. (1985). *Mikromekhanika kompozitsionnykh materialov* [Micromechanics of composite materials]. Kiev: Nauk. dumka [in Russian].
15. Savuliak, V.I. (2004). Naukovi zasady formuvannia na splavakh zaliza kompozytsiinykh metalokarbidnykh shariv zi stabilnymy strukturamy ta pidvyshchenymy trybotekhnichnymy kharakterystykamy [Scientific bases of formation on iron alloys of composite metal-carbide layers with stable structures and the raised tribotechnical characteristics]. *Extended abstract of doctor's thesis*. NAN Ukrainy. In-t problem materialoznavstva im. I.M.Frantsevycha [in Ukrainian].
16. Bogdanovich, P.N. (1998). *Iznashivanie tverdykh tel: monografiya* [Wear of solids: monograph]. Gornostan: Bel. GUT [in Russian].
17. Braun, E.D., Bushe, H.A., Buyanovskiy, I.A. et al. (1995). *Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka)* [Fundamentals of tribology (friction, wear, lubrication)]. M.: Tsentr "Nauka i tekhnika", [in Russian].
18. Sorokatyiy R.V. (2006). *Metod triboelementov* [Method of triboelements]. Hmelnytskyi: HNU [in Russian].
19. Aulin, V.V. (2006). Pole napruzhen v kompozytsiinomu materiali ta kompozytsiinomu pokrytti v umovakh tertia kovzannia [Stress field in composite material and composite coating under sliding friction conditions]. *Zb. nauk. prats LNAU. Seriya: Tekhnichni nauky - Coll. Science. against LNAU. Series: Technical Sciences*, 65(88), 13-20 [in Ukrainian].
20. Aulin, V.V. (2004). Vyznachennia obiemnoho vmistu napovniuvacha v antyfryktsiinomu kompozytsiinomu pokrytti [Determination of the volumetric content of the filler in the antifriction composite coating]. *Mashynoznavstvo - Mechanical Engineering*, 7(85), 49-53 [in Ukrainian].
21. Aulin, V.V., Soloviyh, E.K. & Kryilov, A.V. (2003). Tribotekhnicheskie svoystva polimerometalicheskikh pokrytyi vosstanovlennykh detaley [Tribotechnical properties of polymer-metal coatings of restored parts]. *Problemy tribologii - Problems of tribology*, 3, 76-84 [in Russian].
22. Bersudskiy, A.L. & Loginov, O.A. (2003). Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya poverhnostnogo sloya pri uprochnenii s pokrytiem [Simulation of the stress-strain state of the surface layer during hardening with a coating]. *Vestnik Samarskogo gosud. universiteta. Estestvenno-nauchnaya seriya - Bulletin of the samara state. university. natural science series*, 4(30), 103-111 [in Russian].
23. Kuzmenko, A.G., Dyiha, A.V. & Babak, O.P. (2011). *Kontaktnaya mekhanika i iznosostoykost smazannykh tribosistem. Teoreticheskaya i eksperimentalnaya tribologiya*. [Contact mechanics and wear resistance of lubricated tribosystems. Theoretical and experimental tribology]. (Vols. 12, Vol. 8 (1)). Hmelnytskyi: HNU [in Russian].
24. Kuzmenko, A.H. & Dykha, O.V. (2005). *Doslidzhennia znosokontaktnoi vzaemodii zmashchenykh poverkhon tertia: monografiya* [Investigation of wear-contact interaction of lubricated friction surfaces: monograph]. Khmelnytskyi: KhNU [in Ukrainian].
25. Lyubicheva, A.N. (2005). Kontaktnoe vzaimodeystvie i iznashivanie neodnorodnykh tel [Contact interaction and wear of inhomogeneous bodies]. *Candidate's thesis*. Moscow [in Russian].
26. Sokolovskaya, E.M. & Guzey, L.S. (1978). *Fizikohimiya kompozitsionnykh materialov* [Physicochemistry of composite materials]. Moscow: Mosk. un-ta [in Russian].
27. Alyamovskiy, A.A. (2004). *SolidWorks/COSMOSWorks. Inzhenernyi analiz metodom konechnykh elementov* [SolidWorks/COSMOSWorks. Engineering analysis by the finite element method]. Moscow: DMK Press [in Russian].
28. Vorobey, V.A. & Ilyuhin, A.V. (1999). Matematicheskoe modelirovanie v kompyuternom materialovedenii [Mathematical modeling in computer materials science]. *Rossiyskaya akademiya arhitektury i stroitelnykh nauk. Vestnik otdeleniya stroitelnykh nauk - Russian Academy of Architecture and Building Sciences. Bulletin of the department of building sciences*, Vol. 2, 117-125 [in Russian].
29. Mashkov, Yu.K. (2013). *Tribofizika metallov i polimerov* [Tribophysics of metals and polymers]. Omsk: OmGTU [in Russian].
30. Aulin, V.V. (2007). Napruzhenno-deformovanyi stan poverkhnevnykh shariv homohennykh i heterohennykh materialiv pry tertii i znoshuvanni [Stress-strain state of surface layers of homogeneous and heterogeneous materials during friction and wear]. *Suchasni problemy trybotekhniki - Modern problems of tribotechnics: m-ly mizhn. nauk. tekhn. konf. 27-29 veresnia*. Mykolaiv: NUK, 83-86 [in Ukrainian].
31. Suh, N.P. (1978). The delamination theory of wear. *Wear*, Vol.1, P1-162 [in English].
32. Suh, N.P. (1975). The delamination theory of wear. Massachusetts Institute of Technology [in English].
33. Suh, N.P. (1973). The delamination theory of wear. *Wear*, Vol.25, №1, P 11-124 [in English].
34. Bushe, N.A. (1987). *Trenie, iznos i ustalost v mashinah* [Friction, wear and fatigue in machines]. Moscow: Transport [in Russian].
35. Ibatullin, I.D. (2010). Novyye metody i pribory dlya eksperimentalnoy otsenki energeticheskikh

- parametrov ustalostnoy povrezhdaemosti i razrusheniya poverhnostnykh sloev [New methods and instruments for experimental evaluation of the energy parameters of fatigue damage and destruction of surface layers]. *Extended abstract of doctor's thesis*. Tolyatti [in Russian].
36. Aulin, V.V. (2012). Dynamichna adaptatsiia spriazhen detalei do umov ekspluatatsii z realizatsiieiu protsesiv samoorhanizatsii [Dynamic adaptation of conjugations of details to operating conditions with realization of processes of self-organization]. *Aktualni problemy inzhener. mekhaniky - Current problems engineer. mechanics: m-ly II mizhnar. nauk.-tekhn. konf., 22-24 zhovtnia 2012r.* Mykolaiv: NUK, 73-74 [in Ukrainian].
37. Aulin, V.V. & Kuzyk, O.V. (2014). Dynamichne materialoznavstvo zon tertia detalei silskohospodarskoi tekhniki [Dynamic materials science of friction zones of agricultural machinery parts]. *Visnyk ZhNAEU: nauk.-teor. zbir - Bulletin of ZhNAEU: scientific-theoretical. gathering, 2(45), vol.4, part.II*, 102-110 [in Ukrainian].
38. Aulin, V.V. & Lizunov, S.M. (2007). Teoretychne obhruntuvannia zminy shorstkosti poverkhni detalei pislia lazernoї obrobky [Theoretical substantiation of change of surface roughness of details after laser processing]. *Zb. nauk. prats KNTU Tekhnika v silhosp. vyrobn., haluzeve mashynobud., avtomat. - Coll. Science. Proceedings of KNTU Machinery in agricultural production., industry engineering., automation, Vol. 18*, 98-104 [in Ukrainian].
39. Kostetskiy, B.I. (1970). *Trenie, smazka i iznos v mashinah [Friction, lubrication and wear in machines]*. Kiev: Tehnika [in Russian].
40. Aulin, V.V. & Lizunov, S.M. (2009). Doslidzhennia mikroheometrii poverkhon tertia detalei fraktalnym metodom [Investigation of microgeometry of friction surfaces of parts by fractal method]. *Konstr., vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silhosp. mashyn - Constr., Production and operation of agricultural machines, Vol.39*, 280-286 [in Ukrainian].
41. Bozhokin, S.V. & Parshin, D.A. (2001). Fraktaly i multifraktaly [Fractals and multifractals]. *Izhevsk: NITs "Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika" - Izhevsk: Research Center "Regular and Chaotic Dynamics"* [in Russian].
42. Ivanova, V.S., Balankin, A.S., Bunin, I.Zh. & Oksogoev, A.A. (1994). *Sinergetika i fraktaly v materialovedenii [Synergetics and fractals in materials science]*. Moscow: Nauka [in Russian].
43. Ivanova, V.S., Kuzeev, I.R. & Zakirnichnaya, M.M. (1998). *Sinergetika i fraktaly [Synergetics and fractals]*. Universalnosti mekhanicheskogo povedeniya materialov. Ufa: UGGTU [in Russian].
44. Mandelbrot, B. (2002). *Fraktalnaya geometriya prirody [Fractal geometry of nature]*. Moscow: Institut kompyuternykh issledovaniy [in Russian].
45. Aulin, V., Derkach, O., Makarenko, D., Hrynkiv, A., Pankov, A. & Tykhyi, A. (2019). Analysis of tribological efficiency of movable junctions "polymeric-composite materials-steel". *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 4 (12-100)*, 6-15 [in English].
46. Aulin, V.V., Derkach, O.D., Kabat, O.S., Makarenko, D.O., Hrynkiv, A.V. & Krutous, D.I. (2020). Application of polymer composites in the design of agricultural machines for tillage. *Problems of Tribology, Vol.25, 2/96-2020*, 49-58 [in English].
47. Aulin, V., Kobets, A., Derkach, O., Makarenko, D., Hrynkiv, A., Krutous, D. & Muranov, E. (2020). Design of mated parts using polymeric materials with enhanced tribotechnical characteristics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 5 (12-107)*, 49-57 [in English].
48. Aulin, V., Derkach, O., Makarenko, D., Hrynkiv, A., Krutous, D. & Muranov, E. (2020). Development of a system for diagnosing bearing assemblies with polymer parts during operation. *Technology audit and production reserves, 5/1(55)*, 18-20 [in English].
49. Melnichenko, I.M. (1992). Vosstanovlenie i povyshenie dolgovechnosti podshipnikoviykh uzlov selskohozyaystvennoy tekhniki s ispolzovaniem kompozitsionnykh materialov i pokrytiy [Restoration and increase in the durability of bearing units of agricultural machinery using composite materials and coatings]. *Extended abstract of doctor's thesis*. Chelyabinsk [in Russian].
50. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V., Smal, V.V., Lysenko, S.V., Pashynskiy, M.V., Katerynych, S.E. & Livitskiy, O.M. (2021). Basic approaches and requirements for the design of tribological polymer composite materials with high-modulus fillers. *Problems of Tribology, Vol. 26, 4/102-2021*, 51-60 [in English].
51. Aulin, V.V. (2006). Vplyv kharakterystyk komponentiv kontaktuiuchykh kompozytsiinykh materialiv i pokryttiv na parametry ta vlastyvoli zony tertia [Influence of characteristics of components of contacting composite materials and coatings on parameters and properties of friction zone]. *Problemy trybolohii - Problems of tribology, 4 (42)*, 110-112 [in Ukrainian].
52. Aulin, V.V. (2012). Deiaki zakonamirnosti znoshuvannia elementiv trybosystemy "ROHM-grunt" [Some regularities of wear of elements of tribosystem "ROGM-soil"]. *Olviiskiy forum-2012 - Olbia Forum-2012: zb. tez materialiv mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 6-10 chervnia 2012, Yalta., t.*

12, 57-59 [in Ukrainian].

Viktor Aulin, Prof., Dr. tech. sci., **Andrey Hrinkiv**, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Serhii Lysenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Livitskyi**, Ph.D. tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Andrii Babii, Assoc. Prof., Dr. tech. sci.

Ivan Pulyuy Ternopil National Technical University, Ternopil, Ukraine

Regularities of Influence of High-modulus Fillers on the Distribution of Stress Fields in the Surface Layers of Machine Parts Made of Polymer Composite Materials

In this paper, based on computer simulation of contact interaction of conjugations of samples (parts) loaded with friction, the main changes in the distribution of stress fields in the contact regions of homogeneous and heterogeneous (composite) polymeric materials are revealed. Stress fields were investigated under both static and dynamic load conditions. The focus was on identifying areas with maximum tangential stresses $\tau_{\max}$, their configuration and depth. The theory of N.P. Suh, which concerns the origin of destructive processes in the materials of samples and parts, is initiated by the presence of zones of maximum tangential stresses at a certain depth of the surface layer.

In the homogeneous polymeric material, four stress regions are detected: in the contact region α_3^{HDC} ; the contact area α_4^{HDC} ; in the field of aggregate contacts α_1^{HDC} ; in the area between the aggregate contacts α_2^{HDC} . It is shown that in the relative motion of the conjugations of the samples (parts) the depth of the local areas α_3^{HDC} and α_1^{HDC} , where $\tau_{\max}$ reaches the highest value and these areas remain in place, and areas α_2^{HDC} and α_4^{HDC} are mixed in operation closer to the surface. The change of configurations of these areas in the process of relative motion of conjugations of samples (details) is also revealed.

In the heterogeneous (composite) polymeric material with high-modulus fillers, three local areas were identified: in the filler ω_1^{HDC} ; between the fillers ω_2^{HDC} ; under the filler ω_3^{HDC} . It is determined that the contact load in the polymer composite material is transmitted through high-modulus fillers and is determined by their geometry and relative position. Significant danger is posed by cases when areas ω_2^{HDC} and ω_3^{HDC} are located at the same level from the surface of the sample (part), which can cause chipping of the filler. It is shown that the most effective is the operation of the part when the area ω_2^{HDC} is located deeper than ω_3^{HDC} . A criterion corresponding to the optimal volume content of high modulus filler, which is equal to the ratio of the average distance between centers of adjacent filler particles and their size. Relevant estimates of this criterion are given.

polymer composite materials, high modulus filler, synergetic concept, tribocouples, tangential stresses

Одержано (Received) 15.02.2022

Прорецензовано (Reviewed) 27.02.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

А.О. Головатий, асп.

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,
Україна*

e-mail: artemholovaty@ukr.net

Підвищення ефективності роботи машинобудівного підприємства на основі логістично-спрямованого підходу

На базі типового машинобудівного підприємства розглянуто проблему підвищення ефективності його функціонування використанням логістично-спрямованого підходу. Визначено основні процеси виробничої діяльності в рамках конкретного машинобудівного підприємства, на якому виділено виробничу, виробничо-збутову або постачальницько-виробничо-збутову системи. З'ясовані питання щодо створення на підприємстві логістичної системи та його логістичного управління в умовах логістичного оточення з урахуванням факторів макро-, мезо- і мікросередовища. Виходячи з логістично-спрямованого підходу побудовано структуру підприємства, визначена його логістична місія на кожному етапі виробничо-господарської діяльності. В рамках кібернетичного підходу ланку логістичної системи представлено як визначений елемент перетворення матеріальних і інформаційних потоків. Запропоновано векторне рівняння цього перетворення з урахуванням сукупності характерних векторів. Показано, що сукупність логістичних дій реалізується в постачальницькій, виробничій або збутовій сферах. Визначені критерії ефективного логістичного управління. Наведена їх реалізація на прикладі мінімуму загальних логістичних витрат і максимуму прибутку від виконаних усіх логістичних дій. Розглянуто формалізацію завдання ефективного логістичного управління на машинобудівному підприємстві за мінімізацією загальних логістичних витрат.

машинобудівне підприємство, логістична дія, логістична система управління, виробництво, критерії ефективності функціонування, логістично-спрямований підхід

Постановка проблеми. Нездатність конкурувати із зарубіжними виробниками, нестабільність зовнішнього середовища і відсутність сучасних заходів згладжування його негативного впливу на виробничо-господарську діяльність машинобудівного підприємства. Інструментарієм оцінки ефективності може бути організація і впровадження логістичної системи в рамках підприємства. При цьому забезпечується управління рухом матеріальних і інформаційних потоків. В рамках логістичної системи здійснюється логістичне управління на підприємствах, що дозволяє підвищити показники рентабельності і організаційно-економічної стійкості [1, 2].

Логістичне управління вимагає певного структурного підходу до подання ресурсів підприємства і постачальницько-виробничо-збутових процесів. Машинобудівне підприємство розглядається як система матеріальних та інформаційних потоків, що зв'язують споживача, виробника і постачальника ресурсів на всіх етапах виробничо-збутового циклу виробів [3-6]. Якщо розглядати велике машинобудівне підприємство, то логістичне управління, як система управління рухом потоків всіх видів, присутнє, але на інших підприємствах, в кращому випадку, використовуються елементи логістичного менеджменту. Відповідно до цього, нагальною є проблема використання логістично-спрямованого підходу, для підвищення ефективності підприємства [7-10].

Функціонування логістичної системи вимагає інформаційного забезпечення, оскільки процес управління являє собою послідовність актів прийняття рішень. Інформаційне забезпечення дозволяє виявити необхідність прийняття рішень, сформулювати набір альтернатив та сформулювати критерії і вибрати метод прийняття рішень, а також провести оцінку альтернатив і донести прийняте рішення до виконуючої підсистеми. Інформаційне забезпечення логістичної системи реалізує розвинену інформаційно-логістичну систему підприємства. При цьому завдання логістично-спрямованого підходу на практиці пов'язано з використанням програмного забезпечення, що підтримує рух інформаційних потоків, необхідних для підвищення ефективності машинобудівного підприємства на основі матеріальних потоків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підприємства галузевого машинобудування стикаються з низкою серйозних проблем: висока собівартість продукції; низька конкурентоспроможність товарів; дефіцит оборотних коштів; недоступність кредитів; цінові диспропорції на продукцію обробної промисловості і сировинних галузей [11-13]. Нездатність таких підприємств в Україні вирішувати зазначені проблеми свідчить про низький рівень їх організаційно-економічної стійкості [14-16].

Основною проблемою організаційно-економічної стійкості машинобудівного підприємства є істотне зростання собівартості виробленої продукції через підвищення вимог споживача до її якості. Саме низька ціна на продукцію в галузевому машинобудуванні є основною конкурентною перевагою у аналогічних виробів виробника перед західними партнерами [17-20]. Одним із першочергових заходів організаційно-економічної стійкості українських промислових підприємств є зниження собівартості виробів при високому рівні їх якості, що цілком задовольняють покупців споживчих властивостей.

Іншою серйозною проблемою для вітчизняних підприємств стала втрата додаткова перевага виробів машинобудування у європейського виробника у вигляді їх придатності до використання з іншими виробами, в силу сформованої в Україні системи стандартизації та практики уніфікації, що, в першу чергу, стосується засобів виробництва. На сьогоднішній день рівень зносу основних засобів виробничого призначення більшості підприємств (споживачів машинобудівної продукції) наближається до максимально допустимого значення. Вказана перевага втрачає сенс, тому що українським машинобудівним підприємствам необхідно практично повністю оновити виробниче обладнання [21-25]. У зв'язку з цим перед керівництвом машинобудівних підприємств постає нове завдання: необхідно випускати продукцію машинобудування, уніфіковану із західними аналогами, що відповідають міжнародним стандартам. Це звісно призведе до зростання собівартості продукції, а отже необхідно шукати шляхи зниження витрат на постачання, виробництво і збут продукції.

У передових країнах Європейського Союзу (ЄС) близько 93% всього часу постачальницько-виробничо-збутового (ПВЗ) циклу для виробів машинобудування приходить до проходження по різних каналах матеріально-технічного забезпечення та зберігання [26-29]. Для українських підприємств ця частина ПВЗ циклу займає 73...82% часу, в зв'язку з недостатнім застосуванням сучасних технологій на виробництві [27]. Частка витрат, яка припадає на вказану частину ПВЗ циклу, становить в середньому від 20% до 30% від кінцевої вартості виробу, що поставляється споживачеві [28-30]. Зазначимо, що для українських підприємств зі сформованою практикою організації виробництва ці цифри є вищими. Це свідчить про те, що оптимізація витрат, пов'язаних з рухом матеріалопотоку, принесе істотне зниження собівартості кінцевої продукції машинобудівного підприємства.

Однією з основних проблем низького рівня організаційно-економічної стійкості машинобудівних підприємств є стійкий дефіцит обігових коштів. У той же час, в формі запасів матеріалів, комплектуючих, напівфабрикатів і готових виробів постійно «заморожено» від 40% до 65% загального обсягу обігових коштів підприємства [30].

Слабкою стороною виробників машинобудівної продукції є практично повна відсутність її післяпродажного сервісу, що також знижує організаційно-економічну стійкість підприємства. Зазначені проблеми вирішуються шляхом формування логістичних систем на підприємствах. Впровадження логістичного управління дозволить значно скоротити всі види запасів матеріалів, комплектуючих і готової продукції, необхідних в процесі виробництва, постачання і збуту, прискорити обіговість капіталу, знизити собівартість виробництва і витрати при дистрибуції, забезпечити найбільш повне задоволення споживачів за показниками якості продукції та рівня сервісу [31-34].

Дані Європейської асоціації логістики свідчать, що застосування логістичних розробок дозволяє скоротити час виробництва товарів на 25%, знизити собівартість продукції до 30%, скоротити обсяги матеріально-технічних запасів на 30...70%. Реалізація наявних резервів у сфері поводження при застосуванні логістичного підходу за деякими оцінками дозволяє більш, ніж на 40% збільшити прибуток [35-38].

Аналіз провідних машинобудівних компаній західних країн дозволив виявити чотири послідовні стадії розвитку логістичних систем [39-62]:

Перша стадія - найменш досконала форма логістичних систем на підприємствах. Вона властива машинобудівним підприємствам, що працюють на основі змінно-добових планових завдань, для якої характерні наступні особливості:

- охоплює тільки організацію і зберігання готової продукції, що відправляється з підприємства, та її транспортування;
- діє за принципом безпосереднього реагування на щоденні коливання попиту і збоїв в процесі розподілу продукції;
- оцінку ефективності функціонування здійснюють на основі визначення частки витрат на транспортування і інші операції по розподілу продукції в загальній сумі виручки від продажу виробів.

Друга стадія логістичних систем характеризується ознаками:

- охоплює управління матеріальними потоками від останнього пункту виробничої лінії до кінцевого споживача;
- контролює такі функції: обслуговування замовника, обробка замовлень, зберігання готової продукції на підприємстві, управління запасами готової продукції, перспективне планування роботи системи логістики;
- якість функціонування логістичної системи оцінюється виходячи з виявлення відхилення між витратами, закладеними в кошторису і фактичними витратами.

Третя стадія логістичних систем цієї стадії притаманні наступні особливості:

- контролювання логістичних операцій від закупівлі сировини до обслуговування кінцевого споживача продукції;
- додаткове контролювання таких процесів: доставка сировини на підприємство, прогнозування збуту, виробниче планування, видобуток і закупівля сировини, управління запасами сировини, і запасами незавершеного виробництва, проектування систем логістики;
- якість функціонування визначається відповідністю стандартам обслуговування;
- управління здійснюється не за принципом безпосереднього реагування, а засновано на плануванні попереджувальних впливів.

Четверта стадія розвитку логістичних систем представляє найбільш досконалі системи, в основному, вони впроваджені на підприємствах і здійснюють свою діяльність на глобальному рівні, а не на національному та регіональному. Ця стадія характеризується такими ознаками:

- охоплює управління матеріальними і інформаційними потоками на всіх стадіях виробничо-збутового процесу;
- проявляє інтегрованість з операціями маркетингу, збуту, виробництва і фінансів,
- управління компанією здійснюється на основі довгострокового планування (понад одного року)
- якість функціонування логістичної системи визначається на основі міжнародних стандартів.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка теоретичних положень щодо організації та впровадження інформаційно-логістичної системи на машинобудівному підприємстві з використанням логістично-спрямованого підходу, вибір та обґрунтування критеріїв організації і оцінки функціонування інформаційно-логістичної системи.

Виклад основного матеріалу. На типовому галузевому машинобудівному підприємстві в процесі виробничої діяльності, як правило, виконуються наступні процеси:

- отримання замовлень на виробництво від споживачів;
- розробка конструкторської та технологічної документації на виріб, підготовка виробництва;
- здійснення закупівлі у постачальників і підрядників необхідних матеріальних ресурсів для виготовлення виробу;
- виробництво комплектуючих і вузлів виробів;
- виробництво товарної продукції;
- реалізація виробів споживачеві;
- здійснення післяпродажного сервісу.

Логістично-спрямований підхід до управління підприємством принципово відрізняється від традиційного управління рухом матеріальних ресурсів. Він полягає в потоко-орієнтованому поданні постачальницько-виробничо-збутового процесу. В рамках логістично-спрямованого підходу узагальнено галузеве машинобудівне підприємство представляється у вигляді системи потоків двох різних типів: матеріальних та інформаційних. При цьому до матеріальних потоків при такому рівні поділу відносяться фінансові та енергетичні потоки, ініційовані людським фактором.

Під логістичним управлінням підприємством будемо розуміти управління рухом матеріальних і інформаційних потоків в просторі і в часі від їх первинного джерела до кінцевого споживача з метою досягнення підприємством поставлених цілей.

Структура матеріальних та інформаційних потоків на галузевому машинобудівному підприємстві в процесі його виробничої діяльності представлена на рис.1.

Можливо по діям виробництва і продажу виробів виділити три сфери: постачальницьку, виробничу і збутову. Залежно від того, які саме сфери діяльності здійснюються в рамках конкретного машинобудівного підприємства, воно представляє з себе: виробничу систему; виробничо-збутову систему; постачальницько-виробничо-збутову систему.

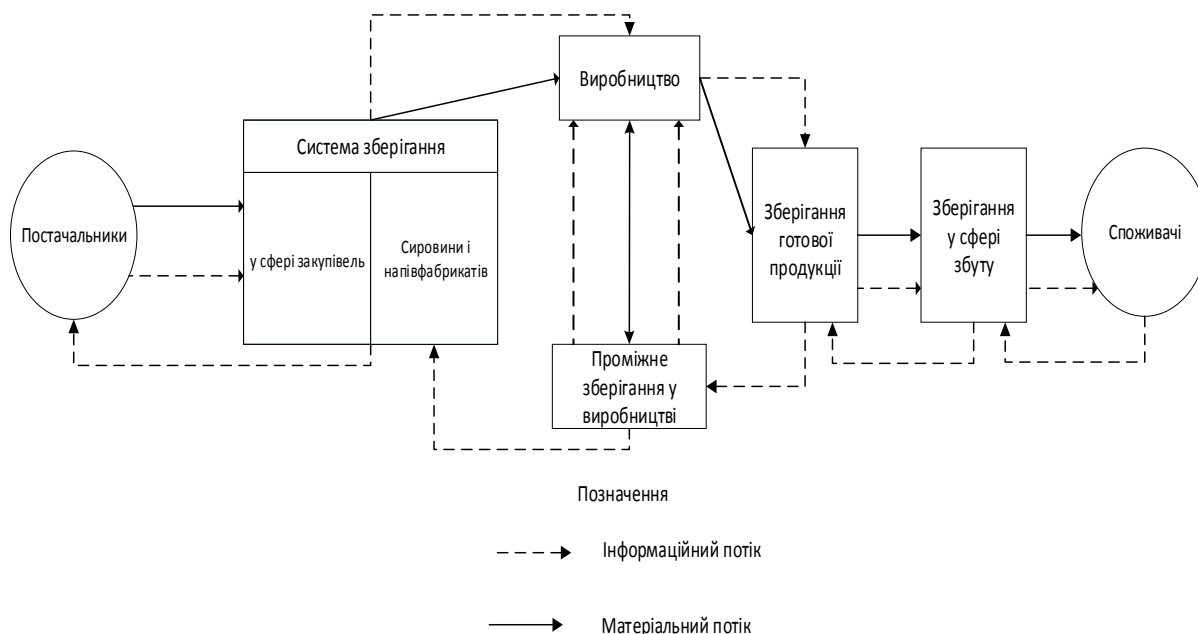


Рисунок 1 – Структурна схема логістико-спрямованого представлення галузевого машинобудівного підприємства

Джерело: розроблено автором

Щоб реалізувати логістичне управління на підприємстві слід сформувати на ньому логістичну систему – як складну, структуровану економічну систему, що складається з взаємозв'язаних в єдиному процесі управління елементів – ланок і зв'язуючих потоків (матеріальних та інформаційних), що функціонує відповідно до поставлених цілей логістичного управління [28, 38, 48]. Логістична система підприємства функціонує в умовах логістичного оточення. Його утворюють фактори макро-, мезо- і мікросередовища. До факторів макросередовища відносяться такі чинники [27, 48, 49]: політичні, правові, економічні, технологічні і технічні, соціальні, екологічні.

До факторів мікросередовища відносяться: розробка нових виробів, виробництво, маркетинг, фінанси, трудові ресурси, вищий менеджмент.

У процесі функціонування машинобудівного підприємства відповідно до місії і побудованої на її підставі системи цілей [3, 12] виробляється його логістична місія. Найбільш часто це така місія: забезпечення наявності потрібного продукту в необхідній кількості та заданої якості в потрібному місці у встановлений час для конкретного споживача за встановленою ціною [19, 20]. Згідно зазначеної місії необхідно на кожному етапі виробничо-господарської діяльності контролювати якість продукції, що випускається, номенклатура продукції, терміни виконання операцій і пов'язані з цим витрати. На основі логістичної місії, системи цілей підприємства в цілому і обмежень зовнішнього і внутрішнього середовища [22, 26] виробляється система цілей логістичного управління.

Ланкою логістичної системи є відокремлений в ній об'єкт, що не підлягає подальшій декомпозиції при вирішенні поставлених логістичних завдань, що виконує свою локальну цільову функцію, пов'язану з певними логістичними діями [57, 59].

В рамках кібернетичного підходу ланку логістичної системи можна представити як визначений елемент, що перетворює матеріальні і інформаційні потоки (рис.2):



Рисунок 2 – Схема ланки логістичної системи, як перетворювача потоків

Джерело: розроблено автором

Векторне рівняння перетворень для даної ланки логістичної системи має вигляд:

$$\vec{M}', \vec{I}', \vec{F}' = \xi(\vec{Z}, \vec{V}, \vec{I}, \vec{F}, \vec{Y}, \vec{X}), \quad (1)$$

де $\vec{M} = (m_1, m_2, \dots, m_k)$ – вектор параметрів вхідного матеріального потоку з числом компонентів k ;

$\vec{M}' = (m'_1, m'_2, \dots, m'_k)$ – вектор параметрів вихідного матеріального потоку;

$\vec{I} = (i_1, i_2, \dots, i_n)$ – вектор параметрів вхідного інформаційного потоку з числом компонентів n ;

$\vec{I}' = (i'_1, i'_2, \dots, i'_k)$ – вектор параметрів вихідного інформаційного потоку;

$\vec{Z} = (z_1, z_2, \dots, z_r)$ – вектор параметрів альтернативних рішень з числом компонентів r ;

$\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_v)$ – вектор параметрів стану ланок логістичної системи з числом компонентів v ;

$\vec{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_s)$ – вектор зовнішніх заперечень (взаємодія зовнішнього середовища) з числом компонентів s ;

$\vec{F} = (f_1, f_2, \dots, f_\omega)$ – вектор параметрів вхідного відображення потоку, з числом компонентів ω ;

$\vec{F}' = (f'_1, f'_2, \dots, f'_\omega)$ – вектор параметрів вихідного відображення потоку.

Частина параметрів вектора $\vec{I}$ являє собою керуючу інформацію, що надходить від суб'єктів управління в ланку логістичної системи. Будь-яка дія, пов'язане з виникненням, перетворенням або поглинанням матеріального потоку та інформаційного потоку є логістичною дією. Множина ланок логістичної системи (логістичний ланцюг), лінійно впорядкована з матеріального або інформаційного потоку з метою аналізу або синтезу певного набору логістичних дій і (або) витрат. [52, 59]. Сукупність логістичних дій, що реалізується в постачальницькій, або виробничій, або збутовій сферах є базисними логістичними діями.

В якості критеріїв логістичного управління машинобудівним підприємством можуть бути: мінімум загальних логістичних витрат; максимум прибутку від виконання всіх логістичних дій; мінімальне відхилення в термінах виконання логістичних циклів;

максимальну якість споживчого сервісу [48, 20]. Мінімум загальних логістичних витрат можна оцінити за формулою:

$$C=(C_1+C_2+P_1+P_2)\rightarrow\min, \quad (2)$$

$$\text{де} \quad C_1=C_{\text{пост}}+C_{\text{вир}}+C_{\text{зб}}, \quad (3)$$

C_1 – витрати на всі логістичні дії;

$C_{\text{пост}}$ – витрати при виконанні базисного логістичного дії постачання;

$C_{\text{вир}}$ – витрати при виконання базисного логістичного дії виробництва;

$C_{\text{зб}}$ – витрати при виконання базисного логістичного дії збуту;

C_2 – витрати на здійснення логістичного адміністрування (оплата праці логістичного персоналу, витрати на організацію інформаційно-логістичних систем, і інших засобів підтримки логістичної діяльності);

P_1 – втрати від іммобілізації засобів в запасах;

P_2 – збиток від недостатнього рівня якості логістичних менеджменту і сервісу.

Максимум прибутку від виконаних усіх логістичних дій дорівнює:

$$U=(\Delta D-\Delta C)\rightarrow\max, \quad (4)$$

де $\Delta D=D_2-D_1$ – приріст доходу від реалізації продукції в зв'язку з виконанням всіх логістичних дій від початкового рівня - D_1 до кінцевого рівня D_2 ;

$\Delta C=C_2-C_1$ – приріст витрат на виконання логістичних дій і на логістичне адміністрування від початкового рівня - C_1 до кінцевого рівня - C_2 .

Найбільш поширеним завданням логістичного управління на машинобудівному підприємстві є мінімізація загальних логістичних витрат при дотриманні рівня логістичного сервісу не нижче встановленого.

Розглянемо формалізацію цього завдання. Нехай в процесі логістичного управління необхідно прийняти v логістичних рішень, тоді вектор $\bar{X}=(x_1, \dots, x_v)$ описує один з варіантів сукупності прийняття рішень. При цьому маємо альтернативи при прийнятті i -го рішення, $x_i \in [1, 2, \dots, l_i]$, де l_i – кількість альтернатив для i -го логістичного рішення. Загальні логістичні витрати $C(\bar{X})$ складуть:

$$C(\bar{X})=(C_1(\bar{X})+C_2(\bar{X})+P_1(\bar{X})+P_2(\bar{X})), \quad (5)$$

$$\text{де} \quad C_1(\bar{X})=C_{\text{пост}}(\bar{X})+C_{\text{вир}}(\bar{X})+C_{\text{зб}}(\bar{X}), \quad (6)$$

$C_1(\bar{X})$ – витрати на всі логістичні дії за умови здійснення логістичного управління, що описується вектором $(\bar{X})$ логістичних рішень;

$C_{\text{пост}}(\bar{X})$ – витрати при виконанні базисного логістичного дії - постачання, за умови здійснення логістичного управління, описується вектором $(\bar{X})$ логістичних рішень;

$C_{\text{вир}}(\bar{X})$ – витрати при виконання базисного логістичного дії виробництво, за умови здійснення логістичного управління, описуваного вектором $\bar{X}$ логістичних рішень;

$C_{\text{зб}}(\bar{X})$ – витрати при виконання базисного логістичного дії збут, за умови здійснення логістичного управління, описуваного вектором $\bar{X}$ логістичних рішень;

$C_2(\bar{X})$ – витрати на здійснення логістичного адміністрування (оплата праці логістичного персоналу, витрати на організацію інформаційно-логістичних систем, і інших засобів підтримки логістичної діяльності), за умови здійснення логістичного управління, описуваного вектором – $\bar{X}$ логістичних рішень;

$P_1(\vec{X})$ – втрати від іммобілізації засобів в запасах, за умови здійснення логістичного управління, описуваного вектором $\vec{X}$ логістичних рішень;

$P_2(\vec{X})$ – збиток від недостатнього рівня якості логістичного менеджменту, за умови здійснення логістичного управління, описуваного вектором $\vec{X}$ логістичних рішень.

Тоді рівняння завдання логістичного управління має вигляд:

$$C(\vec{X}) = (C_1(\vec{X}) + C_2(\vec{X}) + P_1(\vec{X}) + P_2(\vec{X})) \rightarrow \min, \quad (7)$$

$$\begin{cases} \tau_{jk}(\vec{X}) \leq \tau_{jk}^*; \\ M_{jk}(\vec{X}) = M_{jk}^*; \\ N(\vec{X}) = N^*; \\ n_j(\vec{X}) = n_j^*; \\ \rho_{jk}(\vec{X}) \geq \rho_{jk}^*; \\ \chi_{jk}(\vec{X}) \geq \chi_{jk}^*; \\ C(\vec{X}) \leq C^{\Gamma}, \quad j \in [1, 2, \dots, N], k \in [1, 2, \dots, n_j], \end{cases} \quad (8)$$

де $\tau_{jk}(\vec{X})$ – дата отримання k -го виробу j -ї номенклатури споживачем при логістичному управлінні $\vec{X}$;

τ_{jk}^* – дата отримання k -го виробу j -ї номенклатури споживачем згідно з наказу або реальним попитом;

$M_{jk}(\vec{X})$ – місце розташування пункту передачі k -го виробу j -ї номенклатури споживачеві при логістичному управлінні $\vec{X}$;

M_{jk}^* – місце розташування пункту отримання k -го виробу j -ї номенклатури споживачу відповідно до його замовленням або реальним попитом;

$N(\vec{X})$ – кількість видів номенклатури виробів при логістичному управлінні $\vec{X}$;

N^* – кількість видів номенклатури виробів в рамках спеціалізації і з урахуванням максимальних виробничих потужностей підприємства, щоб забезпечити замовлення споживачів або реальний попит;

$n_j(\vec{X})$ – кількість виробів j -ї номенклатури, які випускаються на промисловому підприємстві при логістичному управлінні $\vec{X}$;

n_j^* – кількість виробів j -ї номенклатури в рамках спеціалізації і з урахуванням максимальних виробничих потужностей підприємства, щоб забезпечити замовлення споживачів або реальний попит;

$\rho_{jk}(\vec{X})$ – показник якості k -го виробу j -ї номенклатури відповідно до логістичного управління $\vec{X}$;

ρ_{jk}^* – показник якості k -го виробу j -ї номенклатури відповідно до вимог споживачів;

$\chi_{jk}(\vec{X})$ – показник рівня післяпродажного сервісу для k -го виробу j -ї номенклатури при логістичному управлінні $\vec{X}$;

χ^*_{jk} – показник рівня післяпродажного сервісу для k -го виробу j -ої номенклатури відповідно до вимог споживачів;

C^{TP} – гранично допустиме максимальне значення загальних логістичних витрат, виходячи з цін продажів на аналогічні вироби, що склалися на ринку.

В результаті вирішення зазначеного завдання вибирається деякий оптимальний варіант логістичного управління $\overline{X^{opt}}$.

Слід також зауважити, що функція логістики на підприємстві взаємодіє з багатьма іншими функціями: маркетингу, фінансів, управління персоналом та ін. Для цих функцій здійснення сукупності логістичних дій дозволяє реалізувати ті чи інші функціональні стратегії.

Висновки.

1. Розглянуто сукупність процесів виробничої діяльності на машинобудівному підприємстві. Обґрунтовано, що в рамках логістико-спрямованого підходу підприємство доцільно уявити як систему матеріальних і інформаційних потоків, а по логістичним діям виробництва і продажу виробів виділити постачальницьку, виробничу і збутову сфери діяльності.

2. Розроблено схему логістико-спрямованого представлення підприємства галузевого машинобудування для ефективного логістичного управління. Визначено логістичну місію, систему цілей підприємства в цілому і обмеження зовнішнього і внутрішнього середовища.

3. В системі логістичного управління розглянуто і кібернетичний підхід для ланок логістичної системи, які перетворюють матеріальні і інформаційні потоки. Отримано векторне рівняння перетворень із залученням множини векторів вхідного і вихідного, матеріального і інформаційного потоків, а також потоків в самій ланці в структурі машинобудівного підприємства.

4. Наведено критерії ефективності логістичних дій та логістичного управління машинобудівним підприємством. Теоретично обґрунтовано оцінки мінімуму логістичних витрат та максимуму прибутку від виконаних логістичних дій.

5. Формалізовано завдання ефективного логістичного управління на машинобудівному підприємстві: мінімізація загальних логістичних витрат при дотриманні рівня логістичного сервісу не нижче встановленого.

Список літератури

1. Азоев Г. Л. Конкуренция: Анализ, стратегия и практика. Москва: Центр экономики и маркетинга, 1996.
2. Алькема В.Г. Система економічної безпеки логістичних утворень: монографія. Київ: Дорадо-Друк. 2011. 470 с.
3. Амелюкін В.І. Теоретичні засади функціонування логістичної системи підприємства. *Вісник Бердянського університету менеджменту і бізнесу. Економіка та підприємництво*. 2009. № 4 (8). С. 46-49.
4. Амитан В.Н., Ларина Р.Р., Пилюшенко В.Л. Логістизація процесів в організаційно-економічних системах. Донецьк: ТОВ "Юго-Восток, ЛТД", 2003. 73 с.
5. Аулін В.В., Великодний Д.В. Основні фактори планування та оцінка ефективності транспортно-логістичних систем в АПК. *Перспективні напрями розвитку регіональних транспортних та логістичних систем: 2018 рік*: матеріали Міжнародної науково-практичної конф., 22-23 травня 2018 р. Харків: ХНАДУ, 2018. С.113-116.
6. Аулін В.В., Великодний Д.О. Моделювання ланцюга постачання в транспортно-логістичній системі. *Проблеми з транспортними потоками і напрями їх розв'язання*: зб. мат доповідей учасників 3-ої Всеукр. наук.теор. конф. Дрогобич.: Посвіт, 2019. С.68-69.
7. Аулін В.В., Великодний Д.О., Голуб Д.В., Дьченко В.О. Підвищення ефективності управління логістичним ланцюгом постачання в транспортній системі. *Крамаровські читання*: зб. мат доповідей учасників VI Міжнародної науково-технічної конференції. Київ: НУБіП, 2019. С. 195-198.

8. Аулін В.В., Головатий А.О. Вплив виробничо-технічної бази автотранспортного підприємства на ефективність його роботи та використання парку машин. *Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту*: зб. матеріалів доп. учасн. міжнародної науково-практичної інтернет-конф. Кропивницький: ЦНТУ, 2018. С.201-206.
9. Аулін В.В., Головатий А.О. Ефективність створення та функціонування логістичних систем на АТП. *Підвищення надійності машин і обладнання*: зб. мат. доповідей учасн. XII Всеукраїнської науково-практичної конф. Кропивницький: ЦНТУ, 2018. С. 71-73.
10. Аулін В.В., Головатий А.О. Логістичний підхід в підвищенні ефективності функціонування транспортної системи, на прикладі АТП. *Підвищення надійності машин і обладнання*: збірник мат. доповідей учасн. X Всеукраїнської науково-практичної конф. Кіровоград: КНТУ, 2016. С.42-45.
11. Алькема В.Г., Кудренко С.О. Територіальна організація регіональної логістичної інфраструктури. *Управління проектами та розвиток виробництва*. 2014. №1(49). С. 157-172. URL: <http://pmdp.org.ua> (дата звернення:)
12. Ареф'єва О.В., Прохорова В.В. Управління розвитком економічних систем: теорія, механізми регулювання та управління: монографія. Харків: УкрДАЗТ, 2010. 301 с.
13. Аулін В.В., Замота О.М. Економічне обґрунтування ефективності та рентабельності використання транспортних засобів на АТП. *Вісник інж. академії України*. 2014. №1. С. 160-164.
14. Аулін В.В., Голуб Д. В., Гриньків А.В. Концептуальний підхід дослідження функціонування транспортних систем. *Перспективні напрями розвитку регіональних транспортних та логістичних систем*: матеріали Міжнародної науково-практичної конф., 22-23 травня 2018 р. Харків: ХНАДУ, 2018. С.14-17.
15. Аулін В.В., Голуб Д., Замуренко А. Підвищення ефективності транспортного процесу формування інформаційних потоків в системі перевезень вантажів. *Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем*: матеріали II-ї Міжнародної науково-технічної інтернет-конф., 25-27 березня 2020 р. Рівне : НУВГП, 2020. С. 41-43.
16. Аулін В.В., Солових А.Є., Дігтяр Б. Економіко-математичне модулювання процесів управління підприємством в умовах господарського ризику і невизначеності. *Наук. праці КДТУ. Екон. науки*. 2000. Вип.8. С.151-156.
17. Бондаренко О.С. Сучасні підходи до класифікації логістики на підприємствах України. *Економічні науки. Сер. Економіка та менеджмент*. Луцьк, 2010. Вип. 7(26), ч. 1 URL: [/www.nbu.gov.ua/portal/soc_gum/en_em/2010_7_1/12.pdf](http://www.nbu.gov.ua/portal/soc_gum/en_em/2010_7_1/12.pdf).
18. Бродецкий Г.Л. Системный анализ в логистике. Выбор в условиях неопределенности: ученик. Москва, 2010. 336 с.
19. Вольвач І. Ю. Досвід впровадження логістичної концепції виробництва "Just-in-time". *Вісник Хмельницького нац. ун-ту. Економічні науки*. 2009. Vol. 4. № 2. С. 250-253.
20. Григорак М.Ю. Логістичне управління зворотними матеріальними потоками виробничого підприємства. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. 2011. № 5(159). Ч. 2. С. 232-236.
21. Карп І.М. Теоретичні основи мікрологістичної системи. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2011. № 1. С. 223-227.
22. Кацьма В.І. Сутність та роль логістичного управління в системі управління підприємством. *Економічний аналіз*. 2016. Т. 23, № 2. С. 60-65.
23. Крикавський, Є. В. Логістичне управління: Львів: Вид-во Нац. ун-ту „Львівська політехніка”, 2005. 684 с.
24. Методологічні і теоретичні основи забезпечення та підвищення надійності функціонування автомобільних транспортних систем: монографія / Аулін В.В. та ін. ; під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. Кропивницький: ТОВ "КОД", 2017. 370 с.
25. Методологічні основи проектування та функціонування інтелектуальних транспортних і виробничих систем: монографія / Аулін В.В. та ін.; під заг. ред. В.В. Ауліна. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2020. 428с.
26. Окландер М.А. Логістична система підприємства: монографія. Одеса: Астропринт, 2004. 312 с.
27. Пальчик І.М. Логістичне управління підприємством – теоретико-методичний аспект. Електронне видання Ефективна економіка. 2014, № 10. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=3442> (дата звернення: 10.01.2022)
28. Аулін В.В., Гриньків А.В., Головатий А.О. Кіберфізичний підхід при створенні, функціонуванні та удосконаленні транспортно-виробничих систем. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. Вип. 3(34). С.331-343.
29. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Антощенко Є.В. Необхідність стратегічного розвитку транспортної логістики в Україні. *Підвищення надійності машин і обладнання. Increase of Machine*

- and Equipment Reliability*: матеріали 1-ої Міжнародної науково-практичної конф., 17-19 квітня 2019 р. Кропивницький : ЦНТУ, 2019. С.280-281.
30. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Головатий А.О., Голуб Д.В. Теоретичні і методологічні основи логістики транспортної і виробничої системи : монографія, під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. Кропивницький: видавець Лисенко С.В., 2021. С.504.
31. Аулін В.В., Голуб Д.В. Забезпечення ефективності функціонування транспортних систем шляхом підвищення надійності структурнофункціональних резервних схем процесу доставки. *Наука - виробництву-2019*: зб. мат доповідей учасників І наукової конф. Кропивницький: ЦНТУ, 2019. С. 17-20.
32. Аулін В.В., Голуб Д.В., Дьяченко В.О. Підвищення ефективності функціонування підприємств сільськогосподарського виробництва на основі логістичного підходу. *Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки*: матеріали XI Міжнародної науково-практичної конф. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. С. 232.
33. Аулін В.В., Голуб Д.В., Лисенко С.В., Гриньків А.В., Дьяченко В.О., Замуренко А.С. Теоретичний підхід до оцінки ймовірностей безвідмовної роботи транспортних та виробничих систем і ланцюгів постачань на основі їх логічних структурних схем надійності. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. Вип. 3(34). С.290-304.
34. Аулін В.В., Гриньків А.В., Головатий А.О. Інтелектуальні транспортні системи як результат впровадження інноваційних ефективних технологій. *Підвищення надійності машин і обладнання. Increase of Machine and Equipment Reliability: 2020 рік*: матеріали Міжнародної науково-практичної конф., 15-17 квітня 2020 р. Кропивницький : ЦНТУ, 2020. С.207.
35. Більовський К.Е. Стан та перспективи розвитку ринку логістичних послуг в Україні. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2016. Т. 2, № 4. С. 25-29.
36. Величко О.П. Удосконалення методики критеріального аналізу в системі логістичного сервісу. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету*. 2007. № 2. С. 158-162.
37. Аулін В.В. та ін. Використання економіко-математичного моделювання та інформаційних технологій для забезпечення ефективного управління регіональної економіки. *Нові інформаційні технології навчання в навчальних закладах України*. 2001. Вип.7. С.236-239.
38. Крикавський Є.В., Кубів С.І. Логістичний продукт та логістична послуга. Економіка логістичних систем: монографія / за ред. Є. Крикавського та С. Кубіва. Львів: Вид-во Національного університету "Львівська політехніка", 2008. С. 122-136.
39. Аулін В.В., Великодний Д.О., Голуб Д.В., Дьяченко В.О., Головатий А.О. Стан та стратегічні цілі логістики автомобільного транспорту України. *Підвищення надійності машин і обладнання. Increase of Machine and Equipment Reliability*: матеріали 1-ої Міжнародної науково-практичної конф., 17-19 квітня 2019 р. Кропивницький : ЦНТУ, 2019. С.285-288.
40. Аулін В.В., Великодний Д.О., Довгий А.О., Галінський Є.С. Стратегія сталої логістики для України на період до 2030 року. загальні вимоги до транспортної логістики. *Підвищення надійності машин і обладнання. Increase of Machine and Equipment Reliability*: матеріали 1-ої Міжнародної науково-практичної конф., 17-19 квітня 2019 р. Кропивницький : ЦНТУ, 2019. С.282-284.
41. Аулін В.В., Великодний Д.О., Дьяченко В.О. Оптимізація і управління ресурсами в транспортно-логістичній системі АПК. *Наукові нотатки*. 2018. №62. С.8-11.
42. Аулін В.В., Голуб Д.В. Реалізація фізико-інформаційного підходу дослідження проблеми підвищення надійності та ефективності функціонування транспортних систем. *Вестник ХНАДУ*. Вип. 81, 2018. С.21-28.
43. Аулін В.В., Гриньків А.В., Кіберфізичний підхід в дослідження стану технічних систем. *Підвищення надійності машин і обладнання. Increase of Machine and Equipment Reliability*: матеріали Міжнародної науково-практичної конф., 15-17 квітня 2020 р. Кропивницький: ЦНТУ, 2020. С.168-169.
44. Аулін В.В., Дігтяр Б.С., Цвігун Н.М. Використання математичного моделювання для оцінки ефективності функціонування фінансового механізму. *Наукові записки. Сер. Математичні науки*. 2006. Вип. 65. С.8-17.
45. Аулін В.В., Іващук В.О., Каськов В.С. Моделювання системи рейтингового управління. *Теорія і практика перебудови економіки*. 2000. С.107-109.
46. Афанасенко И. Д. Теория логистики и концепция уровней. *Инновации в коммерции и логистике*. 2009. Вип. 8, ч. 1. С. 25-31.
47. Воронкова А.Э. Гармонизация материальных потоков промышленного предприятия. *Економіка. Менеджмент. Підприємство*, 2002. № 8. С.129-133.
48. Гуржій Н.М., Оверченко А.І. Оцінка логістичного потенціалу підприємства як основа вибору його логістичної стратегії. Миколаївський національний університет імені В.О. Сухомлинського. 2016. Вип. 13. С.244-248.

49. Кожина О.М. Теоретичне обґрунтування поняття матеріальних ресурсів як об'єктів управління. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. 2002. № 446. С. 47-51.
50. Регіональні логістичні системи: теорія та практика: монографія / З.В. Герасимчук, Л.Л. Ковальська, Н.В. Хвищун, О.Д. Мороз. Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2011. 264 с.
51. Ястремська, О. М. Інвестиційна діяльність промислових підприємств: методологічні та методичні засади : Монографія. Харків : ВД "ІНЖЕК". 2004. 488 с.
52. Шевців Л.Ю., Петецький І. Логістичні витрати підприємства: формування та оцінювання: монографія. Львів: Видавництво "Львівської політехніки", 2011. 244 с.
53. Aulin V., Lyashuk, O., Pavlenko, O., Velykodnyi, D. et al. Realization of the Logistic Approach in the International Cargo Delivery System. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*. 2019. Vol. 21. № 2. P. 3-12.
54. Aulin V., Lyashuk O., Pavlenko O., Velykodnyi D., Hryniv A., Lysenko S., Holub D., Vovk Y., Dzyura V., Sokol M. Realization of the logistic approach in the international cargo delivery system. *Communication - Scientific Letters of the University of Zilina*. 2019. Vol.21 (2), P. 5-14.
55. Aulin, V., Hryniv, A., Lyashuk, O., Vovk, Y., et al. Increasing the Functioning Efficiency of the Working Warehouse of the "UVK Ukraine" Company Transport and Logistics Center. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*. 2020. Vol. 22. №2, P. 3-14.
56. Galkin A. System approach for logistics distribution network's organization and planning. *International journal of automation, control and intelligent systems*. 2015. Vol. 1. № 2. P. 27-33
57. Logistic model. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Logistic_model.
58. Viktor Aulin, Denis Velykodnyi, Viktoriya Dyachenko Concept of development and formation of transportlogistic systems in the agroindustrial complex. *Modern Management: Logistics and Education*. 2018. P.165-169.
59. Grygorak M.Y. Comparison of economic indicators of using the Ukrainian logistics potential. *Technological audit and production reserves*. 2017. № 3/5(35). С. 49-57.
60. Hayaloglu P. The impact of developments in the logistics sector on economic growth: the case of OECD countries. *International journal of economics and financial ssues*. 2015. Vol. 5, № 2. P. 523-530.
61. Taniguchi, E. Thompson R. G. Yamada T. New opportunities and challenges for city logistics. *Transportation research procedia*. 2016. №12. P. 112-125.
62. Trade logistics the global economy. URL: https://wb-lpi-media.s3.amazonaws.com/LPI_Report_2016.pdf

References

1. Azoiev, G.L. (1996). *Konkurenciya: Analiz, strategiya i praktika* [Competition: Analysis, Strategy and Practice]. Moscow: Centr ekonomiki i marketinga [in Russian].
2. Alkema, V.H. (2011). *Systema ekonomichnoi bezpeky lohistychnykh utvoren* [Theoretical principles of functioning of the logistics system of the enterprise]. Kyev: Dorado-Druk [in Ukrainian].
3. Amelkin, V.I. (2009). Teoretychni zasady funktsionuvannya lohistychnoi systemy pidpriemstva [Theoretical principles of functioning of the logistics system of the enterprise]. *Visnyk Berdianskoho universytetu menedzhmentu i biznesu. Ekonomika ta pidpriemnytstvo*. 4 (8), 46-49 [in Ukrainian].
4. Amytan, V.N., Laryna, R.R. & Pyliushenko, V.L. (2003). *Lohistyziatsiia protsesiv v orhanizatsiino-ekonomichnykh systemakh* [Logistics of processes in organizational and economic systems]. Donetsk: TOV "Iuho-Vostok, LTD" [in Ukrainian].
5. Aulin, V.V. & Velykodnyi, D.V. (2018). Osnovni faktory planuvannya ta otsinka efektyvnosti transportno-lohistychnykh system v APK [The main factors of planning and evaluation of the efficiency of transport and logistics systems in agriculture]. *Perspektyvni napriamy rozvytku rehionalnykh transportnykh ta lohistychnykh system: 2018 rik: materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konf., 22-23 travnia 2018 r.* Kharkiv: KhNADU, S.113-116 [in Ukrainian].
6. Aulin, V.V. & Velykodnyi, D.O. (2019). Modeliuvannya lantsiuha postachання v transportno-lohistychnii systemi [Supply chain modeling in the transport and logistics system]. *Problemy z transportnymy potokamy i napriamy yikh rozv'iazannia: zb. mat dopovidei uchasnykiv 3-oi Vseukr. nauk.teor. konf. Drohobych.: Posvit, S.68-69* [in Ukrainian].
7. Aulin, V.V., Velykodnyi, D.O., Holub, D.V. & Dchenko, V.O. (2019). Pidvyshchennia efektyvnosti upravlinnia lohistychnym lantsiuhom postachання v transportnii systemi [Improving the efficiency of logistics supply chain management in the transport system]. *Kramarovski chytannia: zb. mat dopovidei uchasnykiv VI Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii*. Kyiv: NUBiP, S. 195-198 [in Ukrainian].
8. Aulin, V.V. & Holovatyi, A.O. (2018). Vplyv vyrobnycho-tekhnichnoi bazy avtotransportnoho pidpriemstva na efektyvnist yoho roboty ta vykorystannia parku mashyn [Influence of production and

- technical base of motor transport enterprise on efficiency of its work and use of fleet of machines]. *Innovatsiini tekhnologii rozvytku ta efektyvnosti funktsionuvannia avtomobilnoho transportu*: zb. materialiv dop. uchasn. mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konf. Kropyvnytskyi: TsNTU. S.201-206 [in Ukrainian].
9. Aulin, V.V. & Holovaty, A.O. Efektyvnist stvorennia ta funktsionuvannia lohistychnykh system na ATP. Pidvyshchennia nadiinosti mashyn i obladnannia [Efficiency of creation and functioning of logistics systems at ATP]: zb. mat. dopovidei uchasn. KhII Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konf. Kropyvnytskyi: TsNTU, 2018. S. 71-73 [in Ukrainian].
 10. Aulin, V.V. & Holovaty, A.O. (2016). Lohistychnyi pidkhid v pidvyshchenni efektyvnosti funktsionuvannia transportnoi systemy, na prykladi ATP [Logistic approach in improving the efficiency of the transport system, on the example of ATP]. *Pidvyshchennia nadiinosti mashyn i obladnannia*: zbiryk mat. dopovidei uchasn. Kh Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konf. Kirovohrad: KNTU, S.42-45 [in Ukrainian].
 11. Alkema, V.H. & Kudrenko, S.O. (2014). Terytorialna orhanizatsiia rehionalnoi lohistychnoi infrastruktury [Territorial organization of regional logistics infrastructure]. *Upravlinnia proektamy ta rozvytok vyrobnytstva, 1(49)*, 157-172. Retrieved from <http://pmdp.org.ua> [in Ukrainian].
 12. Arefieva, O.V. & Prokhorova, V.V. (2010). *Upravlinnia rozvytkom ekonomichnykh system: teoriia, mekhanizmy rehuliuвання ta upravlinnia* [Management of economic systems development: theory, mechanisms of regulation and management]. Kharkiv: UkrDAZT [in Ukrainian].
 13. Aulin, V.V. & Zamota, O.M. (2014). Ekonomichne obruntuvannia efektyvnosti ta rentabelnosti vykorystannia transportnykh zasobiv na ATP [Economic substantiation of efficiency and profitability of use of vehicles on ATP]. *Visnyk inzh. akademii Ukrainy, 1*, 160-164 [in Ukrainian].
 14. Aulin, V.V., Holub, D. V. & Hrynkyv, A.V. (2018). Kontseptualnyi pidkhid doslidzhennia funktsionuvannia transportnykh system [Conceptual approach to the study of the functioning of transport systems]. *Perspektivni napriamy rozvytku rehionalnykh transportnykh ta lohistychnykh system*: 2018 rik materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konf., 22-23 travnia 2018 r. Kharkiv: KhNADU, 14-17 [in Ukrainian].
 15. Aulin, V.V., Holub, D. & Zamurenko, A. (2020). Pidvyshchennia efektyvnosti transportnoho protsesu formuvanniam informatsiinykh potokiv v systemi perevezen vantazhiv [Improving the efficiency of the transport process by forming information flows in the freight system]. *Innovatsiini tekhnologii rozvytku mashynobuduvannia ta efektyvnogo funktsionuvannia transportnykh system*: 2020 rik: materialy II-yi Mizhnarodnoi naukovo-tekhichnoi internet-konf., 25-27 bereznia 2020 r. Rivne : NUVHP, 41-43 [in Ukrainian].
 16. Aulin, V.V., Solovykh, A.Ie. & Dihtiar, B. (2000). Ekonomiko-matematychne moduliuvannia protsesiv upravlinnia pidpriemstvom v umovakh hospodarskoho ryzyku i nevyznachenosti [Economic and mathematical modulation of enterprise management processes in conditions of economic risk and uncertainty]. *Nauk. pratsi KDTU. Ekon. nauky, Issue.8*, 151-156 [in Ukrainian].
 17. Bondarenko, O.S. (2010). Suchasni pidkhody do klasyfikatsii lohistyky na pidpriemstvakh Ukrainy [Modern approaches to the classification of logistics in Ukrainian enterprises]. *Ekonomichni nauky. Ser. Ekonomika ta menedzhment, Issue 7(26), part 1*. Retrieved from www.nbu.gov.ua/portal/soc_gum/en_em/2010_7_1/12.pdf [in Ukrainian].
 18. Brodeckij, G.L. (2010). *Sistemnyj analiz v logistike. Vybory v usloviyah neopredelennosti: uchenik* [Systems analysis in logistics. Choice in the face of uncertainty]. Moskva [in Russian].
 19. Volvach, I. Yu. (2009). Dosvid vprovadzhennia lohistychnoi kontseptsii vyrobnytstva "Just-in-time" [Providing information on the logistic concept of the "Just-in-time"]. *Visnyk Khmelnytskoho nats. un-tu. Ekonomichni nauky, Vol. 4, 2*, 250-253 [in Ukrainian].
 20. Hryhorak, M.Iu. (2011). Lohistychne upravlinnia zvorotnykh materialnykh potokamy vyrobnychoho pidpriemstva [Logistic management of the rotary material flows of the virobnic enterprise]. *Visnyk Shkhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. V. Dalia, 5(159), part 2*, 232-236 [in Ukrainian].
 21. Karp, I.M. (2011). Teoretychni osnovy mikrolohistychnoi systemy. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu* [Theoretical foundations of the microscopic system], *1*, 223-227 [in Ukrainian].
 22. Katsma, V.I. (2016). Sutnist ta rol lohistychnoho upravlinnia v systemi upravlinnia pidpriemstvom [The essence and role of logistics management in the enterprise management system]. *Ekonomichniy analiz, Vol. 23, 2*, 60-65 [in Ukrainian].
 23. Krykavskiy, Ye. V. (2005). Lohistychne upravlinnia [Logistics management]. Lviv: Vyd-vo Nats. un-tu „Lvivska politekhnika” [in Ukrainian].
 24. Aulin V.V. et al. (2017). Metodolohichni i teoretychni osnovy zabezpechennia ta pidvyshchennia nadiinosti funktsionuvannia avtomobilnykh transportnykh system [Methodological and theoretical foundations of ensuring and improving the reliability of road transport systems]. V.V. Aulina (Eds.). Kropyvnytskyi: TOV "KOD" [in Ukrainian].
 25. Aulin V.V. et al. (2020). Metodolohichni osnovy proektuvannia ta funktsionuvannia intelektualnykh transportnykh i vyrobnychykh system: monohrafiia [Methodological bases of design and functioning of

- intelligent transport and production systems]. V.V. Aulina (Eds.). Kropyvnytskyi: Vydavets Lysenko V.F. [in Ukrainian].
26. Oklande, M.A. (2004). Lohistychna systema pidpriemstva [Logistics system of the enterprise]. Odesa: Astroprynt [in Ukrainian].
27. Palchyk, I.M. (2014). Lohistychne upravlinnia pidpriemstvom – teoretyko-metodychnyi aspekt [Logistic management of the enterprise - theoretical and methodological aspect]. *Elektronne vydannia Efektyvna ekonomika*. 10. Retrieved from <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=3442> [in Ukrainian].
28. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V. & Holovaty, A.O. (2020). Kiberfyzichnyi pidkhid pry stvorenni, funktsionuvanni ta udoskonalenni transportno-vyrobnychkykh system [Cyberphysical approach in the creation, operation and improvement of transport and production systems]. *Tsentrlnoukrainskyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky, Vol. 3(34)*, 331-343 [in Ukrainian].
29. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V., Lysenko, S.V. & Antoshchenko, Ye.V. (2019). Neobkhdnist stratehichnoho rozvytku transportnoi lohistyky v Ukraini [The need for strategic development of transport logistics in Ukraine]. *Pidvyshchennia nadiinosti mashyn i obladnannia. Increase of Machine and Equipment Reliability: materialy 1-oi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konf., 17-19 kvitnia 2019 r.* Kropyvnytskyi : TsNTU, 280-281 [in Ukrainian].
30. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V., Lysenko, S.V., Holovaty, A.O. & Holub, D.V. 2021. *Teoretychni i metodolohichni osnovy lohistyky transportnoi i vyrobnychoi systemy [Theoretical and methodological foundations of transport and production system logistics]*. V.V. Aulina (Eds.). Kropyvnytskyi: vydavets Lysenko S.V. [in Ukrainian].
31. Aulin, V.V. & Holub, D.V. (2019). Zabezpechennia efektyvnosti funktsionuvannia transportnykh system shliakhom pidvyshchennia nadiinosti strukturnofunktsionalnykh rezervnykh skhem protsesu dostavky [Ensuring the efficiency of transport systems by increasing the reliability of structural backup schemes of the delivery process]. *Nauka - vyrobnytstvu 2019: zb. mat dopovidei uchasnykiv L naukovo konf.* Kropyvnytskyi: TsNTU, 17-20 [in Ukrainian].
32. Aulin, V.V., Holub, D.V. & Diachenko, V.O. (2017). Pidvyshchennia efektyvnosti funktsionuvannia pidpriemstv silskohospodarskoho vyrobnytstva na osnovi lohistychnoho pidkhodu [Increasing the efficiency of agricultural enterprises on the basis of a logistical approach]. *Problemy konstruiuvannia, vyrobnytstva ta ekspluatatsii silskohospodarskoi tekhniki: materialy XI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konf.* Kropyvnytskyi: TsNTU, 232 [in Ukrainian].
33. Aulin, V.V., Holub, D.V., Lysenko, S.V., Hrynkiv, A.V., Diachenko, V.O. & Zamurenko, A.S. (2020). Teoretychnyi pidkhid do otsinky ymovirnostei bezvidmovnoi roboty transportnykh ta vyrobnychkykh system i lantsiuhiv postachan na osnovi yikh lohichnykh strukturnykh skhem nadiinosti [Theoretical approach to estimating the probabilities of trouble-free operation of transport and production systems and supply chains based on their logical structural schemes of reliability]. *Tsentrlnoukrainskyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky, Vol. 3(34)*, 290-304 [in Ukrainian].
34. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V. & Holovaty, A.O. (2020). Intelktualni transportni systemy yak rezultat vprovadzhennia innovatsiinykh efektyvnykh tekhnolohii [Intelligent transport systems as a result of the introduction of innovative efficient technologies]. *Pidvyshchennia nadiinosti mashyn i obladnannia. Increase of Machine and Equipment Reliability: 2020 rik: materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konf., 15-17 kvitnia 2020 r.* Kropyvnytskyi : TsNTU, 207 [in Ukrainian].
35. Bilovskiy, K.E. (2016). Stan ta perspektyvy rozvytku rynku lohistychnykh posluh v Ukraini [State and prospects of development of the logistics services market in Ukraine]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, Vol. 2, 4*, 25-29 [in Ukrainian].
36. Velychko, O.P. (2007). Udoskonalennia metody kryterialnoho analizu v systemi lohistychnoho servisu [Improvement of the method of criterion analysis in the system of logistics service]. *Visnyk Dnipropetrovskoho derzhavnogo ahrarnoho universytetu, 2*, 158-162 [in Ukrainian].
37. Aulin V.V. et al. (2001). Vykorystannia ekonomiko-matematychnoho modeliuvannia ta informatsiinykh tekhnolohii dlia zabezpechennia efektyvnoho upravlinnia rehionalnoi ekonomiky [Use of economic-mathematical modeling and information technologies to ensure effective management of the regional economy]. *Novi informatsiini tekhnolohii navchannia v navchalnykh zakladakh Ukrainy, Vol.7*, 236-239 [in Ukrainian].
38. Krykavskiy, Ye.V. & Kubiv, S.I. (2008). Lohistychnyi produkt ta lohistychna posluha [Logistics product and logistics service]. *Ekonomika lohistychnykh system. Ye. Krykavskoho & S. Kubiva (Eds.)*. Lviv: Vyd-vo Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika" [in Ukrainian].
39. Aulin, V.V., Velykodnyi, D.O., Holub, D.V., Diachenko, V.O. & Holovaty, A.O. (2019). Stan ta stratehichni tsili lohistyky avtomobilnoho transportu Ukrainy [State and strategic goals of road transport logistics in Ukraine]. *Pidvyshchennia nadiinosti mashyn i obladnannia. Increase of Machine and Equipment Reliability: 2019 rik: materialy 1-oi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konf., 17-19 kvitnia 2019 r.* Kropyvnytskyi : TsNTU, 285-288 [in Ukrainian].

40. Aulin, V.V., Velykodnyi, D.O., Dovhyi, A.O. & Halinskyi, Ye.S. (2019). Stratehiia staloi lohistyky dlia Ukrainy na period do 2030 roku. zahalni vymohy do transportnoi lohistyky [Sustainable logistics strategy for Ukraine until 2030. general requirements for transport logistics]. *Pidvyshchennia nadiinosti mashyn i obladnannia. Increase of Machine and Equipment Reliability*: 2019 rik: materialy 1-oi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konf., 17-19 kvitnia 2019 r. Kropyvnytskyi : TsNTU, 282-284 [in Ukrainian].
41. Aulin, V.V., Velykodnyi, D.O. & Diachenko, V.O. (2018). Optymizatsiia i upravlinnia resursamy v transportno-lohistychnii systemi APK [Optimization and management of resources in the transport and logistics system of agriculture]. *Naukovi notatky*, 62, 8-11 [in Ukrainian].
42. Aulin, V.V. & Holub, D.V. (2018). Realizatsiia fizyko-informatsiinoho pidkholdu doslidzhennia problemy pidvyshchennia nadiinosti ta efektyvnosti funktsionuvannia transportnykh system [Implementation of the physical-information approach of research of a problem of increase of reliability and efficiency of functioning of transport systems]. *Vestnyk KhNADU, Issue 81*, 21-28 [in Ukrainian].
43. Aulin, V.V. & Hryniv, A.V. (2020). Kiberfizychnyi pidkhid v doslidzhennia stanu tekhnichnykh system [Cyberphysical approach to the study of technical systems]. *Pidvyshchennia nadiinosti mashyn i obladnannia. Increase of Machine and Equipment Reliability*: 2020: materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konf., 15-17 kvitnia 2020 r. Kropyvnytskyi: TsNTU, S.168-169 [in Ukrainian].
44. Aulin, V.V., Dihtiar, B.S. & Tsvihun, N.M. (2006). Vykorystannia matematychnoho modeliuвання dlia otsinky efektyvnosti funktsionuvannia finansovoho mekhanizmu [Using mathematical modeling to assess the effectiveness of the financial mechanism]. *Naukovi zapysky. Ser. Matematychni nauky, Issue. 65*, 8-17 [in Ukrainian].
45. Aulin, V.V., Ivashchuk, V.O. & Kaskov, V.S. (2000). Modeliuвання systemy reitynhovoho upravlinnia [Modeling of rating management system]. *Teoriia i praktyka perebudovy ekonomiky*, 107-109 [in Ukrainian].
46. Afanasenko, I.D. (2009). Teoriia logistiki i koncepcija urovnej [Logistics theory and level concept]. *Innovacii v kommercii i logistike, Issue. 8, part. 1*, 25-31 [in Russian].
47. Voronkova, A.E. (2002). Harmonyzatsiia materyalnykh potokov promyshlennoho predpriiatia [Harmonization of material flows of an industrial enterprise]. *Ekonomika. Menedzhment. Pidpriemnytstvo*, 8, 129-133 [in Russian].
48. Hurzhii, N.M. & Overchenko, A.I. (2016). Otsinka lohistychnoho potentsialu pidpriemstva yak osnova vyboru yoho lohistychnoi stratehii [Assessment of the logistic potential of an enterprise as the basis for the choice of a logistic strategy]. *Mykolaivskyi natsionalnyi universytet imeni V.O. Sukhomlynskoho. Issue. 13*, 244-248 [in Ukrainian].
49. Kozhyna, O.M. (2002). Teoretychne obgruntuvannia poniattia materialnykh resursiv yak obektiv upravlinnia [Assessment of the logistic potential of an enterprise as the basis for the choice of a logistic strategy]. *Visnyk Natsionalnogo universytetu "Lvivska politekhnika"*, 446, 47-51 [in Ukrainian].
50. Herasymchuk, Z.V., Kovalska, L.L., Khvyshchun, N.V. & Moroz, O.D. (2011). *Rehionalni lohistychni systemy: teoriia ta praktyka: monohrafiia [Regional Logistic Systems: Theory and Practice]*. Lutsk: RVV LNTU [in Ukrainian].
51. Iastremska, O.M. (2004). *Investytsiina diialnist promyslovykh pidpriemstv: metodolohichni ta metodychni zasady [Investment activity of industrial enterprises: methodological and methodical ambushes]*. Kharkiv : VD "INZhEK" [in Ukrainian].
52. Shevtsiv, L.Iu. & Petetskyi, I. (2011). *Lohistychni vytraty pidpriemstva: formuvannia ta otsiniuvannia [Logistic Vitraty of Enterprises: Formulation and Assessment]*. Lviv: Vydavnytstvo "Lvivskoi politekhniki", 244 s. [in Ukrainian].
53. Aulin V., Lyashuk, O., Pavlenko, O., Velykodnyi, D. et al. (2019). Realization of the Logistic Approach in the International Cargo Delivery System. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina, Vol. 21, 2*, P. 3-12. [in English].
54. Aulin V., Lyashuk O., Pavlenko O., Velykodnyi D., Hryniv A., Lysenko S., Holub D., Vovk Y., Dzyura V. & Sokol M. (2019). Realization of the logistic approach in the international cargo delivery system. *Communication - Scientific Letters of the University of Zilina, Vol.21 (2)*, P. 5-14. [in English].
55. Aulin, V., Hryniv, A., Lyashuk, O., Vovk, Y., et al. (2020). Increasing the Functioning Efficiency of the Working Warehouse of the "UVK Ukraine" Company Transport and Logistics Center. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina, Vol. 22, 2*, P. 3-14. [in English].
56. Galkin, A. (2015). System approach for logistics distribution network's organization and planning. *International journal of automation, control and intelligent systems, Vol. 1, 2*, P. 27-33 [in English].
57. Logistic model. *en.wikipedia.org*. Retrieved from http://en.wikipedia.org/wiki/Logistic_model [in English].
58. Viktor Aulin, Denis Velykodnyi, Viktoriya Dyachenko (2018). Concept of development and formation of transportlogistic systems in the agroindustrial complex. *Modern Management: Logistics and Education..* P.165-169 [in English].
59. Grygorak, M.Y. (2017). Comparison of economic indicators of using the Ukrainian logistics potential. *Technological audit and production reserves, № 3/5(35)*, 49-57 [in English].

60. Hayaloglu, P. (2015). The impact of developments in the logistics sector on economic growth: the case of OECD countries. *International journal of economics and financial issues*, Vol. 5, 2, P. 523-530 [in English].
61. Taniguchi, E., Thompson, R.G. & Yamada, T. (2016). New opportunities and challenges for city logistics. *Transportation research procedia*, 12, 112-125 [in English].
62. Trade logistics the global economy. *wb-lpi-media.s3.amazonaws.com*. Retrieved from https://wb-lpi-media.s3.amazonaws.com/LPI_Report_2016.pdf [in English].

Artem Holovaty, post-graduate

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Improving the Efficiency of the Machine-building Enterprise on the Basis of Logistics-Oriented

On the basis of a typical machine-building enterprise the problem of increasing the efficiency of its operation using a logistics-oriented approach is considered.

The basic processes of production activity within the limits of the concrete machine-building enterprise on which production, production-sales or supplier-production-sales systems are allocated are defined. The issues of creating a logistics system at the enterprise and its logistics management in the logistics environment, taking into account the factors of macro-, meso- and micro-environment. Based on the logistics-oriented approach, the structure of the enterprise is built, its logistics mission at each stage of production and economic activity is determined. Within the cybernetic approach, the link of the logistics system is presented as a certain element of the transformation of material and information flows.

The vector equation of this transformation taking into account the set of characteristic vectors is offered. It is shown that the set of logistics actions is implemented in the supply, production or sales areas. Criteria for effective logistics management are defined. Their implementation is given on the example of the minimum total logistics costs and the maximum profit from all logistics activities. The formalization of the task of effective logistics management at a machine-building enterprise to minimize overall logistics costs is considered.

machine-building enterprise, logistic action, logistic management system, production, criterion of efficiency of functioning, logistically-directed approach

Одержано (Received) 20.01.2022

Прорецензовано (Reviewed) 03.02.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

УДК 621.863.2

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.86-97](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.86-97)

Г. Д. Портнов, доц., канд. техн. наук, А.А. Тихий, доц., канд. техн. наук,

В.В. Дарієнко, доц., канд. техн. наук, В.В. Пукалов, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кіровоград, Україна

e-mail: budkom999@gmail.com

Підвищення ефективності конструкції кованого дворогого гака

Запропоноване вдосконалення вантажних дворогих гаків ГОСТ 6628-73, яке теоретично дозволяє зменшити масу на 7% при збереженні експлуатаційних властивостей. Проведено аналіз впливу форми кованого дворогого гака на його ефективність. Побудована модель для вивчення напружено – деформованого стану кранового гака в умовах максимального навантаження, придатна до утворення конфігурацій номерів гака. Визначені найменш навантажені елементи моделі за допомогою візуалізації розподілених напружень.

вантажний гак, конфігурація моделі, твердотіла модель, напружено – деформований стан

Постановка проблеми. Гаки, однорогі та дворогі - найбільш поширені вантажозахоплюючі пристрої у кранах загального призначення. Дворогі гаки ГОСТ 6628-73 за формою і експлуатаційними показниками (співвідношення вантажопідйомності і власної ваги), відрізняються від кранових гаків, які виконані за стандартами DIN [1 - 5]. Вплив форми кованого однорогого гака на його ефективність представлено в роботі [10]. Теоретичні розрахунки гаків, як криволінійного бруса не дають можливості отримання однозначних рішень щодо форми робочих поверхонь. Сучасні програми моделювання твердотільних об'єктів дозволяють провести аналіз конструкцій, виконаних за схемою криволінійного бруса з точністю більшою, ніж та, що дозволена теоретичним розрахунком [14, 15]. Це дає можливість суттєво поліпшити ефективність використання матеріалу гака шляхом виключення із конструкції малонавантажених ділянок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Актуальність проблеми підвищення ефективності конструкції кованого дворогого гака обґрунтована в роботах [8, 10].

Дворогі гаки ГОСТ 6628-73 за формою і експлуатаційними показниками (співвідношення вантажопідйомності і власної ваги), відрізняються від кранових гаків, які виконані за стандартами DIN [1 - 5] (рис.1).

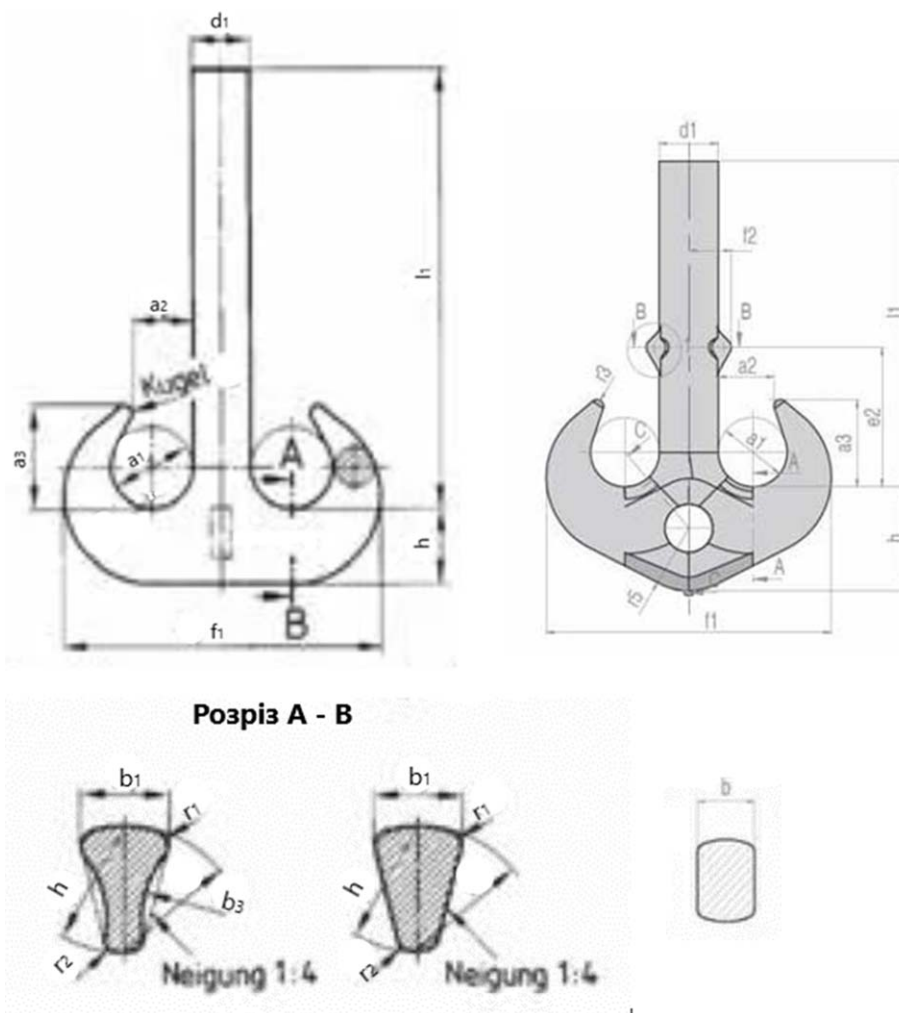


Рисунок 1 – Конструкція і розміри гаків типа RS, RSN, RF, RFN DIN 15402

Джерело: [4]

Порівняння світових стандартів дворогих гаків [2, 4, 5] показує суттєву відмінність ефективності витрати матеріалу при однакових класах і групах класифікації.

У дослідженні [6, 7, 9] обґрунтована можливість вдосконалення конструкції однорогого кранового гака за рахунок зміни форми перерізу окремих частин. Представлена методика дослідження була використана при інженерному аналізі дворогого гака.

Постановка завдання. Проведення аналізу дворогих кованих кранових гаків ГОСТ 6628-73 [2] з метою підвищення ефективності їх конструкції.

Виклад основного матеріалу.

Для вивчення напружено – деформованого стану кранового гака в умовах максимального навантаження в програмі SolidWorks побудована модель, придатна до утворення конфігурацій номерів гака за ГОСТ 6628-73 (рис. 2).

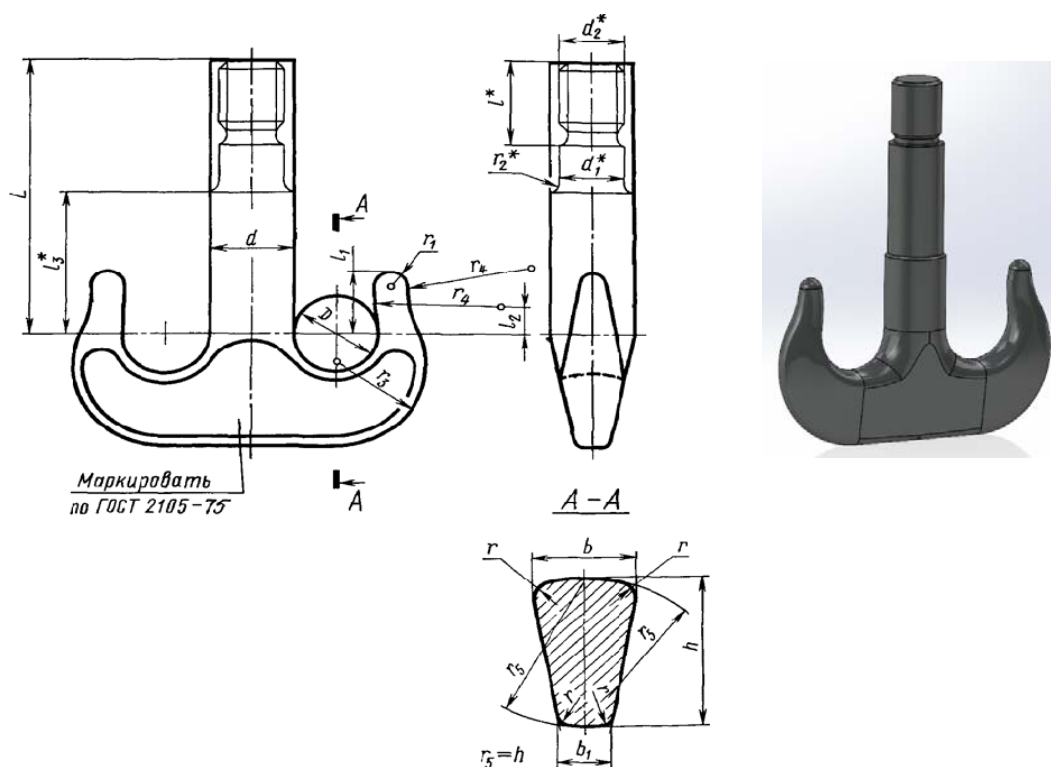


Рисунок 2 – Конструкція і розміри моделі заготовки гака ГОСТ 6628-73

Джерело: [2]

Усі конфігурації моделі геометрично подібні (рис. 3).

Відповідно до теорії геометричної подібності співвідношення об'єму (маси M) моделі до його характерного розміру D :

$$M \sim D^3, \quad (1)$$

де D – характерний розмір (рис. 1);

M – маса гака.

Ступенева залежність лінії тренду відповідає співвідношенню (1): $y = 5E-05X^{2,8848}$ з великим ступенем достовірності $R^2 = 0,9962$.

Висновки щодо однієї моделі параметричного ряду конфігурацій можуть бути розповсюджені на будь яку модель цього ряду.

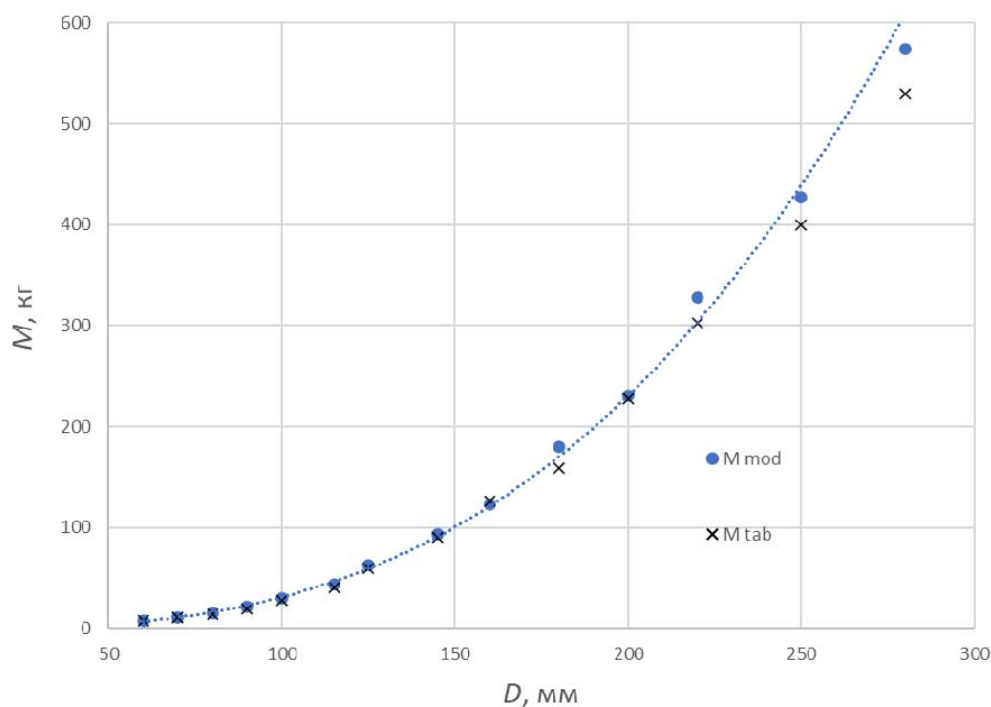


Рисунок 3 – Зв'язок маси гаків з діаметром зіву D (M_{mod} - маса моделей;
 M_{tab} - маса гаків за таблицею ГОСТ 6628-73)

Джерело: розроблено авторами

Напружено – деформований стан моделей визначався за допомогою додатку Solidworks Simulation, «Статичний аналіз» [11, 12].

Для проведення дослідження обрана модель гака №14 ГОСТ 6628-73.

Маса моделі $M = 574,26$ кг.

Матеріал деталі - "Проста вуглецева сталь" (бібліотека матеріалів solidworks materials). Тип моделі матеріалу: лінійний, ізотропний, пружний.

$\sigma_T = 202,6$ МПа (по Mises).

Критерієм для діаграми коефіцієнта запасу міцності використано критерій максимальне напруження по Mises [13,16].

Усі налаштування програми приймаються за замовчуванням, крім параметрів кінцево – елементної сітки.

Як результати розрахунку розглянуті наступні діаграми:

- напруження vonMises;
- переміщення сумарне (результуюче);
- деформація еквівалентна;
- коефіцієнт запасу міцності (FOS).

Напружено–деформований стан моделей визначався для двох варіантів навантаження.

1. №1. Навантаження на обидва роги гака розподіляється рівномірно. На кожен ріг діє навантаження від $G/2$, спрямоване під кутом $\alpha = 45^\circ$ згідно з (рис. 4). Значення G обиралося з Додатку ГОСТ 6628-73 для машин і механізмів з машинним приводом з тяжким режимом роботи.

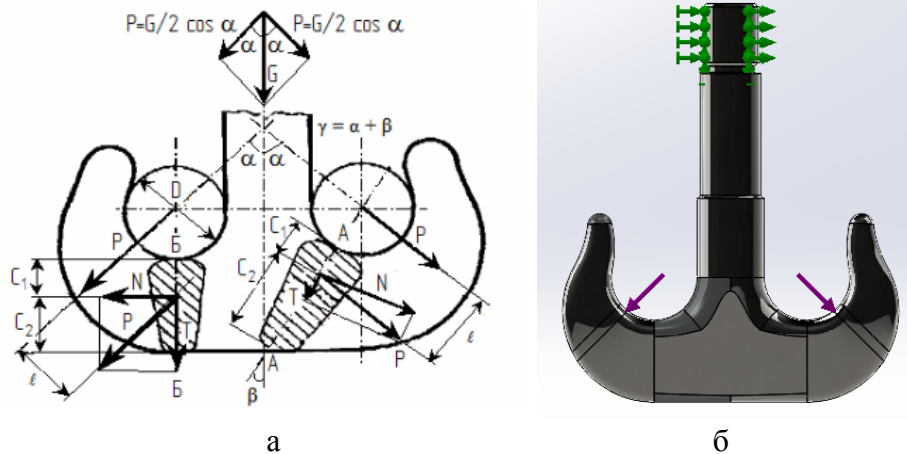


Рисунок 4 – Розрахункова схема гака (а); зовнішнє навантаження «на об'єкт» від зусилля P (б) з зафіксованим кріпленням хвостовика

Джерело: [7]

2. №2. Вантаж підвішений на один рiг (рис. 4). Значення вантажу $G/2$, де β - кут нахилу гака, що визначається графічно (на одній вертикалі розташовують центр кола навантаженого зiва гака і центр повороту обойми (точка перетину осей блоків і хвостовика). В додатку Solidworks Simulation, «Статичний аналіз» розрахункова схема з зафіксованим кріпленням хвостовика за торці тимчасово утвореної бобишки приймає вигляд, показаний на рис. 5, б.

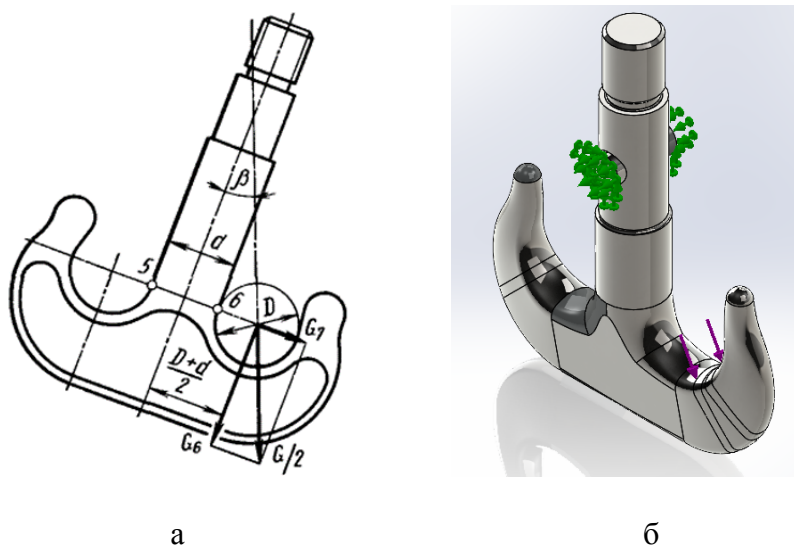


Рисунок 5 – Розрахункова схема гака (а); зовнішнє навантаження «на об'єкт» від зусилля $G/2$ (б) з зафіксованим кріпленням бобишки хвостовика

Джерело: [7]

Визначення найменш навантажених елементів моделі виконується візуалізацією розподілених напружень з використанням інструмента «Design Insight» (рис. 6).

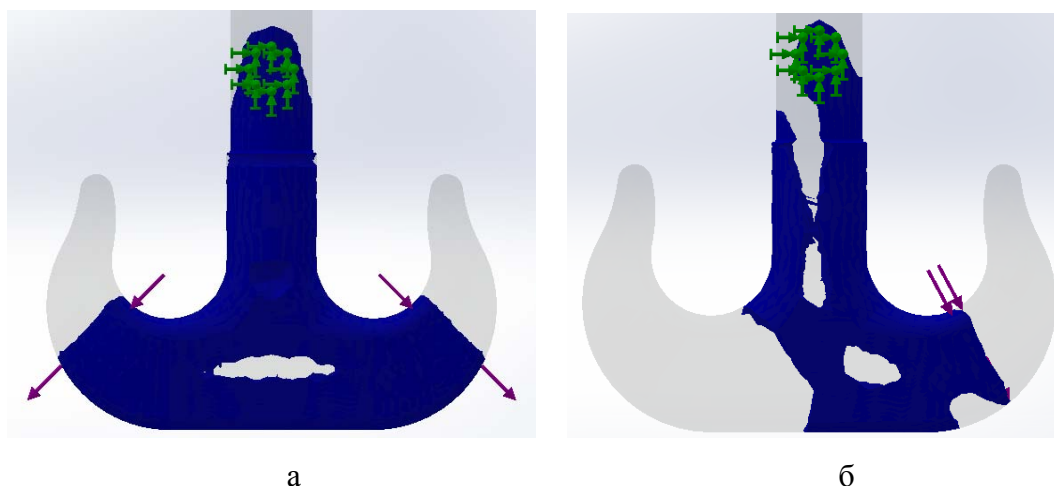


Рисунок 6 – Візуалізація розподілення напружень елементів моделі при навантаженні за схемою рис.4 (а); за схемою рис.5 (б)

Джерело: розроблено авторами

Досвід експлуатації стандартизованих гаків визначив ергономічність поверхонь виробів, які контактують зі стропильним обладнанням. Таким чином контури гаків змінам не підлягають.

Геометричні співвідношення розмірів перерізу гаків, а також нарізної частини можна вважати визначеними теоретично і експериментально як оптимальні.

Обґрунтованим є видалення частини матеріалу середньої частини гака.

Абрис отвору визначався експериментальним шляхом з міркувань технологічності виконання (рис.7).

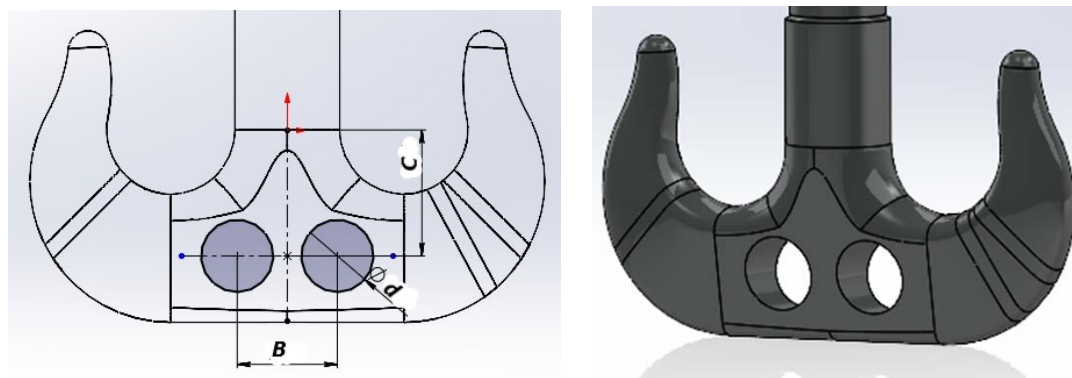


Рисунок 7 – Параметри отворів в моделі гака

Джерело: розроблено авторами

Оптимізації параметрів отвору виконувалася за допомогою «Дослідження проектування» SolidWorks Simulation.

Завданням «Дослідження проектування» є обрання параметрів отвору, що забезпечує мінімальну металоємність конструкції при збереженні міцності і жорсткості. Критерієм міцності приймався коефіцієнт запасу міцності K (за межею текучості

матеріалу). Вважалося допустимим зниження значення K знов розробленої моделі на 5% від K моделі гака ГОСТ 6628-73 при схемі навантаження №1 (рис.3).

Інформація про сітку твердого тіла моделі представлена в таблиці 1.

Таблиця 1 – Інформація про сітку моделі

Тип сітки	Сітка на твердому тілі
Використане розбиття:	Сітка на основі змішаної кривизни
Точки Якобіана для сітки високої якості	16
Максимальний розмір елемента	81,9578 мм
Мінімальний розмір елемента	16,3916 мм
Якість сітки	Висока

Виконання отвору в моделі змінює співвідношення жорсткості її елементів, що призводить до зміни картини навантаження. Процес обрання форми отвору має ітераційний характер. Вибірка показників напружено – деформованого стану моделі гака №14 ГОСТ 6628-73 з отворами при обох варіантах навантаження представлено зведеними діаграмами рис. 8 і рис. 9.

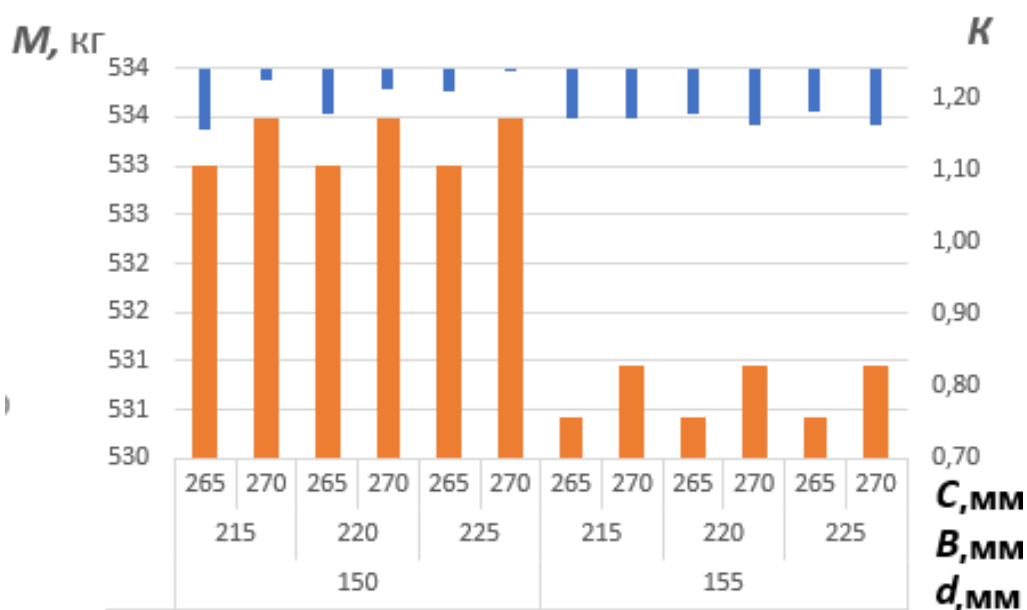


Рисунок 8 – Діаграма зв'язків коефіцієнта запасу міцності K і маси моделі M з параметрами отворів (рис.7) при схемі навантаження №1 (рис. 4)

Джерело: розроблено автором

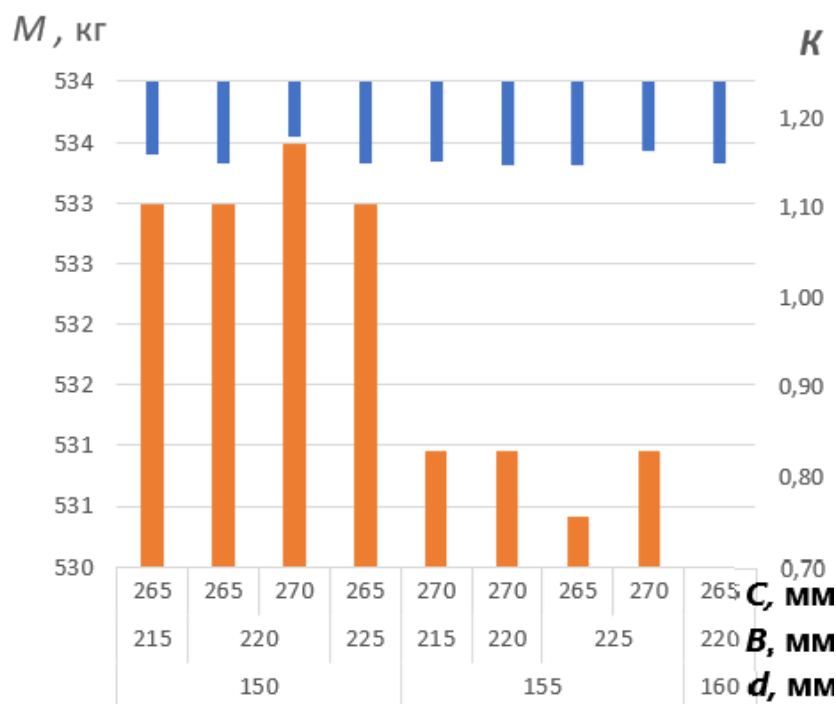


Рисунок 9 – Діаграма зв'язків коефіцієнта запасу міцності K і маси моделі M з параметрами отворів (рис.7) при схемі навантаження №2 (рис. 5)

Джерело: розроблено автором

На основі результатів зіпівставлення діаграм рис. 8 і рис.9 приймаємо параметри отворів (рис.7) з прийнятними полями допусків згідно даних табл. 2, мм.

Таблиця 2 – Параметри отворів моделі (рис.7)

d		B		C	
Номінал	Граничне відхилення	Номінал	Граничне відхилення	Номінал	Граничне відхилення
155	+0 -5	225	+0 -10	265	-0 +5

На рис. 10,11 представлено розподілення напружень в елементах моделі при різних варіантах навантажень з позначенням мінімального значення коефіцієнту запасу міцності K .

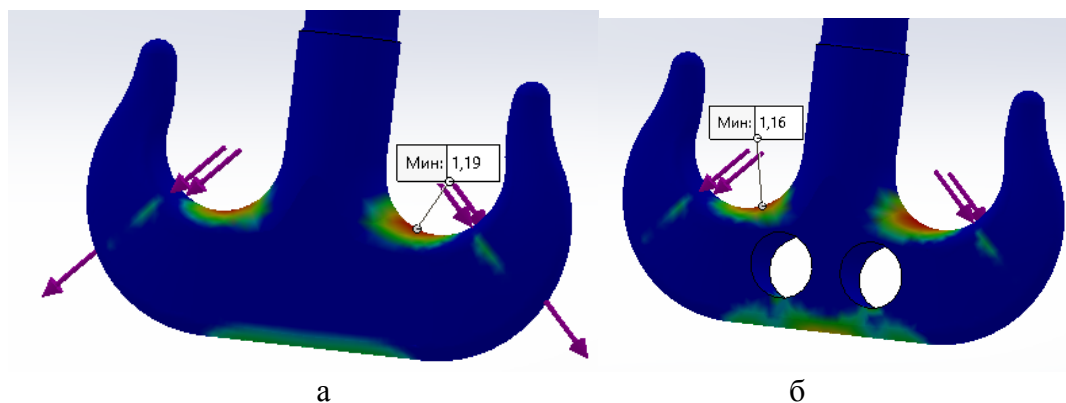


Рисунок 10 – Розподілення напружень в елементах моделі при схемі навантаження №1 (рис. 4)

а – модель гака №14 ГОСТ 6628-73, б - модель гака №14 ГОСТ 6628-73 з отворами

Джерело: розроблено авторами

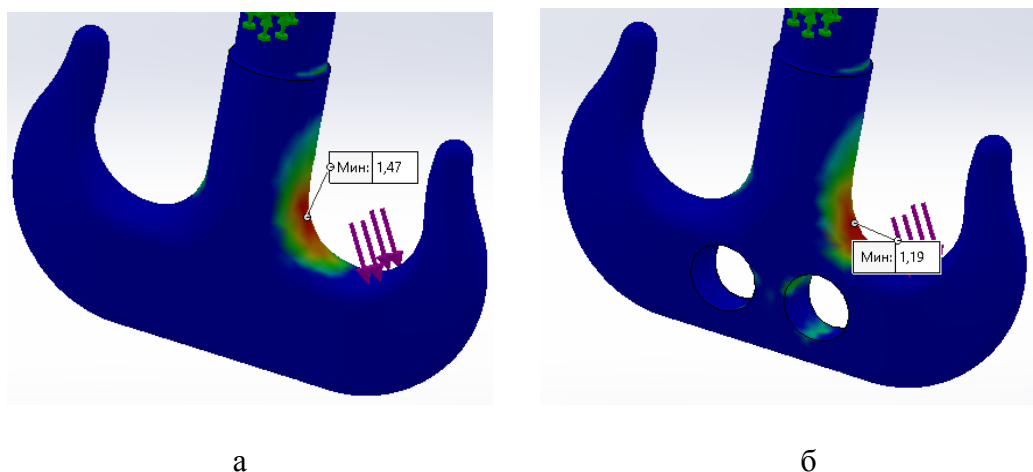


Рисунок 11 – Розподілення напружень в елементах моделі при схемі навантаження №2 (рис. 5)

а – модель гака №14 ГОСТ 6628-73, б - модель гака №14 ГОСТ 6628-73 з отворами

Джерело: розроблено авторами

В таблиці 3 представлені показники напружено-деформованого стану моделей гака №14 ГОСТ 6628-73 без отворів і з отворами (табл.2) при різних схемах навантаження.

Таблиця 3 – Показники напружено-деформованого стану моделей

Показник	Схема навантаження №1 (рис. 3)		Схема навантаження №2 (рис. 4)	
	Гак №14 ГОСТ 6628-73	Гак №14 ГОСТ 6628-73 з отворами	Гак №14 ГОСТ 6628-73	Гак №14 ГОСТ 6628-73 з отворами
Напруження Von Mises, кг/см ² Критерій : Макс. моделі	1885	1937	1531	1896
Результуюче статичне переміщення, мм Критерій : Макс. моделі	0,72	0,76	1,29	1,49
Еквівалентна деформація Критерій : Макс. моделі	0,001	0,001	0,001	0,001
Запас міцності Критерій : Мін. моделі	1,19	1,16	1,47	1,19

Джерело: розроблено авторами

При розробці конструкторської документації на дворогий гак з отворами слід враховувати співвідношення параметрів отворів за табл. 3 з характерним розміром зів гака D (рис. 1).

Висновки. Утворення отворів в гаках ГОСТ 6628-73 дозволяє зменшити масу на 7% без зменшення його експлуатаційних властивостей. Виконання отвору в моделі змінює співвідношення жорсткості її елементів, що призводить до зміни картини навантаження. Процес обрання форми отвору має ітераційний характер.

Представлено розподілення напружень в елементах моделі при різних варіантах навантажень з позначенням мінімального значення коефіцієнту запасу міцності K . При розробці конструкторської документації на дворогий гак з отворами слід враховувати співвідношення параметрів отворів з характерним розміром зіву гака.

Список літератури

1. ГОСТ 2105-75. Крюки кованые и штампованные. Технические условия [Чинний від 1976-01-01]. Москва, 1975. 7 с. (Информационные данные).
2. ГОСТ 6628-73. Крюки двурогие. Заготовки. Типы. Конструкции и размеры. [Чинний від 1975-01-01]. Москва, 1973. 8 с. (Информационные данные).
3. DIN 15400/06.90 Lasthaken für Hebezeuge; Mechanische Eigenschaften, Werkstoffe, Tragfähigkeiten und vorhandene Spannungen (DIN 15400/06.90 Грузовые крюки для подъемных устройств. Механические свойства, материалы, грузоподъемности и действительные напряжения). [Чинний від 1990-06-01]. 1990. 9 с.
4. DIN 15402/11.88 Teil 1 Lasthaken für Hebezeuge; Doppelhaken; Rohteile (DIN 15402/11.88 Часть 1 Грузовые крюки для подъемных устройств. Двурогие крюки. Заготовки).
5. DIN 15402/09.83 Teil 2 Lasthaken für Hebezeuge; Doppelhaken; Fertigteile mit Gewindschaft (DIN 15402/09.83 Часть 2. Грузовые крюки для подъемных устройств. Двурогие крюки. Обработанные детали с резьбовым хвостовиком).
6. Александров М. П. Колобов Л. Н., Лобов Н. А. и др. Грузоподъемные машины. М.: Машиностроение, 1986. 399 с.
7. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 448 с.
8. Григоров О.В., Сердюков Э.И., Степочкин Л.М. О возможности применения в Украине кованых (штампованных) крюков, изготавливаемых по европейским стандартам. *Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр.* 2007. Вып. 38. С. 1–7.
9. Шаповалов Л.А. Моделирование в задачах механики элементов конструкций: М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
10. Портнов Г. Д., Тихий А.А., Дарієнко В.В. Вплив форми кованого однорогого гака на його ефективність *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*, 2021, вип. 4(35). DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).127-133](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).127-133)
11. Delcam. Delcam PowerShape : веб-сайт URL: <http://www.delcam.nl/products/powershape/powershape.htm>. (дата звернення: 22.02.2022).
12. Delcam. Delcam PowerMill : веб-сайт URL: <http://www.delcam.nl/products/powermill/powermill.htm>. (дата звернення: 23.02.2022).
13. Roland Modela (3D Plotter) MDX-20 : User's Manual. Roland DG Corporation, 2000. 70 с.
14. Wasty, T.M., Noor A.K. Modeling and sensitivity analysis of multibody systems using new solid, shell and beam elements . *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Vol. 138, Issues 1-4, 1 December 1996. P. 187-211.
15. Manfred, Hiller. Modeling, simulation and control design for large and heavy manipulators, *Journal of Robotics and Autonomous Systems*. 1996 . 19. PP. 167-177.
16. Mathematical modeling of process moving cargo by overhead crane / V. Shcherbakov, M. Korytov, R. Sukharev, E. Volf . *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 701-702. Pp. 715-720.

Referencis

1. Kryuki kovanyye i shtampovannyye. Tekhnicheskiye usloviya [Forged and stamped hooks. Specifications], (1975). GOST 2105-75 from 01 January 1976. Moskva [in Russian].
2. Kryuki dvurogiye. Zagotovki. Tipy. Konstruktsii i razmery [The hooks are two-horned. Blanks Types. Designs and dimensions], (1973). GOST 6627-73 from 01 January 1975. Moskva [in Russian].

3. Lasthaken für Hebezeuge; Mechanische Eigenschaften, Werkstoffe, Tragfähigkeiten und vorhandene Spannungen [*Load hooks for hoists; Mechanical properties, materials, load capacities and existing stresses*], (1990). DIN 15400/06.90 from 01 June 1990. Berlin [in German].
4. DIN 15402/11.88 Teil 1 Lasthaken für Hebezeuge; Doppelhaken; Rohteile [*Load hooks for lifting devices. Double hooks. blanks*]. (1988). (DIN 15402/11.88. from 01 November 1988. Berlin [in German].
5. DIN 15402/09.83 Teil 2 Lasthaken für Hebezeuge; Doppelhaken; Fertigteile mit Gewindenschaft [*Load hooks for lifting devices. Double hooks. Machined parts with threaded shank*], (1983). (DIN 15402/09.83 from 01 September 1983. Berlin [in German].
6. Aleksandrov M. P. Kolobov L. N. Lobov N. A. (1986). Gruzopod'yemnyye mashiny [Lifting machines]. *Mashinostroyeniye - Mechanical engineering*, 399 p. [in Russian].
7. Aliamovskyi A. A. (2012). SolidWorks Simulation. Kak reshat' prakticheskiye zadachi [SolidWorks Simulation. How to solve practical problems]. *BKHV-Peterburg*, 448 p. [in Russian].
8. Grigorov O.V., Serdyukov E.I., Stepochkin L.M. (2007). O vozmozhnosti primeneniya v Ukraine kovanykh (shtampovanykh) kryukov, izgotavlivayemykh po yevropeyskim standartam [On the possibility of using in Ukraine forged (stamped) hooks manufactured according to European standards]. *Vestnik KHNADU: sb. nauch. tr - Bulletin of KhNADU: collection of scientific papers*, 38, 1-7 [in Russian].
9. Shapovalov L.A. (1990). Modelirovaniye v zadachakh mekhaniki elementov konstruktivnykh [Modeling in the problems of mechanics of structural elements]. *Mashinostroyeniye - Mechanical engineering*, 288 p. [in Russian].
10. Portnov, H. D. , Tykhyi, A.A, Dariienko, V.V. & Pukalov, V.V. (2021). Vplyv formy kovanoho odnorohoho haka na yoho efektyvnist [Influence of forged unicorn hook shape on its efficiency]. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical sciences*, 4(35), 127-133 [in Ukrainian].
11. Delcam. Delcam PowerShape. www.delcam.ni. Retrieved from <http://www.delcam.ni/products/powershape-/powershape.htm> [in English].
12. Delcam. Delcam PowerMill : web site. Retrieved from <http://www.delcam.ni/products/powermill/powermill.htm> [in English].
13. Roland Modela (3D Plotter) MDX-20. (2000) : User's Manual. Roland DG Corporation, 70 [in English].
14. Wasty, T.M.& Noor, A.K. (1996). Modeling and sensitivity analysis of multibody systems using new solid, shell and beam elements . *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 138, 187-211 [in English].
15. Manfred, Hiller. (1996). Modeling, simulation and control design for large and heavy manipulators. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, 19, 167-177. [in English]
16. Shcherbakov, V., Korytov, M., Sukharev, R. & Volf, E. (2015). Mathematical modeling of process moving cargo by overhead crane . *Applied Mechanics and Materials*, 701, 715-720 [in English].

Gennadii Portnov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Tykhyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Dariienko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Pukalov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Improving the Efficiency of the Forged Two-horned Hook Design

An improvement of standard cargo two-horned hooks is proposed, which theoretically allows to reduce the weight by 7% while maintaining performance. The analysis of influence of the form of the forged two-horned hook on its efficiency is carried out. The model for studying the stress - strain state of the crane hook under conditions of maximum load, suitable for the formation of configurations of hook numbers. The modeling of solid objects is carried out, which allows to analyze the structures made according to the scheme of the curved beam with an accuracy greater than that allowed by the theoretical calculation. The least loaded elements of the model are determined by visualization of distributed stresses. Comparison of world standards of two-horned hooks shows a significant difference in material efficiency with the same classes and groups of classification.

To study the stress - strain state of the crane hook under conditions of maximum load in the program SolidWorks built a model suitable for the formation of hook configurations. The stress-strain state of the models was determined for two load variants. The load on both hooks of the hook is distributed evenly and the load is suspended on one horn. Experience in the operation of standardized hooks has determined the ergonomics of the surfaces of products in contact with the rafter equipment.

The geometric ratios of the cross-sectional dimensions of the hooks, as well as the threaded part can be considered determined theoretically and experimentally as optimal. It is reasonable to remove part of the material of the middle part of the hook. The strength criterion was the coefficient of safety margin. It is acceptable to reduce the value of K of the newly developed model by 5% of the K model of the hook.

Making a hole in the model changes the ratio of the stiffness of its elements, which leads to a change in the load pattern. The process of choosing the shape of the hole is iterative. The stress distribution in the elements of the model at different load variants with the indication of the minimum value of the safety factor K is presented. When developing design documentation for a two-horned hook with holes should take into account the ratio of the parameters of the holes with the characteristic size of the throat.

load hook, model configuration, solid model, stress - strain state

Одержано (Received) 02.03.2022

Прорецензовано (Reviewed) 10.03.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004. 4

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.98-104](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.98-104)

О.С. Улічев, канд. техн. наук, **К.О. Буравченко**, канд. техн. наук, **Л.І. Поліщук**, викл.
*Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький,
Україна*
e-mail: askin79@gmail.com, buravchenkok@gmail.com, pli_80@ukr.net

Об'єктно-орієнтований підхід в програмуванні. Композиційна взаємодія об'єктів

В даній статті проведено дослідження певних аспектів об'єктно-орієнтованого підходу в програмуванні. Основну увагу приділено поняттям взаємодії об'єктів та композиційної взаємодії. В статті розглядається ієрархія взаємодії та особливості конкретних способів її реалізації.

На основі опрацьованих матеріалів (навчальних посібників, книги з даної тематики, професійних дискусій розробників) запропоновано трактування основних типів взаємодій.
об'єктно-орієнтований підхід, клас, об'єкт, взаємодія, міжоб'єктні зв'язки

Постановка проблеми. Одна з популярних та актуальний сьогодні парадигм в програмуванні це об'єктно-орієнтована парадигма (підхід). Сам термін «ПАРАДИГМА» приписують авторові Т. Куну, термін був запропонований в його роботі «Структура наукових революцій» [7], але в розрізі програмування цей термін вперше застосував в 1978 році Р. Флорйд. Хоча термін з'явився лише в 1978 році, самі парадигми утворилися істотно раніше, як тільки з'явилися перші програмовані комп'ютери, почали з'являтися і удосконалюватися підходи і методи. Кількість парадигм складно визначити однозначно, та й кордони між конкретними парадигмами бувають досить умовними. Так, наприклад, автор К.А. Хайдаров [8] визначає ряд парадигм, а зокрема об'єктно-орієнтовану парадигму програмування автор визначає наступним способом: «программа = несколько взаимодействующих объектов, функциональность (действия) и данные распределяются между этими объектами» (мовою оригіналу). Ключовим моментом є взаємодія об'єктів, в той же час відсутні чіткі правила визначення даної взаємодії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Парадигма об'єктно-орієнтованого програмування базується на основі процедурного програмування. З моменту виникнення ідеї нового підходу (погляду) на програмування, що була запропонована Аланом Кеєм, ООП постійно еволюціонувала.

Базові поняття та їх трактування не набули суттєвих змін, але в деталях та нюансах виникає ряд протиріч. Протиріччя породжено різними факторами, зокрема особливостями реалізації ООП підходу в різних мовах програмування, і, як наслідок, трактуванням даних понять різними авторами, бо, здебільшого, автори опираються на певну мову програмування, а не розглядають ООП як абсолютну абстракцію.

На такі протиріччя вказують ряд зарубіжних та вітчизняних авторів. Зокрема В.В. Соколов в своїй статті[11] відмічає – «Засоби взаємодії об'єктів в ООП не визначені. Інколи взаємодію розглядають як обмін повідомленнями між об'єктами, хоча на практиці це звичайне використання даних та виклики функцій об'єктів.» Автор[11] наголошує на тому, що відсутність уніфікованих засобів взаємодії об'єктів є певним недоліком методології й вимагає формалізації.

В зв'язку з відсутністю чіткої формалізації понять взаємодії між класами та об'єктами, а також відсутності чіткої класифікації типів взаємодії, різні автори достатньо вільно трактують дані поняття. Наприклад, автор К.М. Лавріщева[12] визначає вирішальним фактором відмінності «композиції» та «агрегації» (різних типів відношення) час існування залежного та базового класів, а тип «асоціація» розглядається як окремий тип.

Ситуація неоднозначного трактування понять, що має місце в різних джерелах, породжує певні протиріччя та ускладнює розуміння даних аспектів ООП (типів зв'язків між класами).

Постановка завдання. Дана стаття має на меті розглянути типи взаємодії, а зокрема композиційної взаємодії між об'єктами, та визначити особливості окремих типів. Метою статті є з'ясування суті понять різних типів відношень між класами.

Викладки даної статті базуються на аналізі публікацій, як авторів-теоретиків[1, 2, 3, 8], так і публікацій та аналізу міркувань практиків в сфері прикладного застосування ООП та вибудовування архітектури ОО-програм (програм на основі об'єктно-орієнтованого підходу)[4, 5, 6, 10].

В статті запропоновано ряд тез, які ілюструють неоднозначність тлумачення та розуміння понять, що розглядаються. В подальших викладках різні типи взаємодії проілюстровано прикладами та запропоновано один з варіантів тлумачення та класифікації композиційної взаємодії.

Виклад основного матеріалу. Хоча досліджуване питання відноситься до основних понять ООП, проаналізувавши ряд літературних джерел і статей на професійних форумах, приходимо до висновку, що питання конкретизації типів взаємодії та визначення – який з типів має бути реалізований в тому чи іншому випадку, є досить складними, незважаючи на простоту свого формулювання.

Приведемо деякі тези:

1) На рівні основних визначень поняття ООП: композиція це один із видів взаємодії між об'єктами в ООП (поряд з агрегацією і асоціацією). Але навіть на цьому етапі були знайдені протиріччя, в деяких джерелах автори описують (підводять до думки), що агрегація і композиція це підвиди асоціації. Такий підхід є більш класичним і частіше зустрічається в літературі. В інших альтернативних джерелах розглядаються всі три типи як підвиди взаємодії з різною силою взаємодії.

2) Багато публікацій розглядають питання взаємодії об'єктів на рівні протиставлення «успадкування» і «композиції». І такий підхід передбачає розгляд взаємодії об'єктів вже на більш високому рівні абстракції, тут вже розглядаються не самі механізми ООП, а більше філософія парадигми програмування і об'єктний спосіб мислення.

3) Фактично відсутні чіткі формальні правила і обмеження (більшість сучасних ООП мов досить гнучкі) і конкретний підхід взаємодії між об'єктами при побудові об'єктної ієрархії обирає безпосередньо розробник (архітектор, програміст і т.д.). Питання відповідності тієї чи іншої конфігурації взаємодії об'єктів принципам ООП дуже не однозначне. Хоча ведуться дискусії про переваги того чи іншого способу організації взаємодії між класами (а в підсумку об'єктами), розробник вибирає той чи

інший шлях ґрунтуючись на особистому досвіді та стилі, але також враховує можливості і обмеження, що дають і накладають ці способи.

Виходячи з тез (наведених вище), найбільш доцільним видається спочатку вибрати один з варіантів визначень і чітко визначити - що ми буде розуміти під тим чи іншим терміном, а потім вказати на особливості.

Залежність є найпростішим видом відносин між об'єктами. Залежність вказує на те, що один об'єкт залежить від специфікації (технічних вимог) іншого. Специфікація, опис, визначення, оголошення, технічне завдання, технічні умови, або технічні вимоги - не що інше, як опис поведінки об'єкта. Якщо об'єкти знаходяться в відношенні залежності, то залежний об'єкт тісно прив'язаний до технічних вимог базового об'єкта. У випадку коли специфікація базового об'єкта зміниться, доведеться змінити і залежний об'єкт.

Композиція, агрегація і асоціація всі ці терміни визначають відносини між об'єктами або класами між собою.

В класичних роботах з теорії об'єктно-орієнтованого програмування пропонується п'ять основних типів відносин:

- асоціація;
- агрегація;
- композиція;
- і ще два окремих типи:
- успадкування;
- реалізація.

Реалізація - цей тип відносин базується на інтерфейсах, тобто створюються інтерфейси, які основний клас повинен реалізувати.

Порівняння «композиції» та «успадкування», а також аналіз доцільності застосування тієї чи іншої ООП технології в даній статті не розглядаються. Метою статті є аналіз суті понять композиційної взаємодії між класами типу: «асоціація», «композиція», «агрегація», та визначення відмінності між цими типами.

Будемо дотримуватися тієї точки зору, що композиція, агрегація і асоціація все це типи відносин між об'єктами, які відрізняються тільки ступенем сили зв'язку (тобто - підхід де композиція і агрегація не є підтипами асоціації, а всі три типи, що розглядаються, реалізують окремий вид зв'язку).

Асоціація це такий тип, при якому об'єкти будуть посилатися один на одного. При цьому вони залишаються повністю незалежними один від одного.

Наприклад: «СТО» і «МЕХАНІК»

Агрегація це тип відносин, коли один об'єкт є частиною іншого. Агрегація утворює слабкий зв'язок між об'єктами. Всі залежні класи ініціалізуються поза основним об'єктом.

Наприклад: «АВТОМОБІЛЬ» і «ВОДІЙ»

Композиція це тип відносин, при яких один об'єкт може належати тільки іншому об'єкту і нікому іншому. При композиції утворюється сильний (абсолютно жорсткий) зв'язок між об'єктами. При такому типі зв'язку основний об'єкт повністю забезпечує життєвий цикл об'єктів від яких він залежить.

Наприклад: «АВТОМОБІЛЬ» і «ВИГУН».

Відштовхуючись від такого визначення відносин, визначимо деякі особливості «композиції».

Композиція - це концепція, яка моделює відносини. Вона дозволяє створювати складні типи, комбінуючи об'єкти інших типів. Це означає, що клас **Composite (клас-контейнер)** може містити об'єкт іншого класу **Component**. Клас-контейнер включає в

себе виклики конструкторів інших класів. В результаті виходить, що при створенні об'єкта класу-контейнера, також створюються об'єкти включених в нього класів-компонентів.

При взаємодії типу «композиція» можна виділити наступні особливості:

- 1) класи-компоненти не можуть існувати окремо від контейнера;
- 2) класи-компоненти не можуть бути створені окремо від класу-контейнера;
- *3) при створенні класу-контейнера обов'язково створюються всі екземпляри класів-компонентів;
- 4) при видаленні класу-контейнера, попередньо, повинні бути видалені всі класи-компоненти

**Цей пункт по різному трактується в різних джерелах, фактично створення неповного набору класів-компонентів не суперечить фундаментально поняттю «композиція»*

Досить чітко розмежування відношень наводиться в нотації UML, для кожної взаємодії запропоновано свій графічний символ (рис. 1)

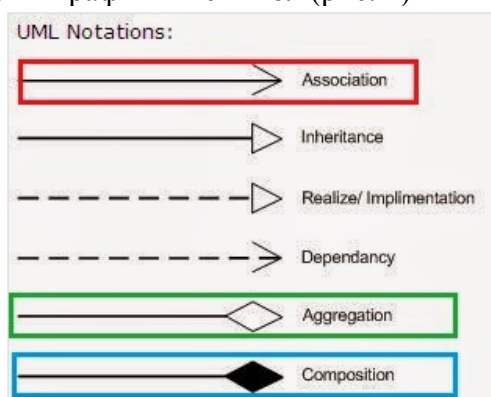


Рисунок 1 – Графічні позначення відношень в нотації UML

Джерело: [10]

UML представляє композицію таким чином:

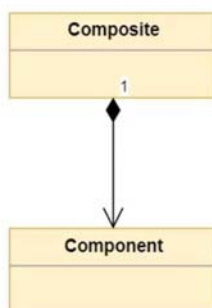


Рисунок 2 – Подання композиції в моделі UML

Джерело: розроблено автором

Проілюструємо композицію наступним прикладом

Питання: Нехай існує клас Family, в який композиційно входять ще три класи Husband, Wife і Child (рис. 3).

- 1) Чи може Family існувати з неповним набором композуючих класів або вони повинні бути всі в обов'язковому порядку (наприклад, тільки Husband і Wife або тільки Wife і Child)?

2) Чи може об'єкт будь-якого з композуючих класів бути знищений до знищення об'єкта-контейнера або композуючі об'єкти зобов'язані існувати поки існує об'єкт-контейнер?

3) Чи може композуючий клас бути створений не в момент створення об'єкту-контейнера а пізніше, наприклад, у разі виникнення певної умови або створений окремо?

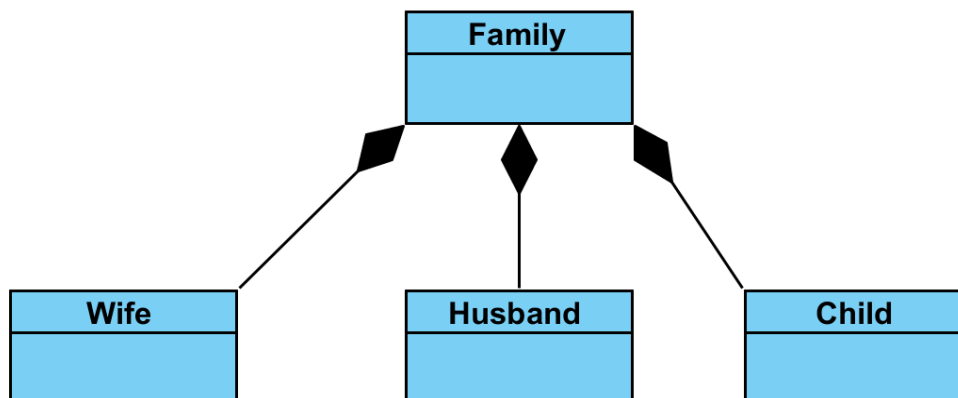


Рисунок 3 – Модель взаємодії Family

Джерело: розроблено автором

З визначення композиції - «включений» (композуючий) об'єкт може існувати тільки як частина контейнера. Якщо контейнер буде знищений, то і включений об'єкт теж буде знищений. Тобто поняття «композиції» однозначно визначає тільки момент знищення, але не момент створення об'єкта, що композиційно включається до класу.

Виходячи з останнього однозначно можна відповісти тільки на питання про творення об'єкту **окремо** - ні, об'єкт що входить в композицію окремо створений бути не може. Всі інші питання не однозначні.

Все залежить від логіки предметної області і, відповідно, конкретної реалізації в коді додатку. Якщо в додатку допускається існування неповних сімей, то звичайно може, а якщо неповні сім'ї заборонено (що досить нелогічно з точки зору моделювання реальної ситуації) - то ні. Але саме по собі використання композиції не накладає ніяких заборон на це. У прикладі з «сім'єю» доречніше використовувати агрегацію, а не композицію. Інакше кажучи об'єкти, що агрегуються (члени сім'ї) повинні створюватися поза об'єктом агрегату (сім'ї). Вони повинні передаватися йому ззовні (конструктори, присвоювання, додавання елемента в колекцію). Резюмуючи, можна сказати наступне: в композиції контейнер повністю керує життєвим циклом об'єктів, що входять в композицію і може створювати/не створювати/знищувати/динамічно замінювати їх в залежності від своєї логіки. При композиції "контейнер" може існувати без вмісту, а ось вміст (члени сім'ї в прикладі) без контейнера не можуть і "знищуються" разом з ним.

Висновки. Гнучкість ООП є і перевагою і недоліком парадигми одночасно, і це конкретне питання про взаємодію об'єктів в черговий раз демонструє цей факт.

У співтоваристві C++ термін «aggregation» використовувався для позначення класу, що визначає певний атрибут для посилання на об'єкти іншого незалежного класу (див. [9]), що в діаграмах класів UML визначено як «association». Термін «composition» використовувався для класів, які визначають об'єкти компонентів для своїх об'єктів, так що при знищенні складеного об'єкта ці об'єкти компонентів також знищуються.

У діаграмах класів UML і «aggregation», і «composition» були визначені як окремі випадки асоціацій, що представляють відносини між «частина»-«ціле». В нотації UML відмінність між «aggregation» і «composition» базується на критерії - чи дозволяється розділити «частину» між двома або більше «цілими». UML визначає «compositions» як такі, що не підлягають спільному використанню (ексклюзивні) частини, в той час як «aggregations» можуть ділитися своїми частинами. Крім того «compositions» визначають залежність життєвого циклу між «цілим» і його «частинами», так що «частини» не можуть існувати без «цілого».

Таким чином, хоча UML помістив терміни «aggregation» і «composition» в конкретний контекст (відносин «частина-ціле»), але авторам нотації не вдалося визначити їх чітким і недвозначним чином, вирішення питання здебільшого покладено на інтуїцію розробників. Однак це не дивно, тому що існує так багато різних властивостей (нюансів реалізації), які можуть мати ці відносини, і кожен з розробників має власну думку - як їх реалізувати.

Список літератури

1. Бублик В.В. Об'єктно-орієнтоване програмування: підруч. К.: ІТкнига, 2015. 624 с.
2. Вайсфельд, М. Объектно-ориентированное мышление. М.: Питер, 2014. 998 с.
3. Язык UML 2 и Унифицированный процесс. Практический объектно-ориентированный анализ и проектирование, 2-ое изд. Джим Арлоу, Айла Нейштадт; Иск: Символ-Плюс, 2007.
4. Композиция или наследование: как выбрать, статья Хабр. Автор оригинала: Steven Lowe. URL: <https://habr.com/ru/post/325478/> (дата звернення: 28.06.2021)
5. Композиция. Взаимное существование контейнера и композированного объекта, форум Stack Overflow. URL: <https://ru.stackoverflow.com/questions> (дата звернення: 27.06.2021)
6. Наследование, композиция, агрегация, статья Хабр. Автор Gamos. URL: <https://habr.com/ru/post/354046/> (дата звернення: 29.06.2021)
7. Кун Т. Структура научных революций. М., 2009. 310 с.
8. Хайдаров К.А. Объектно-ориентированное программирование. URL: <http://bourabai.kz/alg/oop.htm> (дата звернення: 28.06.2021)
9. Aggregation. december 7th, 2007 / last modified by alex on december 21st, 2020. URL: <https://www.learncpp.com/cpp-tutorial/aggregation/> (дата звернення: 28.06.2021)
10. Difference between Association, Composition and Aggregation in Java, UML and Object Oriented Programming URL: <https://javarevisited.blogspot.com/2014/02/difference-between-association-vs-composition-vs-aggregation.html> (дата звернення: 29.06.2021)
11. Соколов В. В. Применение функциональной и реляционной моделей в объектно-ориентированном программировании. *Information Technology and Security*. 2017. Vol. 5. Iss. 1 (8). С. 54-62.
12. Лаврищева К.М. ПРОГРАМНА ІНЖЕНЕРІЯ. К.: АкадемПеріодика, 2008. 319 с.

References

1. Bublik, V.V. (2015). *Ob'ektno-orientovane prohramuvannia [Object-oriented programming]*. Kyiv: ITknyha [in Ukraine].
2. Vajsfel'd, M. (2014). *Ob'ektno-orientirovannoe myshlenie [Object-oriented thinking]*. Moscow: Piter [in Russian].
3. Dzhim Arlou, Ajla Nejshtadt (2007). *UML 2 and the Unified Process. Practical object-oriented analysis and design*. (2d ed.) . Isk: Simvol-Pljus [in Russian].
4. Steven Lowe. Kompozicija ili nasledovanie: kak vybrat' [Composition or inheritance: how to choose]. Retrieved from <https://habr.com/ru/post/325478/> [in Russian].
5. Kompozicija. Vzaimnoe sushhestvovanie kontejnera i kompoziruemogo ob#ekta, forum Stack Overflow [Composition. Mutual existence of container and composable object, Stack Overflow forum]. *ru.stackoverflow.com*. Retrieved from <https://ru.stackoverflow.com/questions> [in Russian].
6. Habr. Avtor Gamos. Nasledovanie, kompozicija, agregacija [Inheritance, composition, aggregation]. Retrieved from <https://habr.com/ru/post/354046/> [in Russian].
7. Kun, T. (2009). *Struktura nauchnyh revoljucij [The structure of scientific revolutions]*. Moscow [in Russian].

8. Hajdarov, K.A. Ob#ektno-orientirovannoe programmirovaniye [Object Oriented Programming]. Retrieved from <http://bourabai.kz/alg/oop.htm> [in Russian].
9. Aggregation. december 7th, 2007 / last modified by alex on december 21st, 2020. Retrieved from <https://www.learncpp.com/cpp-tutorial/aggregation> [in English].
10. Difference between Association, Composition and Aggregation in Java, UML and Object Oriented Programming. Retrieved from <https://javarevisited.blogspot.com/2014/02/ifference-between-association-vs-composition-vs-aggregation.html> [in English].
11. Sokolov, V.V. (2017). Primenenie funktsionalnoi i reliatsionoi modelei v ob#ektno-orientirovannom programmirovanii [Application of functional and relational models in object-oriented programming]. *Information Technology and Security*, Vol. 5, Iss. 1 (8), 54-62 [in Russian].
12. Lavrishcheva, K.M. (2008). *Programna ingeneriia* [Software Engineering]. Kyiv: AcademPeriodika [in Ukraine].

Oleksandr Ulichev, PhD tech. sci., **Kostiantyn Buravchenko**, PhD tech. sci., **Liudmyla Polishchuk**, Senior Lecturer

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Object-oriented Approach in Programming. Compositional in Teraction of Objects

This article aims to consider the types of interaction, in particular the compositional interaction between objects, and to identify the characteristics of individual types. The aim of the article is to clarify the essence of the concepts of different types of relationships between classes. The article proposes a number of theses that illustrate the ambiguity of the interpretation of concepts - types of connections. In the following calculations, different types of interaction are illustrated by examples and one of the options for interpretation and classification of compositional interaction is proposed.

Analysis of a number of literature sources and articles in professional forums leads to the conclusion that the question of specifying the types of interaction and determining - which of the types should be implemented in a given case, is quite complex, despite the simplicity of its formulation. Some theses: 1) At the level of the basic definitions of OOP: composition is one of the types of interaction between objects in OOP (along with aggregation and association). But even at this stage, contradictions were found, in some sources the authors describe (suggest) that aggregation and composition are subspecies of association; 2) Many publications consider the interaction of objects at the level of opposition of "inheritance" and "composition". And this approach involves considering the interaction of objects at a higher level of abstraction, it is not considered the mechanisms of OOP, but rather the philosophy of the programming paradigm and the objective way of thinking; 3) In fact, there are no clear formal rules and restrictions (most modern OOP languages are quite flexible) and a specific approach to interaction between objects in building the object hierarchy is chosen directly by the developer (architect, programmer, etc.). The question of compliance of one or another configuration of the interaction of objects with the principles of OOP is very ambiguous.

The flexibility of the OOP is both an advantage and a disadvantage of the paradigm at the same time, and this particular issue of the interaction of objects once again demonstrates this fact. There are two main interpretations of the relationship, one formed in the Society of C ++ developers (taking into account the peculiarities of OOP in this programming language), the other is based on the principles and specifications of UML. Thus, although UML placed the terms "aggregation" and "composition" in a specific context ("part-whole" relationship), but the authors of the notation failed to define them clearly and unambiguously, the decision is largely left to the intuition of developers.

Object-oriented programming, UML, aggregation, association, composition, objects relationship

Одержано (Received) 12.01.2022

Прорецензовано (Reviewed) 25.01.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

УДК 32.97

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.105-110](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.105-110)**Н.М. Посторонко***Кіровоградська Мала академія наук учнівської молоді, м. Кропивницький, Україна***Д.В. Трушаков**, доц., канд. техн. наук, **О.А. Козловський**, доц., канд. техн. наук,**М.О. Федотова**, канд. техн. наук*Центральнотраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: dmitro.trushakov@gmail.com*

Створення ІКС «Чиста Україна» для моніторингу забруднення територій

Статтю присвячено створенню спеціалізованої інформаційно-комунікаційної системи (ІКС), яка б допомогла виявляти забруднення вулиць, факти вандалізму та швидко їх усувати. Основною метою дослідження є автоматизація процесу сповіщення та комунікації установ, що займаються прибиранням території вулиць міст та селищ України. Завданням дослідження є створення макету програмного забезпечення інформаційно-комунікаційної системи – макету веб ресурсу та макету мобільного додатку «Чиста Україна». Це дозволить установам, що займаються прибиранням території в режимі online виявляти забруднення вулиць та факти вандалізму шляхом комунікації з населенням та швидко їх усувати. Шляхом проведеного аналізу існуючих інформаційно-комунікаційних систем визначено найбільш оптимальне рішення - побудовано алгоритм роботи інформаційно-комунікаційної системи «Чиста Україна». В результаті проведеного дослідження було створено макет веб ресурсу інформаційно-комунікаційної системи та макет мобільного додатку «Чиста Україна», що дозволяють виявляти забруднення вулиць та факти вандалізму шляхом комунікації установ з населенням та швидко їх усувати. Завдяки цьому можна значно скоротити час на виявлення забруднень та збільшити ефективність праці установ, що займаються прибиранням територій у містах та селищах України.

інформаційно-комунікаційна система, платформа Figma, WEB сайт, мобільний додаток, забруднення вулиць та територій, комунікація з населенням

Постановка проблеми. В останні кілька років в Україні погіршилася ситуація з накопиченням побутових відходів. Проблема «сміття» доповнилася великою кількістю стихійних звалищ побутових відходів, які стали невід'ємною частиною міст і сіл України. Тому вирішення проблеми поводження з відходами сьогодні стало актуальним завданням для органів місцевого самоврядування в Україні. Через неналежну системи поводження з твердими побутовими відходами в населених пунктах, як правило у приватному секторі, щорічно виявляється 26,9 тис. несанкціонованих звалищ, що займають площу 0,58 тис. га, з них ліквідовано лише 26,4 тис. несанкціонованих звалищ площею 0,53 тис. га. Сьогодні, в час розвитку інформаційних технологій достатньо актуальним постало питання створення спеціалізованої інформаційної системи, яка б допомогла виявляти забруднення вулиць, факти вандалізму та швидко їх усувати. Також згідно з Законом України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» (В редакції № 2519-VI (2519-17) від 09.09.2010, ВВР, 2011, №4, ст.23) стаття 3 «Пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» дана робота підпадає під пріоритетний напрям розвитку 2 «інформаційні та комунікаційні технології».

Мета дослідження. Основною метою роботи є підвищення продуктивності праці державних установ, що займаються прибиранням вулиць міст та селищ України.

Завдання дослідження. Основне завдання роботи полягає в створенні програмного забезпечення інформаційно-комунікаційної системи (ІКС), тобто web ресурсу «Чиста Україна», який дозволить би виявляти забруднення території вулиць та факти вандалізму шляхом комунікації з населенням та швидко їх усувати.

Об'єкт дослідження це автоматизація процесу комунікації державних установ, що займаються прибиранням вулиць міст та селищ України.

Предмет дослідження це інформаційно-комунікаційна система виявлення забруднення вулиць.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно статистичних даних, що надало Міністерство розвитку громад та територій України [1] за 2019 рік (без урахування даних АР Крим та м. Севастополь) утворилось майже 53 млн. м³ побутових відходів, або понад 10 млн тонн, які захоронюються на 6 тис. сміттєзвалищ і полігонів загальною площею майже 9 тис. га. В останні кілька років в Україні погіршилася ситуація з накопиченням побутових відходів. Проблема «сміття» доповнилася великою кількістю стихійних звалищ побутових відходів, які стали невід'ємною частиною міст і сіл України [2]. У роботі [3] було описано процес створення веб-сторінки за допомогою HyperText Markup Language, при цьому основна увага була зосереджена методиці створення веб-сторінки за допомогою HTML. В роботах [4-6] описана актуальність та приведені основні компоненти інформаційно-комунікаційної системи для моніторингу забруднення у містах та селищах України.

Постановка завдання. В даній роботі дослідження спрямовані на розробку інтерактивного макету мобільного додатку «Чиста Україна» на платформі Figma. Спочатку потрібно розробити алгоритм роботи інформаційно-комунікаційної системи для моніторингу забруднення території вулиць. Потім потрібно створити макет програмного забезпечення інформаційно-комунікаційної системи, а саме макет веб ресурса та макет мобільного додатку «Чиста Україна», які дозволять установам, що займаються прибиранням території в режимі online виявляти забруднення вулиць та факти вандалізму шляхом комунікації з населенням та швидко їх усувати.

Виклад основного матеріалу. В останні кілька років в Україні суттєво погіршилася ситуація з накопиченням побутових відходів. Проблема «сміття» доповнилася великою кількістю стихійних звалищ побутових відходів, які стали невід'ємною частиною міст і сіл України. Тому вирішення проблеми поводження з відходами сьогодні стало актуальним завданням для органів місцевого самоврядування в Україні. Кількість утворених відходів в містах та селищах України з кожним роком збільшується. Охоплення населення послугами з вивезення побутових відходів в деяких областях України лише на рівні 63-64%. Через неналежну системи поводження з твердими побутовими відходами в Україні щорічно виявляється 26,9 тис. несанкціонованих звалищ, що займають площу 0,58 тис. га. Утворення відходів та управління ними [2] представлені в Таблиці 1 і Таблиці 2.

Таблиця 1 – Утворення та видалення відходів

Рік	Кількість утворених відходів (тис. тонн)	Кількість вивезених відходів (тис. тонн)	Кількість спалених відходів (тис. тонн)	Об'єм вивезених відходів у спеціально відведені місця (тис. тонн)
2014	355000,4	109280,1	944,7	203698,0
2015	312267,6	92463,7	1134,7	152295,0
2016	295870,1	84630,3	1106,1	157379,3
2017	366054	100056,3	1064,3	169801,6
2018	352333,9	103658,1	1028,6	169523,8
2019	441516,5	108024,1	1059,0	238997,2

Джерело: [2]

Таблиця 2 – Кількість установок поводження з відходами

Установки для поводження з відходами у 2019 році	Кількість штук.	Встановлена потужність, (тис. тонн)
Загальна кількість	1023	22869,9
Спалення відходів для отримання енергії	520	2036,1
Спалення відходів для термічної обробки відходів	117	784,9
Для утилізації(переробки) відходів	328	17488,1
Для видалення інших відходів	58	2560,8

Джерело: [2]

Стан забруднення вулиць в містах та селищах України знаходиться в тяжкому стані. Служби, які займаються прибиранням працюють вкрай не ефективно. Так достатньо часто прибираючи центральні вулиці віддалені від центра населеного пункту території можуть не прибирати роками. Населенню важко повідомляти про проблеми пов'язані в з діяльністю цих служб. Так, наприклад, для повідомлення про неприбрану вулицю необхідно звернутись з письмовим або усним зверненням у мерію або сільську раду де його можуть проігнорувати. Тому більшості громадянам доводиться змиритися з неприбраними вулицями не бажаючи проходити складну бюрократичну процедуру.

Огляд існуючих інформаційно-комунікаційних систем показав, що в Україні відсутня система яка допомагає сповіщати служби, що займаються прибиранням територій про проблеми пов'язані з їх діяльністю.

Сьогодні, в час розвитку інформаційних технологій перед суспільством достатньо актуальним постало питання створення спеціалізованої інформаційної системи, яка б допомогла виявляти забруднення вулиць, факти вандалізму та швидко їх усувати.

В даній роботі дослідження спрямовані на розробку інтерактивного макету мобільного додатку «Чиста Україна» на платформі Figma.

Figma це векторний онлайн-сервіс розробки інтерфейсів та прототипування з можливістю організації спільної роботи, що розробляється однойменною компанією [7]. Figma може працювати у браузері, якщо той підтримує технологію WebGL перевірити це можна за посиланням webglreport.com. Даний редактор підходить як для створення простих прототипів і дизайн-систем, так і складних проєктів (мобільні додатки, портали). У 2018 році платформа стала одним із тих інструментів для розробників і дизайнерів, що найбільш швидко розвиваються.

Було створено інтерактивний макет мобільного додатку «Чиста Україна» на платформі Figma. Алгоритм роботи даної інформаційно-комунікаційної системи полягає у наступному:

- Якщо людина - заявник виявила факт забруднення на вулиці або факт вандалізму, то цей факт потрібно зафіксувати на фото або відео.
- Потрібно зайти на створений інформаційно-комунікаційний мобільний додаток або web ресурс та заповнити форму повідомлення про забруднення або про здійснення факту вандалізму і прикріпити фото або відео файл.
- Працівники відповідної спеціалізованої установи ознайомлюються з повідомленням.
- У випадку, якщо повідомлення є змістовним та детальним, працівники установи передають його у службу, яка займається прибиранням території та усуває наслідки забруднення.

– Працівники спеціалізованої установи інформують заявника про виконану роботу.

Блок-схема алгоритму роботи даної інформаційно-комунікаційної системи «Чиста Україна» для моніторингу забруднення територій у містах та селищах України зображена на рис. 1.

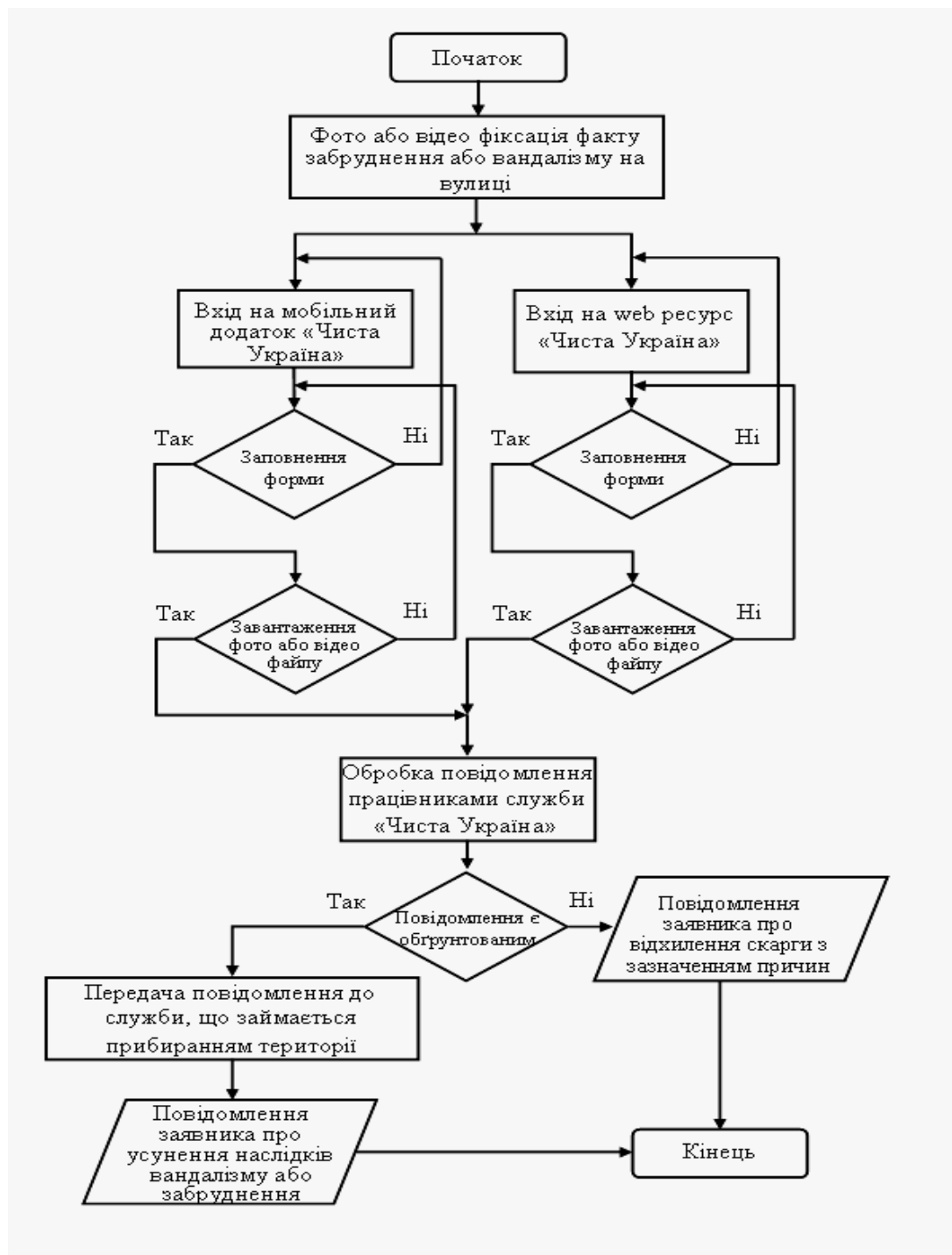


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму роботи даної інформаційно-комунікаційної системи «Чиста Україна» для моніторингу забруднення територій

Джерело: розроблено авторами

Інтерактивний макет мобільного додатку «Чиста Україна» представлено на рис. 2.



а – назва інтерактивного макету; б – головна сторінка; в – сторінка повідомлення

Рисунок 2 – Інтерактивний макет мобільного додатку «Чиста Україна»

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Сукупність проведених у роботі досліджень являє собою рішення задач в області створення інформаційно-комунікаційних систем. В результаті проведеного дослідження було створено інтерактивний макет мобільного додатку «Чиста Україна» на платформі Figma, що дозволяє виявляти забруднення вулиць та факти вандалізму шляхом комунікації з населенням та швидко їх усувати. Завдяки впровадженню представленої інформаційно-комунікаційної системи вдасться покращити якість прибирання територій вулиць міст та селищ України. Також завдяки даній системі будуть створені нові робочі місця для роботи на яких людям не потрібна спеціальна освіта. Багато з робочих місць зможуть зайняти люди, які будуть працювати дистанційно перевіряючи заявки користувачів.

Список літератури

1. Міністерство розвитку громад та територій України. Офіційний веб-сайт Міністерства. URL: <https://www.minregion.gov.ua/> (дата звернення: 11.02.2022)
2. Державна служба статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 11.02.2022)
3. Трушаков Д.В., Тороп Т.С. Розробка та дослідження методики створення WEB-сторінок. *Наукові записки*. 2015. Вип. 17. С.21-27.
4. Postoronko N., Trushakov D.. Creation of an information and communication system for monitoring territory street pollution in cities and towns of Ukraine. *Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві*: зб. тез доповідей Міжнар. наук.-практ. on-line конференції. Кропивницький: ЦНТУ, 2020. С. 131-132.
5. Nazar Postoronko, Dmitro Trushakov. Information and communication system for detecting street pollution - one of the main components of the digital economics in Ukraine. *Proceedings International Symposium Experience. Knowledge. Contemporary Challenges „Contemporary Economy and Society. Challenges and Solutions”*. Publishing Artifex, Bucharest, Romania, 2020. P. 454-460.
6. Посторонко Н.М., Трушаков Д.В. Створення інформаційно-комунікаційної системи для моніторингу забруднення територій вулиць у містах та селищах України. *Наукові записки*. 2020. Вип. 28. С.39-44
7. Окунев А. Руководство по Figma. URL: <https://medium.com/slashdesigner/figma-guide-5235b8a8ab4f> (дата звернення: 13.02.2022)
8. Маслянюк П.П., Лісов П.М. Інформаційно - комунікаційні системи та технології обробки інформаційних ресурсів. URL: http://www.lisov.kiev.ua/files%5Cpublications%5CKPI%5CMaslyanko_Lisov_IRProcessing.pdf (дата звернення: 14.02.2022)
9. Леонтьев В.П. Новейшая энциклопедия Интернет. М. : ОЛМА-ПРЕСС, 2002. 607 с.
10. Інформаційно-комунікаційні технології. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Інформаційно-комунікаційні_технології (дата звернення: 14.02.2022)
11. Русаков М. Учебник по Основам HTVML. URL: <http://myrusakov.ru> (дата звернення: 15.02.2022)

References

1. Ministerstvo rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy. Ofitsiyniy veb-sait Ministerstva [Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine. Official website of the Ministry]. *minregion.gov.ua*. Retrieved from <https://www.minregion.gov.ua/> [in Ukrainian].
2. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy [State Statistics Service of Ukraine]. *ukrstat.gov.ua*. Retrieved from <http://www.ukrstat.gov.ua/> [in Ukrainian].
3. Trushakov, D.V. & Torop, T.S. (2015). Rozrobka ta doslidzhennia metodyky stvorennia WEB-storinok

- [Development and research of methods of creating WEB-pages]. *Naukovi zapysky – Proceedings, Vol. 17*, 1-27 [in Ukrainian].
4. Postoronko, N. & Trushakov, D. (2020). Creation of an information and communication system for monitoring territory street pollution in cities and towns of Ukraine. *Problems of energy efficiency and automation in industry and agriculture: Zbirnyk tez dopovidei Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi on-line konferentsii* (pp. 131-132). Kropyvnytskyi: TsNTU [in English].
 5. Postoronko Nazar & Trushakov Dmitro. (2020). Information and communication system for detecting street pollution - one of the main components of the digital economics in Ukraine. *Proceedings International Symposium Experience. Knowledge. Contemporary Challenges „Contemporary Economy and Society. Challenges and Solutions”*. Publishing Artifex, Bucharest, Romania. 454-460 [in English].
 6. Postoronko, N.M. & Trushakov, D.V. (2020). Stvorennia informatsiino-komunikatsiinoi systemy dlia monitorynhu zabrudnennia terytorii vulyts u mistakh ta selyshchakh Ukrainy [Creation of an information and communication system for monitoring the pollution of street areas in cities and towns of Ukraine]. *Naukovi zapysky – Proceedings, Vol. 28*, 39-447 [in Ukrainian].
 7. Okunev, A. Rukovodstvo po Figma [Figma Guide]. *medium.com*. Retrieved from <https://medium.com/slashdesigner/figma-guide-5235b8a8ab4f> [in Russian].
 8. Maslianko, P.P. & Lissov, P.M. Informatsiino - komunikatsiini systemy ta tekhnolohii obrobky informatsiinykh resursiv [Information and communication systems and technologies for processing information resources]. Retrieved from http://www.lissov.kiev.ua/files%5Cpublications%5CKPI%5CMaslyanko_Lissov_IRProcessing.pdf [in Ukrainian].
 9. Leontev, V.P. (2002). Noveishaia entsyklopediya Ynternet. M.: OLMA-PRESS. 607s [in Russian].
 10. Informatsiino-komunikatsiini tekhnolohii [Information and communication technologies]. *uk.wikipedia.org*. Retrieved from https://uk.wikipedia.org/wiki/Інформаційно-комунікаційні_технології [in Ukrainian].
 11. Rusakov, M. Uchebnyk po Osnovam HTVML [HTVML Basics Tutorial]. Retrieved from <http://myrusakov.ru> [in Russian].

Nazar Postoronko

Junior Academy of Sciences of Ukraine Kirovograd Region, Kropyvnytskyi, Ukraine

Dmytro Trushakov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Kozlovskyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Marianna Fedotova**, PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Creation of an Information and Communication System «Clean Ukraine» for Monitoring Territory Pollution

The article is devoted to the creation of a specialized information and communication system that would help detect street pollution, vandalism and eliminate them quickly.

The main purpose of the study is to automate the process of notification and communication of institutions engaged in cleaning the streets of cities and towns of Ukraine. The task of the research is to create a layout of the software of the information and communication system - the layout of the web resource and the layout of the mobile application "Clean Ukraine". This will allow online clean-up agencies to detect street pollution and vandalism by communicating with the public and removing them quickly. By analyzing the existing information and communication systems, the most optimal solution was determined - the algorithm of the information and communication system "Clean Ukraine" was built.

As a result of the study, a layout of the web resource of the information and communication system and a layout of the mobile application "Clean Ukraine" were created, which allows to detect street pollution and vandalism by communicating with the population and quickly eliminate them. An interactive layout of the Clean Ukraine mobile application was created on the Figma platform. The algorithm of this information and communication system is as follows. If the applicant person has discovered street pollution or vandalism, this fact must be recorded in a photo or video. You need to go to the created information and communication mobile application or web resource and fill out the form of notification of pollution or vandalism and attach a photo or video file. Employees of the relevant specialized institution read the message. If the message is meaningful and detailed, the staff of the institution passes it to the service, which cleans the area and eliminates the consequences of pollution. Employees of the specialized institution inform the applicant about the work performed. This can significantly reduce the time to detect contaminants and increase the efficiency of institutions involved in cleaning up the area. Thanks to the introduction of the presented information and communication system, it will be possible to improve the quality of cleaning the streets of cities and towns of Ukraine. Also, this system will create new jobs for which people do not need special education. Many of this work will be filled by people who will work remotely checking user requests.

information and communication system, Figma platform, WEB site, mobile application, pollution of streets and territories, communication with the population

Одержано (Received) 21.02.2022

Прорецензовано (Reviewed) 04.03.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

УДК 621.311.1: 621.316.37 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.111-118](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.111-118)

А. І. Котиш, доц., канд. техн. наук, В. В. Зінзура, доц., канд. техн. наук,
Н. Ю. Гарасьова, доц., канд. техн. наук, О. І. Сіріков, доц., канд. техн. наук,
В. П. Солдатенко, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: akotysh@gmail.com

Підвищення точності визначення місця виникнення короткого замикання в електричних мережах номінальною напругою 110-150 кВ

На основі аналізу схеми нормального режиму мережі 150 кВ ПрАТ «Кіровоградобленерго» встановлено, що існує ряд підстанцій, де встановлення фіксаторів короткого замикання просто необхідно для виявлення відгалуження на лінії електропередач, де виникло пошкодження. Запропоновано на базі розробленого пристрою електромеханічного фіксатора короткого замикання для повітряних мереж напругою 110-150 кВ запровадження радіоканалу для передачі інформації про стан мережі та місця пошкодження до чергового персоналу.

лінія електропередач, коротке замикання, електрична мережа, фіксатор, ізоляція

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку електроенергетики важливу роль відіграє питання надійності роботи високовольтих електричних мереж. В процесі експлуатації таких електричних мереж неминуче виникають аварійні ситуації, найнебезпечнішими з яких є короткі замикання (КЗ). В електричних мережах високої та середньої напруги кількість пошкоджень може досягати більше сотні випадків на рік [1, 2]. Визначення місця пошкодження (ВМП) електричної мережі є найбільш складною, тривалою та трудомісткою технологічною операцією. Витрати на ВМП організацій, що займаються експлуатацією електричних мереж, становлять значну частину експлуатаційних коштів. В той же час частка витрат на пристрої для ВМП в загальних витратах відносно мала. Це, в першу чергу, пов'язано з недосконалістю існуючих пристроїв для ВМП в електричних мережах. Зважаючи на це, задача удосконалення конструкції пристроїв для ВМП, використання яких значно зменшить рівень експлуатаційних витрат на електричні мережі, є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз наукових публікацій показав, що в теперішній час розроблено велику кількість пристроїв для ВМП. Питанню визначення місця ушкодження присвячена чимала кількість робіт як вітчизняних, так і закордонних учених [3, 4, 5]. Основний внесок у теорію та практику ВМП ліній електропередачі (ЛЕП) внесли А.І. Айзенфельд, В.М. Кутін, Г.М. Шалит, Е.А. Аржанніков, С.С. Саухатас, В.Н. Аронсон, Ю.А. Лямец та ін. Найбільшого поширення в електричних мережах набули пристрої типу ФІП (ФІП-1, ФІП-2, ФІП-Ф), ЛИФП [6]. Враховуючи, що фіксуючі прилади здійснюють автоматичне вимірювання та фіксацію електричних параметрів режиму мережі під час КЗ, вони повинні забезпечувати:

- високу швидкість – вимірювання параметрів повинно відбуватися за період часу від моменту виникнення короткого замикання до моменту початку відключення пошкоджених ділянок ЛЕП системами релейного захисту (до 0,1 с);

© А. І. Котиш, В. В. Зінзура, Н. Ю. Гарасьова, О. І. Сіріков, В. П. Солдатенко, 2022

- достатню точність вимірювання – відносна похибка вимірювання не повинна перевищувати 5%;

- можливість тривалого зберігання фіксованих параметрів – прилад повинен забезпечувати зберігання зафіксованих значень параметрів режиму протягом часу, достатнього для прибуття на підстанцію оперативної виїзної ремонтної бригади (не менше 4 год.);

- можливість автоматичного селективного запуску приладів з метою фіксації контрольованих параметрів лише у випадку аварійних відключень ліній.

Таким чином, для виявлення та пошуку місця КЗ необхідна наявність апаратного комплексу, що складається з таких підсистем [7]:

- системи релейного захисту для здійснення фіксації пошкоджень і відключення пошкодженої зони від мережі;

- системи дистанційного вимірювання для звуження (локалізації) зони пошуку пошкодження.

Проте, для випадку ЛЕП з великою кількістю відгалужень значної протяжності (рис. 1) описана система в більшості випадків не здатна правильно визначити відгалуження, на якому відбулось КЗ.

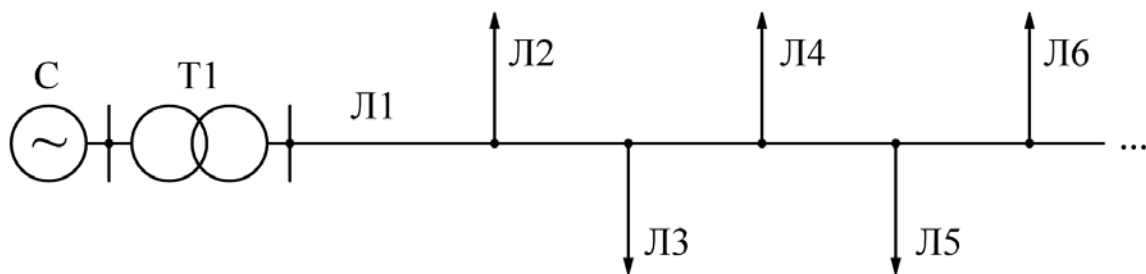


Рисунок 1 – Схема електричної мережі напругою 110-150 кВ, що містить ЛЕП з великою кількістю відгалужень

Джерело: розроблено авторами

Одним із шляхів вирішення проблеми підвищення точності визначення місця КЗ в електричній мережі є застосування спеціальних технічних засобів – фіксаторів короткого замикання (ФКЗ).

Постановка завдання. Метою дослідження є підвищення надійності роботи електричних мереж напругою 110-150 кВ за рахунок застосування розробленого пристрою ФКЗ, що використовує радіоканал для передачі інформації.

Виклад основного матеріалу. Для проведення дослідження було використано схему нормального режиму електричної мережі 150 кВ ПрАТ Кіровоградобленерго. Проведений аналіз конфігурації зазначеної мережі показав, що в ній наявна певна кількість підстанцій, які отримують живлення по ЛЕП, що являють собою глухі відгалуження. Тому встановлення ФКЗ на таких лініях є необхідним. На теперішній час розроблені авторами пристрої ФКЗ [8, 9] успішно експлуатуються в електричних мережах ПрАТ «Кіровоградобленерго». Основними перевагами розроблених пристроїв ФКЗ є простота конструкції та зручність в експлуатації. Фіксатор короткого замикання необхідно встановлювати на фазному проводі в будь-якому зручному для спостереження місці. Проте для зменшення механічного впливу на пристрій (вібрацій, коливань від поривів вітру) найбільш доцільно встановлювати його поблизу опори між віброгасником і ізолятором (рис. 2).



Рисунок 2 – Розміщення ФКЗ на лінії електропередачі

Джерело: розроблено авторами

Проте, описані пристрої мають суттєвий недолік: їх конструкція не передбачає передачу інформації про параметри аварійного режиму мережі на диспетчерський пункт. Це спричиняє значні додаткові витрати, пов'язані із необхідністю візуального контролю кожного з пристроїв ФКЗ для визначення відгалуження на якому сталося КЗ. Наявність можливості передавання інформації про параметри аварійного режиму від ФКЗ до диспетчерського пункту дозволить відправити бригаду ОВБ одразу до пошкодженого відгалуження, що в свою чергу зменшить витрати часу та транспортні витрати на пошук місця пошкодження.

Авторами статті запропоновано використання радіоканалу для передачі інформації про стан мережі від ФКЗ до диспетчерського пункту. Найбільш доцільними способами організації радіоканалу є:

- використання GSM мереж;
- використання передавачів неліцензійних частот, наприклад, діапазону 433/868 МГц. Розглянемо більш детально переваги та недоліки кожного із зазначених способів організації радіоканалу.

1. *Застосування GSM модемів.* Цей спосіб організації радіоканалу є достатньо простий лише при наявності покриття в місці встановлення ФКЗ. Для його реалізації найбільш доцільно використати готовий радіомодуль – GSM модем. Але зазначений спосіб реалізації радіоканалу має ряд суттєвих недоліків, головним з яких є відносна складність забезпечення живлення GSM модему. Для випадку неперервної роботи GSM модему його живлення можна забезпечити або безпосередньо від ЛЕП (із використанням ємнісних дільників напруги, трансформаторів напруги), або шляхом застосування автономних сонячних електростанцій невеликої потужності. Це, в свою чергу значно підвищить вартість пристрою та знизить ефективність його застосування. Можливий випадок короткочасного ввімкнення GSM модему лише на час передачі інформації. Але, за такого підходу, GSM модем також потребуватиме відносно великої кількості енергії (лише на реєстрацію в мережі GSM потрібно до 15 с при роботі модему з потужністю 1-3 Вт). Це в свою чергу, вимагає використання акумуляторів в схемі живлення GSM модему. Наявність акумуляторів в схемі живлення модему передбачає їх заміну через 5-7 років, що ускладнює експлуатацію ФКЗ. До того ж, використання GSM модему пов'язане із необхідністю оплати послуг зв'язку за певним тарифним планом.

2. *Використання прийомо-передавачів неліцензійних частот.* Цей спосіб організації радіоканалу є більш складним, адже він потребує врахування багатьох факторів при проектуванні, таких як вибір неліцензованої частоти, вибір антен, визначення потужності передавачів, врахування характеру місцевості та відстані між

приймачем та передавачем і т.д. Проте суттєвою перевагою даного способу передачі інформації, в порівнянні із використанням GSM модему, є відносно невелика кількість енергії, яка необхідна для короткочасної роботи передавача. Одним з найдоцільніших варіантів схеми живлення радіопередавача є використання енергії магнітного поля проводу (від робочого струму або струму КЗ) з накопиченням її в іоністорі або електролітичному конденсаторі. Зазначений спосіб живлення радіопередавача забезпечує тривалий термін експлуатації пристрою ФКЗ (до 20 років) та значне скорочення витрат на його обслуговування. До того ж, на відміну від використання мережі GSM, застосування неліцензійних частот виключає постійні грошові витрати.

До недоліків застосування прийомо-передавачів неліцензійних частот в якості каналу передачі інформації від пристрою ФКЗ до диспетчерського пункту є його дещо нижча надійність, в порівнянні із варіантом використання мережі GSM. До того ж такий спосіб організації радіоканалу потребує вирішення питання завадозахищеності на етапі проектування.

Основною задачею запропонованого в роботі радіофіксатора КЗ є контроль значення фазного струму повітряної лінії електропередачі і передача інформації по радіоканалу про факт КЗ. Радіофіксатор необхідно встановлювати в місці відгалуження повітряної лінії електропередачі, а приймач радіосигналу – на найближчій підстанції з оперативним персоналом. Мінімальні відстані від місця встановлення ФКЗ до підстанцій з оперативним персоналом згідно даних ПрАТ «Кіровоградобленерго» наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Відстані від ФКЗ до підстанцій 150 кВ з оперативним персоналом

Назва підстанції	<i>L, км</i>
Центральна	6,6
Знам'янка-тягова (Шаровка)	14,2
Геолог	13,3
Кварцит-330	2,4
Березовка	16,7
ЗЧМ	12
Знамянка-тягова (Орбіта)	7,5
Жилселище	1,7
Максимальна відстань	16,7
Мінімальна відстань	1,7

Джерело: розроблено авторами

Як можна побачити із табл. 1, відстань для передачі інформації від ФКЗ по підстанції є відносно невелика (до 20 км).

Більшість діапазонів не ліцензованих частот знаходиться в області ультракороткохвильового (УКХ) діапазону 26,957–27,283 МГц (10 мВт), 433,075–434,79 МГц (10 мВт), 864–865 МГц (25 мВт) та ін. Особливістю УКХ діапазону є прямолінійне поширення радіохвиль у межах прямої видимості (рис. 3).

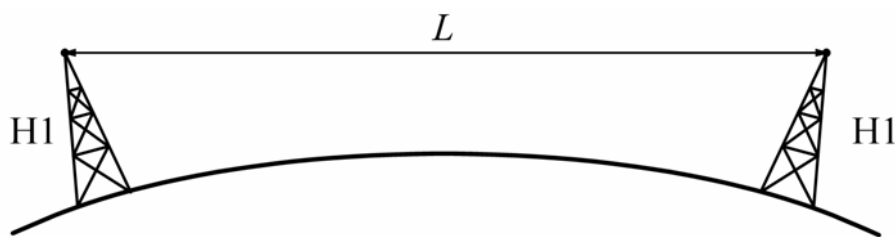


Рисунок 3 – Прямая видимість на радіолінії

Джерело: розроблено авторами

Орієнтовну дальність прямої видимості в L , м з урахуванням рефракції радіохвиль в УКХ діапазоні, можна визначити за формулою [10]:

$$L \approx 4,12 \cdot 10^3 (\sqrt{H1} + \sqrt{H2}), \quad (1)$$

де $H1, H2$ – відповідно висота приймальної та передавальної вишок, м.

Враховуючи те, що пристрій ФКЗ розташовується на проводі ЛЕП 150 кВ, а мінімальна висота підвісу такого проводу згідно ПУЕ складає 6 м, то саме це значення і приймемо, як розрахункове.

З формули (1) шляхом перетворень отримаємо вираз для визначення мінімальної висоти вишки приймальної станції:

$$H1 = \left(\frac{L}{4,12 \cdot 10^3} - \sqrt{H2} \right)^2 = \left(\frac{16,7 \cdot 10^3}{4,12 \cdot 10^3} - \sqrt{6} \right)^2 = 2,57 \text{ м}. \quad (2)$$

Основні вимоги, що висуваються до радіоканалу передачі інформації від пристрою ФКЗ до диспетчерського пункту:

1. Використання не ліцензованих частот;
2. Застосування частотної модуляція, як такої, що має більш високий рівень завадозахищеності;

Проведемо розрахунок максимальної теоретичної відстані роботи радіоканалу. Для цього використаємо формулу визначення потужності сигналу на вході радіоприймального пристрою [10], Вт:

$$P_{\text{прм}} = \frac{P_{\text{прд}}(\text{Вт}) G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \lambda^2}{(4\pi r)^2}, \quad (3)$$

де $P_{\text{прм}}$ – потужність сигналу на вході радіоприймача;

$P_{\text{прд}}$ – потужність сигналу на виході радіопередавача;

λ – довжина хвилі радіосигналу;

r – відстань між приймачем і передавачем;

$G_{\text{прд}}$ – коефіцієнт підсилення антени радіопередавача (в разях);

$G_{\text{прм}}$ – коефіцієнт підсилення антени радіоприймача (в разях)

Виразивши з виразу (3) значення відстані r між передавачем та приймачем, отримаємо:

$$r = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{\text{прд}} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \lambda^2}{P_{\text{прм}}}}, \quad (4)$$

Довжина хвилі для частоти 433 МГц складає $\lambda = 0,692$ м.

Таким чином, підставивши всі дані в (4) отримаємо

$$r = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{0,005 \cdot 1,58 \cdot 1,63 \cdot 0,692^2}{1 \cdot 10^{-13}}} = 19760 \text{ м} = 19,76 \text{ км}.$$

Таким чином, отримане значення теоретичної дальності передачі (19,76 км) виявилось білим, за максимальну відстань між місцем встановлення ФКЗ та підстанцією (16,7 км). Це свідчить про можливість застосування радіоканалу на не ліцензійних частотах в якості каналу зв'язку для передачі інформації між пристроєм ФКЗ та диспетчерським пунктом (підстанцією 150 кВ).

Слід відмітити, що проведений розрахунок є досить наближеним, і не враховує послаблення сигналу при проходженні крізь перешкоди. Для визначення можливості використання радіоканалу для передачі інформації від ФКЗ до диспетчерського пункту необхідно проводити додаткові експериментальні дослідження.

В якості джерела живлення передавача ФКЗ та одночасно і датчика струму КЗ авторами було запропоновано використати пристрій на основі котушки Роговського [11]. Перевагою такого способу живлення є його відносно невелика вартість та простота монтажу.

Висновки.

1. Впровадження нових, прогресивних методів та засобів визначення місць пошкоджень в сучасних умовах має значний економічний ефект, обумовлений запобіганням переходу нестійких пошкоджень у стійкі, зменшенням часу перерв електропостачання, зменшенням об'єму ремонтних робіт, зниженням транспортних витрат тощо.

2. Аналізуючи схему нормального режиму мережі 150 кВ ПрАТ «Кіровоградобленерго» можна констатувати, що є ряд підстанцій де встановлення фіксаторів короткого замикання просто необхідно. Запровадження радіоканалу для передачі інформації про стан мережі від ФКЗ до чергового персоналу підстанції дозволить зменшити час, а також транспортні витрати на пошук пошкодження.

3. Проведені орієнтовні розрахунки, які підтверджують можливість створення радіоканалу для передачі інформації від ФКЗ на відстань до 20 км, з використанням прийомо-передавачів не ліцензійних частот (433 МГц). Для врахування послаблення радіосигналу при проходженні крізь перешкоди необхідно проводити дослідження в умовах конкретної місцевості.

Список літератури

1. Шалыт, Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. Москва: Энергоиздат, 1982. 312 с.
2. Айзенфельд, А.И., Шалыт Г.М. Определение мест короткого замыкания на линиях с ответвлениями. Москва: Энергия, 1977. 208 с.
3. Кузнецов, А.П. Определение мест повреждения на воздушных линиях электропередачи. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 94 с.
4. Кутин, В.М., Кульматицкий О.И. Диагностирование электрических распределительных сетей. Киев: Техніка, 1993. 160 с.
5. Аржанников Е.А., Чухин А.М. Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи. Москва: НТФ «Энергопрогресс», 1988. 64с.
6. Айзенфельд А.И., Аронсон В.Н., Гловацкий В.Г. Фиксирующие индикаторы тока и напряжения ЛИФП-А, ЛИФП-В, ФПТ и ФПН. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 88 с.
7. Егорова О.Ю., Егоров О.Б., Карова Т.А. Порівняльний аналіз методів визначення місця пошкодження ПЛЕП. *Системи озброєння і військова техніка*. 2009. №2(18). С. 141-144.
8. Плешков П.Г., Котиш А.І., Сіріков О.І. Розробка фіксатора коротких замикань для повітряних ліній електропередач напругою 110-150 кВ. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2015. № 42. С. 8-11.

9. Котиш А.І., Плешков П.Г., Орлович А.Ю., Сіріков О.І., Некрасов А.В. Розробка та експериментальне дослідження фіксатора коротких замикань для повітряних електричних мереж напругою 110-150 кВ. *Техніка в с/г виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту*. 2016. Вип. 29. С. 228-235.
10. Выходная мощность сигнала передатчика. / веб-сторінка URL: <http://digteh.ru/UGFSvSPS/power> (дата звернення: 18.12.2021).
11. Что такое пояс Роговского – описание, применение, устройство. веб-сторінка URL: <https://elektronchic.ru/avtomatika/chto-takoe-poyas-rogovskogo.html> (дата звернення: 18.12.2021).

References

1. Shalyt, G.M. (1982). *Opredelenie mest povrezhdeniya v elektricheskikh setyah [Determining fault locations in electrical networks]*. Moscow: Energoizdat [in Russian].
2. Ayzenfel'd, A.I., & Shalyt, G.M. (1977). *Opredelenie mest korotkogo замыкания на линиях с ответвлениями [Locating short circuits on branch lines]*. Moscow: Energiya [in Russian].
3. Kuznetsov, A.P. *Opredeleniye mest povrezhdeniya na vozduzhnykh linyakh elektroperedachi [Determination of damage locations on overhead power lines]*. Moscow: Energoatomizdat [in Russian].
4. Kutin, V.M., & Kul'matitskiy, O.I. (1993). *Diagnostirovaniye elektricheskikh raspreditel'nykh setey [Diagnostics of electrical distribution networks]*. Kyiv: Tekhnika [in Russian].
5. Arzhannikov, E.A., & Chukhin, A.M. (1988). *Metody i pribory opredeleniya mest povrezhdeniya na linyakh elektroperedachi [Methods and devices for determining the location of damage on power lines]*. Moscow: STF «Energoprogress» [in Russian].
6. Ajzenfel'd, A.I., Aronson, V.N., & Glovackij, V.G. (1989). *Fiksiruyushchie indikatory toka i napryazheniya LIFP-A, LIFP-V, FPT i FPN [Fixing current and voltage indicators LIFP-A, LIFP-V, FPT and FPN]*. Moscow: Energoatomizdat [in Russian].
7. Ehorova, O.Yu., Ehorov, O.B., & Karova T.A. (2009). Porivnialnyi analiz metodiv vyznachennia mistisia poshkodzhennia PLEP [Comparative analysis of methods for determining the location of OPL damage]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika. – Weapons Systems and Military Equipment*, 2(18), 141-144 [in Ukrainian].
8. Plieshkov, P.H., Kotysh, A.I., & Sirikov, O.I. (2015). Rozrobka fiksatora korotkykh замыкан для повітряних ліній електропередач напругою 110-150 кВ [Development of a short circuit clamp for overhead power lines with a voltage of 110-150 kV]. *Visnyk NTU «KhPI»*. – *Bulletin of NTU «KhPI»*, 42, 8-11 [in Ukrainian].
9. Kotysh, A.I., Plieshkov, P.H., Orlovych, A.Yu., Sirikov, O.I., & Nekrasov A.V. (2016). Rozrobka ta eksperymentalne doslidzhennia fiksatora korotkykh замыкан для повітряних електричних мереж напругою 110-150 кВ [Development and experimental study of short-circuit latch for overhead electrical networks with a voltage of 110-150 kV]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohrads'koho Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v s/h vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiia. – Collection of scientific works of Kirovograd National Technical University. Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation*, 29, 228-235, [in Ukrainian].
10. Vyhodnaya moshchnost' signala peredatchika [Transmitter signal output power]. *digteh.ru*. Retrieved from <https://digteh.ru/UGFSvSPS/power/> [in Russian].
11. Chto takoe poyas Rogovskogo – opisanie, primenenie, ustroystvo [What is a Rogowski belt - description, application, device] . *elektronchic.rul*. Retrieved from elektronchic.ru/avtomatika/chto-takoe-poyas-rogovskogo.html [in Russian].

Andrii Kotysh, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vasyl Zinzura**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Nataliia Harasova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Sirikov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Valentyn Soldatenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Improving the Accuracy of Determining the Location of Short Circuits in Electrical Networks with a Nominal Voltage of 110-150 kV

The article is devoted to the study of improving the efficiency of the electric network with a voltage of 110-150 kV through the use of a developed device FKZ, which uses a radio channel to transmit information.

At the present stage of development of electric power industry the question of reliability of work of high-voltage electric networks plays an important role. During the operation of such electrical networks, emergencies inevitably occur, the most dangerous of which are short circuits. Determining the location of damage to the electrical network is the most complex, time-consuming and time-consuming technological operation with significant costs. Therefore, the task of improving the design of devices to determine the location

of damage, the use of which will significantly reduce the level of operating costs for electrical networks, is relevant.

One of the ways to solve the problem of improving the accuracy of determining the location of a short circuit in the electrical network is the use of special technical means - short circuit clamps.

The scheme of the normal regime of the 150 kV electric network of PJSC Kirovogradoblenergo was used for the research. The analysis of the configuration of this network showed that it has a number of substations that receive power from transmission lines, which are deaf branches. Therefore, the installation of short-circuit latches on such lines is necessary.

The authors of the article propose the introduction of a radio channel to transmit information about the state of the network and the place of damage to the next personnel of the substation. The most appropriate ways to organize a radio channel are: the use of GSM networks; use of unlicensed frequency transmitters.

Approximate calculations have been carried out, which confirm the possibility of creating a radio channel for transmitting information from the short-circuit lock for a distance of up to 20 km, using transceivers of non-licensed frequencies.

power line, short circuit, electrical network, lock, isolation

Одержано (Received) 04.01.2022

Прорецензовано (Reviewed) 19.01.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 004.8+614.8+331.452 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.119-124](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.119-124)

К.М. Марченко, доц., канд. техн. наук, **О.В. Оришака**, доц., канд. техн. наук,
А.К. Марченко, А.М. Мельник
*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,
Україна
e-mail: k_marchenko@i.ua, oryhsaka@gmail.com*

Ризики впровадження штучного інтелекту в комп'ютерні системи

У статті розглянуті питання автоматизованої обробки інформації в комп'ютерних системах. Розглянуті вимоги, яким повинні відповідати комп'ютерні системи. Підкреслюється неможливість забезпечення абсолютної надійності алгоритмів та програмного забезпечення комп'ютерні системи, отже, повної адекватності отриманих рішень. Проаналізовані сфери використання штучного інтелекту та зроблені висновки про доцільність та безпечність його впровадження в окремих галузях з точки зору безпеки життєдіяльності людей та охорони праці.

обробка інформації, комп'ютерні системи, обчислювальні системи, алгоритм, програмне забезпечення, надійність, штучний інтелект, ризики, безпека життєдіяльності, охорона праці

Постановка проблеми. В інформаційному суспільстві об'єм інформації, що виробляється людством, стрімко зростає, що зумовлює також значну інтенсифікацію інформаційних процесів, зокрема процесів інформаційного обміну та обробки даних. Інформаційні процеси такої інтенсивності на сьогодні покладаються на швидкісні комп'ютерні мережі та потужні комп'ютерні системи.

Комп'ютерна система (обчислювальна система) – будь-який пристрій чи група взаємопов'язаних чи суміжних пристроїв, один або більше з яких, діючи відповідно до програми, здійснює автоматизовану обробку даних [1]. Зокрема, потужні комп'ютерні системи використовуються в науці, в системах комерційного співробітництва, в підтримці прийняття рішень, прогнозуванні, інформаційно-управлінських системах, військовій справі, медицині, державному управлінні тощо.

До таких комп'ютерних систем пред'являють підвищені вимоги, зокрема, такі як надвисока продуктивність, великий обсяг пам'яті, здатність обробляти велику кількість транзакцій одночасно, підвищена відмовостійкість, стійкість до кібератак та надійність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Надійність, яка є однією з головних вимог до комп'ютерних систем, складається з надійності пристроїв та засобів зв'язку, алгоритмів, програмного забезпечення та надійності (достовірності) результатів обробки даних [2]. У комп'ютерних науках (інформатиці) надійність – це здатність комп'ютерної системи справлятися з помилковими даними та помилками під час виконання завдань [3]. Від рівня надійності системи залежить, наскільки відповідальні інформаційні процеси їй можна довірити. Надійність комп'ютерної системи закладається на етапах проектування, виготовлення, програмування та експлуатації і забезпечується дотриманням значної множини умов. Тестування відповідальних систем викликає потребу в великому обсязі експериментів та досить тривалому спостереженні.

Підвищення надійності інформаційних систем досліджено у роботі [4] та інших. У роботі [5] та деяких інших підкреслюється неможливість досягнення абсолютної надійності комп'ютерних систем, зокрема, рекомендується досягати надійності, відповідної допустимому ризику.

Постановка завдання. Оскільки абсолютна надійність комп'ютерних систем та результатів інформаційних процесів, які у них виконуються, не може бути забезпечена, задачею досліджень є визначення критичних областей, де такі помилки та збої в роботі не допустимі.

Виклад основного матеріалу. Розробникам складних комп'ютерних систем та програмного забезпечення важко уникнути помилок, бо ймовірність помилки залежить від складності системи. В ідеальній ситуації програмні баги виправляють всі й одразу. У реальному житті насамперед знаходяться і виправляються очевидні та явні проблеми. Інші тихо чекають свого часу, перетворюючись на бомби уповільненої дії. Іноді помилки у програмному забезпеченні викликають справжні катастрофи [6]. Так кілька років у середині 80-х років апарати Therac-25 променевої терапії працювали бездоганно, проте згодом почали накопичуватися інциденти, що спричинили тяжкі наслідки: від ампутації кінцівок до загибелі пацієнтів. 14 серпня 2003 року невелика помилка у програмному забезпеченні системи моніторингу роботи обладнання General Electric Energy призвела до того, що 55 мільйонів людей залишилися без електрики. На Східному узбережжі США опинилися знеструмленими житлові будинки, школи, лікарні, аеропорти. У 1962 році космічний корабель "Mariner 1" був знищений із землі після старту через відхилення від курсу. Аварія виникла на ракеті через програмне забезпечення, в якому розробник пропустив лише один символ. Таких прикладів безліч.

Еволюція інформаційних та комп'ютерних систем пройшла декілька етапів у напрямку все більшої автоматизації обробки інформації. З кінця XX сторіччя інформаційні та комп'ютерні системи розвивалися в напрямку застосування підтримки прийняття рішень, експертних систем і систем штучного інтелекту.

На сьогодні не існує єдиного та однозначного визначення штучного інтелекту. Будемо вважати, що штучний інтелект – це інформаційна система або машина, яка здатна імітувати людину в процесах обробки інформації та прийнятті рішень, яка може навчатися та удосконалювати себе на основі отриманої інформації.

Сферами використання штучного інтелекту у нинішній час є пошукові системи, рекомендаційні системи, словники та перекладачі, розпізнавання та синтез мови, розпізнавання об'єктів, військова справа, медицина, системи масового обслуговування, керування виробничими процесами, керування різноманітними пристроями та обладнанням, транспорт, бізнес-аналітика, інтелектуальні системи інформаційної безпеки тощо.

Головними проблемами впровадження штучного інтелекту в комп'ютерні системи є неможливість передбачити всі реальні ситуації та запрограмувати поведінку машини адекватно до них, недостатня надійність та помилки у програмному забезпеченні. Вхідні дані, на основі яких навчається штучний інтелект можуть бути хибними. Крім того на системи штучного інтелекту впливають спосіб мислення та цінності його розробників, які не завжди обізнані з психологією, соціологією та іншими гуманітарними науками.

Ці недоліки за час використання систем штучного інтелекту привели до безлічі інцидентів, в тому числі летального характеру.

Так, весною 2018 року Uber тестувала безпілотний автомобіль на базі однієї з моделей Volvo на вулицях міста Темп у штаті Арізона, США. Машина збила жінку на смерть [7].

Медичний чат-бот на базі GPT-3, який було створено, щоб зменшити навантаження на лікарів, порадив підставному пацієнтові вбити себе. Творець чат-бота, французька компанія Nabla, зробила висновок, що «нестійкий і непередбачуваний характер відповідей програмного забезпечення робить його непридатним для взаємодії з пацієнтами в реальному світі».

У Великобританії робот-хірург фактично вбив пацієнта під час операції на серці. Кардіохірург Сукумаран Наір, який приймав участь в операції, зазначає, що насамперед люди повинні повністю розібратися у роботизованих помічниках у тих ситуаціях, коли це стосується людських життів.

На заводі Volkswagen у Німеччині людина була вбита роботом, що вийшов з-під контролю. Інцидент на заводі Volkswagen – не поодинокий випадок убивства людини роботом. Подібна пригода була вперше зафіксована у 1979 році на заводі ще одного великого автомобільного концерну – Ford.

Ще одною загрозою є здатність систем штучного інтелекту створювати та публікувати в соціальних мережах тексти, наслідуючи стиль людини. Так бот, створений програмою GPT, видавав себе за людину протягом кількох тижнів. Тексти, створені таким чином, важко розпізнати як штучні. Через такі тексти та повідомлення машина може впливати на емоції людини та створювати певний інформаційний фон, формувати думку, підштовхувати людину до певних дій та вчинків.

Значною загрозою також є застосування недостатньо навченого штучного інтелекту у життєво важливих сферах, спроби його використання для того, щоб поставити під контроль життя людини.

Ці приклади показують, що проблеми впровадження систем штучного інтелекту лежать в полі уваги багатьох наук – не лише комп'ютерних, а також безпеки життєдіяльності, охорони праці, юриспруденції, психології, соціології, етики та інших.

Чи можна довірити штучному інтелекту прийняття рішень у відповідальних ситуаціях?

За висловом Г. Грефа, голови Збербанку Росії, «Штучний інтелект, як правило, ухвалює рішення у великих системах. Маленька помилка, що закралася в алгоритм, може спричинити дуже великі наслідки. Через те, що машина робила маленьку помилку, на великих обсягах ми втрачали мільярди рублів».

26 вересня 1983 року супутник ешелону «Око» системи попередження про ракетний напад СРСР помилково повідомив про запуск п'яти балістичних ракет з території США. Тільки втручання у прийняття рішення людини - чергового офіцера запобігло початку Третьої світової війни [6].

Аналіз вибірки повідомлень про помилки штучного інтелекту дозволив визначити, до яких сфер відносяться критичні помилки, тобто де застосування систем штучного інтелекту пов'язане із значним ризиком. Зокрема, це такі галузі як медицина, військова справа, транспорт, виробництво, де співпрацюють люди та роботизовані системи, небезпечні виробництва, енергетика, соціальне управління, правові установи тощо.

Дослідник штучного інтелекту О. Хомяков стверджує, що штучний інтелект є не що інше, як програма, заснована на статистиці. Точність роботи таких програм не перевищує 95%. Отже, при такому рівні похибок не варто довіряти таким системам людські життя [8].

Ризики використання штучного інтелекту створюються самими людьми: його ідеологами – початково хибні ідеї; розробниками – помилки в алгоритмах та програмному забезпеченні; особами, на яких покладається контроль за функціонуванням, навчанням, достовірністю підключених джерел інформації; користувачами – не вірна експлуатація.

Обов'язком розробників комп'ютерних систем із штучним інтелектом є попередити закладення в алгоритми процесів, які можуть зашкодити людині [10]. В алгоритми закладаються певні показники точності, що передбачає можливість помилок. Помилки також можуть накопичуватися в процесі навчання системи. На теперішній час основний засіб контролю за адекватністю алгоритму — відсутність у нього можливості приймати критично важливі рішення самостійно. Людина обов'язково бере участь у прийнятті рішень, а алгоритм постає як помічник та радник.

Алгоритми вчаться більш адекватно моделювати реальні ситуації але вони ніколи не стануть досконалими та безпомилковими. На думку експерта Л.Жукова, питання про допустимий поріг помилок, ціни за помилку та економію від заміни людини штучним інтелектом стоятиме завжди. У найближчому майбутньому людина, як і раніше, прийматиме критичні рішення, хоч би якою розумною не була система штучного інтелекту [9].

Не вирішеним юридично залишається питання відповідальності за помилки штучного інтелекту: хто і в яких випадках має за них відповідати – розробник чи особа, яка ним користується, чи сам штучний інтелект. На сьогодні не існує жодних законодавчих норм, які б регулювали саме штучний інтелект [10]. Нормативне урегулювання в використанні систем штучного інтелекту знаходиться на стадії початкових спроб. Так Комісія Європейського Союзу класифікувала штучний інтелект за рівнями ризику та виявила намір чітко визначити, що може бути дозволено, а що заборонено у впровадженні штучного інтелекту в комп'ютерні системи та суспільне життя.

Висновки.

1. В теперішній час відсутні нормативна та законодавча бази з використання штучного інтелекту, тому його впровадження відбувається стихійно, що приводить до непередбачуваних результатів та аварій.

2. Штучний інтелект, що використовується в критично важливих інфраструктурах, у галузях, пов'язаних із здоров'ям та життям людей, відноситься до категорії високого ризику.

3. Засновуючись на проведеному аналізі та у зв'язку з неможливістю забезпечення абсолютної надійності комп'ютерних систем і їх програного забезпечення, автори не рекомендують використовувати штучний інтелект у сферах, пов'язаних з безпекою, здоров'ям та життям людини, особливо великих людських колективів. Пристрої, в яких використовуються системи штучного інтелекту, слід маркувати повідомленнями про його використання із зрозумілим попередженням про часткову надійність пристрою в сенсі безпеки та відповідальність споживача за використання такого пристрою.

4. Автори категорично не рекомендують використання штучного інтелекту у прийнятті відповідальних рішень у сферах, пов'язаних із безпекою великих груп людей.

Список літератури

1. Комп'ютерна система. Матеріал Вікіпедії. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Категорія:Комп'ютерні_системи (дата звернення: 06.03.2022)
2. Мальков, М.В. О надежности информационных систем. *Труды Кольского научного центра РАН*. 2012. Т. 3, №4. С. 49-58.
3. Надёжность (компьютерные науки). Материал Википедии. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Надёжность_\(компьютерные_науки\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Надёжность_(компьютерные_науки)) (дата звернення: 06.03.2022)
4. Бычков С. С. Повышение уровня надежности информационных систем. *Вестн. СибГАУ им. М. Ф. Решетнева*. 2014. № 3. С. 42-47.
5. Казарин О. В., Шубинский И. Б. Надежность и безопасность программного обеспечения : учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры. М. : Издательство Юрайт, 2018. 342 с.

6. Катастрофические последствия программных ошибок. Стаття на сайті <https://www.pvsm.ru/programmirovanie/241956> (дата звернення: 06.03.2022)
7. ИИ посоветовал пациенту умереть: самые крупные ошибки машинного обучения. URL: <https://hightech.fm/2021/09/02/ai-failures> (дата звернення: 06.03.2022)
8. Плохо обученный искусственный интеллект опаснее восстания машин. URL: <https://www.hse.ru/news/expertise/506082229.html> (дата звернення: 07.03.2022)
9. Жуков Л. Почему люди в ближайшем будущем не смогут полностью довериться ИИ. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/5fb52daf9a7947234c4d28d3> (дата звернення: 07.03.2022)
10. Андраш Ю. Кто несет ответственность за преступления искусственного интеллекта? URL: <https://www.lansky.at/ru/newsroom/news-media/zhurnal-lgp-news-022021/kto-neset-otvetstvennost-za-prestupleniya/#> (дата звернення: 07.03.2022)

References

1. Kompiuterna systema. Material Vikipedii. [uk.wikipedia.org](https://uk.wikipedia.org/wiki/Katehoriia:Komp%27uterni_systemy). Retrieved from https://uk.wikipedia.org/wiki/Katehoriia:Komp%27uterni_systemy [in Ukrainian]
2. Mal'kov, M.V. (2012). O nadezhnosti informacionnyh sistem [On the reliability of information systems]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN – Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Vol. 3, 4*, 49-58 [in Russian].
3. Nadjozhnost' (komp'yuternye nauki). Material Vikipedii [Reliability (computer science). Wikipedia material]. [ru.wikipedia.org](https://ru.wikipedia.org/wiki/Nad%27ežhnost_(komp'yuternye_nauky)). Retrieved from [https://ru.wikipedia.org/wiki/Nad%27ežhnost_\(komp'yuternye_nauky\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Nad%27ežhnost_(komp'yuternye_nauky)) [in Russian].
4. Bychkov, S.S. (2014). Povyshenie urovnja nadezhnosti informacionnyh sistem [Increasing the level of reliability of information systems]. *Vestn. SibGAU im. M. F. Reshetneva – Vestn. Siberian State Agrarian University M. F. Reshetnev*, 3, 42-47 [in Russian].
5. Kazarin, O.V. & Shubinskij, I.B. (2018). *Nadezhnost' i bezopasnost' programmnogo obespechenija [Software reliability and security]*. Moscow : Izdatel'stvo Jurajt, [in Russian].
6. Katastroficheskie posledstviya programnyh oshibok [Catastrophic consequences of software errors]. [www.pvsm.ru](https://www.pvsm.ru/programmirovanie/241956). Retrieved from <https://www.pvsm.ru/programmirovanie/241956> [in Russian].
7. И посоветовал пациенту умереть: самые крупные ошибки машинного обучения [AI advised the patient to die: the biggest machine learning mistakes]. *hightech.fm*. Retrieved from <https://hightech.fm/2021/09/02/ai-failures> [in Russian].
8. Плохо обученный искусственный интеллект опаснее восстания машин [Poorly trained artificial intelligence is more dangerous than the uprising of machines]. [www.hse.ru](https://www.hse.ru/news/expertise/506082229.html). Retrieved from <https://www.hse.ru/news/expertise/506082229.html> [in Russian].
9. Zhukov, L. Pochemu ljudi v blizhajshem budushhem ne smogut polnost'ju doverit'sja И [Why people in the near future will not be able to fully trust A]. *trends.rbc.ru*. Retrieved from <https://trends.rbc.ru/trends/industry/5fb52daf9a7947234c4d28d3> [in Russian].
10. Andrash Yu. Kto neset otvetstvennost za prestupleniya yskusstvennogo yntellekta? [Who is responsible for the crimes of artificial intelligence?] [www.lansky.at](https://www.lansky.at/ru/newsroom/news-media/zhurnal-lgp-news-022021/kto-neset-otvetstvennost-za-prestupleniya/#). Retrieved from <https://www.lansky.at/ru/newsroom/news-media/zhurnal-lgp-news-022021/kto-neset-otvetstvennost-za-prestupleniya/#> [in Russian].

Konstantyn Marchenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleh Oryshaka**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anzhelyka Marchenko**, Anna Melnick

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Risks of Implementing Artificial Intelligence in Computer Systems

Since the absolute reliability of computer systems and the results of information processes that run in them can not be guaranteed, the task of research is to identify critical areas where such errors and failures are unacceptable.

The main problems with the introduction of artificial intelligence in computer systems are the inability to predict all real situations and program the behavior of the machine adequately to them, lack of reliability and software errors. The input on which artificial intelligence is taught may be incorrect. In addition, artificial intelligence systems are influenced by the way of thinking and values of its developers, who are not always familiar with psychology, sociology and other humanities. These shortcomings during the use of artificial intelligence systems have led to many incidents, including fatal. The analysis of the sample of artificial intelligence error messages allowed us to determine which areas are critical errors, ie where the use of artificial intelligence systems is associated with significant risk. In particular, these are such areas as medicine, military

affairs, transport, manufacturing, where people and robotic systems cooperate, hazardous industries, energy, social management, legal institutions and more.

Currently, there is no regulatory and legal framework for the use of artificial intelligence, so its implementation is spontaneous, which leads to unpredictable results and accidents. Artificial intelligence used in critical infrastructures, in areas related to human health and life, belongs to the category of high risk. Based on the analysis and due to the impossibility of ensuring the absolute reliability of computer systems and their software, the authors do not recommend the use of artificial intelligence in areas related to safety, health and human life, especially large human teams. Devices using artificial intelligence systems should be marked with messages about its use with a clear warning about the partial reliability of the device in terms of safety and consumer responsibility for the use of such a device. The authors strongly discourage the use of artificial intelligence in responsible decision-making in areas related to the security of large groups of people.

information processing, computer systems, computer systems, algorithm, software, reliability, artificial intelligence, risks, safety of life, labor protection

Одержано (Received) 08.03.2022

Прорецензовано (Reviewed) 17.03.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

УДК 004.4

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.124-134](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.124-134)

В.В. Босько, доц., канд. техн. наук, **Л.В. Константинова**, викл., **О.К. Коноплицька-Слободенюк**, викл., **Д.В. Фесечко**, магістр

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: victorvv2@ukr.net, liliyashel1976@gmail.com, ksuha80@gmail.com*

Аналіз та дослідження фреймворку AngularJS як засобу розробки вебсайтів

Наведено аналіз фреймворку AngularJS на підтримку використання повноцінних класів, наявність модульної архітектури, зв'язування даних, компонентів, що пришвидшують роботу та спрощують налагодження програм, а також сильних сторін в порівнянні з іншими фреймворками.

Також в роботі проаналізовано можливості розробки вебсайтів засобами фреймворку AngularJS. Для цього було проведено дослідження та програмну реалізацію різних типів вебсайтів засобами фреймворку AngularJS. Розглянуто його недоліки й переваги. Результатом аналізу є обґрунтування вибору фреймворку при розробці вебсайтів в залежності від поставлених задач.

комп'ютерна інженерія, вебсайт, фреймворк, AngularJS

Постановка проблеми. Фронтенд розробка є дуже важливим напрямком в IT-індустрії, так як вона є «фасадом» вебдодатку. Головними критеріями оцінок при розробці вебдодатку є його економічна складова, трудомісткість інтеграції, UI, UX, а також при розробці важливим враховується наявність документації по API. Застосування фреймворку може прискорити та спростити процес розробки вебдодатків. Тому дослідження фреймворку AngularJS, як засобу розробки вебсайтів та аналіз результатів є актуальним сьогодні.

AngularJS була випущена компанією Google у 2010 році, як новаторська технологія у світі веброзробки. Вона впровадила нові стандарти у розробку вебсайтів, та випустила ряд потужних інноваційних технологій. Ця платформа стала кроком уперед у створенні прогресивних вебдодатків. Але з часом команда Google, побачила недоліки в AngularJS, які неможливо було вирішити шляхом еволюції технологій та оновлень, і використала отриманий досвід, щоб переробити фреймворк з нуля.

Це стало переломним моментом у розвитку фреймворку. Враховуючи всі недоліки, команда Google презентувала абсолютно новий фреймворк у 2016 році, назвала його Angular 2, який увібрав в себе всі найкращі досягнення AngularJS. Тому всі версії 1.xx називаються AngularJS, а 2 та пізніші версії - Angular.

Різниця Angular і AngularJS не стосується назви або просто нових версій фреймворку. Технології відрізняються за своєю суттю. Перш за все, AngularJS заснований на JavaScript, тоді як Angular написаний на TypeScript. По-друге, також змінилася базова архітектура та підходи до прив'язки даних. Нарешті, Angular покращив продуктивність, та сумісність браузерів і впровадив підтримку розробки мобільних додатків у кількох наступних випусках.

Ключовим моментом стало оголошення Google про остаточну версію AngularJS версії 1.7 без намірів подальших випусків. Так, в 2018 році AngularJS вступила у трирічний довгостроковий період підтримки, який пізніше був продовжений на шість місяців через пандемію.

Отже, головним питанням є те, чого очікувати від припинення підтримки AngularJS після 31 грудня 2021 року. За останні роки AngularJS не отримав багато нових впроваджень, але більшість помилок були виявлені та виправлені. Проекти написані на ньому досі працюють, тому не має необхідності переходити на нові технології, якщо цього не вимагають поточні чи майбутні вимоги.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При аналізі останніх досліджень і публікацій [1-11] було проаналізовано переваги та недоліки розробок вебсайтів за допомогою фреймворку AngularJS.

Постановка завдання. Таким чином метою дослідження є аналіз можливостей реалізацій вебсайтів засобами фреймворку AngularJS.

Для вирішення поставленого завдання була визначена програма дослідження, що складається з наступних завдань:

1. Огляд існуючих систем для розробки вебсайту засобами фреймворку AngularJS.
2. - Дослідження системи та бібліотек для розробки вебсайту засобами фреймворку AngularJS.
3. - Визначення можливостей та функціоналу AngularJS відповідно до сучасних вимог у веброботі.

Виклад основного матеріалу. AngularJS - це програма з відкритим кодом JavaScript від Google для розробки прикладних програм. Наступні його версії більш відомі як Angular 2 і т.д. Бувши частиною екосистеми JavaScript, AngularJS негайно налагодив зв'язок із веб-розробниками, це був перший фреймворк, який дозволяв розробляти інтерактивні вебсайти. Це призвело до розробки односторінкових додатків [4], які чудово реагували та мали чудовий користувацький інтерфейс.

Головна область застосування AngularJS створення односторінкових додатків. Його головними перевагами на старті було те що додатки на AngularJS були більш структурованими, що полегшувало процес тестування та розробки. Під час виходу його сильними сторонами була активна підтримка Google, двостороннє зв'язування даних, взаємодія з іншими бібліотеками, та декларативне програмування, яке полегшувало підтримку та читання коду.

Що стосується AngularJS у якості SPA фреймворку, він використовує патерн проектування MVC, який добре зарекомендував себе і тепер став доступний для JavaScript світу. Він лежить в більшості сучасних фреймворків. Звичайно, особливої новизни й революції в цій події немає. Розробник з досвідом, може без жодних фреймворків спроектувати додаток, дотримуючись цього патерну. Однак фреймворк

зобов'язує розробника дотримуватися правильної архітектури. AngularJS - це структурна основа для динамічних вебдодатків. Це дозволяє використовувати HTML як мову шаблонів та розширювати синтаксис HTML, щоб чітко та лаконічно виражати компоненти програми. Зв'язування даних AngularJS та ін'єкція залежностей зменшують кількість коду і роблять його більш читабельним.

З одного боку, AngularJS має досить низький поріг входження в порівнянні з багатьма подібними рішеннями. З іншого - документація носить злегка суперечливий характер. Вона добре структурована, є приклади коду, але деякі речі висвітлені вкрай слабо. З ними доведеться розбиратися самостійно, вивчаючи вихідний код або запитуючи коментарі від колег по цеху.

AngularJS в першу чергу створений для спрощення складних процесів при створенні та керуванні JS додатків. В його основі лежить структура MVC, що робить цей фреймворк особливо корисним для створення односторінкових сайтів. Бібліотека заснована на звичайному JS і HTML, тому AngularJS автоматично піклується про маніпуляції з DOM і AJAX запити, які в іншому випадку розробникам довелося б писати самим. AngularJS можна швидко додати на будь-яку HTML сторінку за допомогою простого тегу, оскільки цей інструмент надає модульні будівельні блоки коду JS, які можна поєднувати й тестувати.

Всі ці можливості фреймворку призвели до того, що його досі активно використовують. Він був одним з перших SPA фреймворків, тому нові фреймворки багато що з нього перейняли та хоча для нових проектів краще використовувати більш сучасні рішення. AngularJS зробив великий внесок у розвиток односторінкових додатків.

Фреймворки дуже допомагають при проектуванні архітектури ПЗ, оскільки в концепціях фреймворків закладані кращі практики розробки, тому просто дотримуючись цих правил можна уникнути багатьох проблем і помилок при проектуванні додатку. Як правило фреймворки являють собою набір класів та функцій, які активно взаємодіють між собою і підтримують головну методологію фреймворку, а також надають свій функціонал для розширення можливостей додатку використовуючи свої концепції.

Також фреймворки впливають на швидкість розробки, та слідкують, щоб розробник не зробив помилок при проектуванні додатку. Оскільки вибір фреймворку такий важливий, треба звертати увагу на його підтримку, а також на кількість розробників які його використовують. Щоб при виявленні якоїсь помилки, можна було її швидко усунути та повідомити ком'юніті.

AngularJS надає дуже хороший контроль над даними на стороні клієнта. Не потрібно думати про те, щоб вибрати елементи з DOM та заповнити їх значеннями. Завдяки доступній прив'язці даних є можливість оновити дані в частині JavaScript і побачити зміни в частині HTML. Це справедливо і для зворотних дій. Як тільки користувач щось змінить в частині HTML, він одразу отримає нові значення в частині JavaScript. Також фреймворк має потужну інжекторну залежність. Існують заздалегідь визначені класи для виконання запитів AJAX та керування маршрутами.

Є ряд причин через які AngularJS виділяється серед конкурентів:

- Спрощена двостороння прив'язка даних. AngularJS дозволяє прив'язувати дані до HTML за допомогою виразів, а директиви AngularJS дозволяють розробникам розширювати функціонал HTML і створювати нові конструкції. Маніпуляції з DOM і код прив'язки даних обгорнуті в прості елементи, які можна швидко і просто вставити в HTML шаблони.

- AngularJS спроектований універсальним фреймворком, тому з його допомогою можна створити веб-додаток майже будь-якого типу. Особливо він корисний при створенні односторінкових вебдодатків.

- AngularJS входить в пакет ПЗ MEAN, який також включає MongoDB, Express.js і Node.js. Тому клієнтська та серверна частини проекту виконується за допомогою JS. У якості альтернативи для сервера можна використовувати Ruby on Rails. З AngularJS також добре стикується ASP.NET і C #.

- AngularJS побудований по техніці functionality-first, тому фреймворк найбільше підходить для розробки зверху вниз. Модульна концепція AngularJS дозволяє спростити поділ роботи на різні команди в великих проектах. У таких командах в пріоритеті мінімальна кількість коду, тому додатки AngularJS, як правило, компактні й легкі в редагуванні.

Проте є моменти, які необхідно знати при виборі AngularJS для свого проекту, вони допоможуть правильно спроектувати логіку додатку і розв'язувати поставлені задачі:

- Перше і найголовніше, AngularJS нав'язує свою структуру розробникам. AngularJS спроектований максимально дружньо, тому його інструменти інтуїтивно зрозумілі. Однак розробникам, яким потрібні гнучкі рішення, доведеться шукати обхідні шляхи.

- Для деяких проектів AngularJS надто зайвий. У таких випадках більше підійдуть легкі фреймворки для створення статичних сайтів. AngularJS також не пристосований обробляти маніпуляції з DOM з великою кількістю даних, тому, що покладається на перевірки для управління змінними DOM (будь-яка зміна змінних тягне оновлення DOM). Для більшості сайтів це не буде проблемою, але для GUI редакторів або відеоігор це може викликати проблеми.

- AngularJS також не підтримує високонавантажені галереї фото. Подібні проблеми з продуктивністю можна вирішити через форми з високим рівнем користувацької взаємодії.

Існує ряд порад, які варто дотримуватися, щоб поліпшити швидкість додатків на AngularJS:

- AngularJS використовує так званий "дайджест цикл", який займається оновленням DOM. Дайджест цикл додатків AngularJS - хороший індикатор його продуктивності. Його можна представити, як цикл, який перевіряє наявність змін в змінних, та займається їх оновленням. Чим коротше дайджест цикл, тим швидше додаток працює.

- Швидкість додатку залежить від кількості відстежень. Кожен раз при введенні прив'язки даних створюється все більше змінних `$$watchers` і `$scopes`, що подовжують дайджест цикл. Занадто багато `$$watchers` можуть викликати затримки. Тому треба використовувати їх по мінімуму.

- По можливості треба використовувати одноразові прив'язки в старих версіях.

- Доступ до DOM виконується з затратами, тому треба зберігати маленький розмір дерев DOM. Не змінювати DOM без реальної на те необхідності та не встановлювати вбудовані стилі.

- Треба стежити за областями видимості. Не треба давати змінним занадто велику область видимості, щоб збирач сміття JS міг вивільнити пам'ять.

Також варто зауважити, що AngularJS відмінно працює з Node.js. Як асинхронне подієве JavaScript-оточення, Node.js спроектований для побудови масштабованих

мережевих додатків. Де для кожного з'єднання викликається функція зворотного виклику, проте коли з'єднань немає Node.js засинає.

Це контрастує з більш загальною моделлю в якій використовуються паралельні OS потоки. Такий підхід є відносно неефективним та дуже важким у використанні. Також користувачі Node.js можуть не турбуватись про блокування процесів, оскільки немає жодних блокувань. Майже жодна з функцій у Node.js не працює напямучу з I/O, тому процес не блокується ніколи. Оскільки нічого не блокується на Node.js легко розробляти масштабовані системи.

Якщо говорити про нові версії Angular, вони є більш сучасними та використовуються частіше. Це спричинено тим, що вони більш стабільні, мають більшу кількість модулів, має систему CLI, зручні в тестуванні й мають кращу структуру коду завдяки використанню TypeScript. Також варто звернути увагу на бібліотеки які використовує Angular, вони значно полегшують розробку. Серед основних переваг Angular у порівнянні з іншими фреймворками:

- Angular використовує бібліотеку RxJS, яка використовує концепції реактивного програмування та observables, для заміни функцій зворотного виклику в написанні асинхронного коду.

- Angular використовує Dependency Injection — патерн проектування, який оголошує сервіси в конструкторі компонента, що допомагає розділити структуру коду.

- Angular CLI — дуже зручний інструмент, для створення та підтримки додатку, який на початку проекту генерує все необхідне.

Серед недоліків Angular можна віднести велику кількість кода, а також складний поріг входу в фреймворк.

З випуском AngularJS або Angular 1 отримав негайну популярність та підтримку, оскільки тепер була можливість перетворювати статичні HTML-сторінки на інтерактивні, використовуючи AngularJS. Однак незабаром були випущені інші фреймворки, які почали висвітлювати недоліки AngularJS. Через жорстку конкуренцію з боку ReactJS та VueJS, Google пішов на повне перезавантаження з Angular 1 на Angular 2, використовуючи TypeScript як нову мову. Рішення перейти з JavaScript на TypeScript було прийнято для того, щоб уникнути помилок JavaScript та запровадити невелику кількість статичних типів, особливості, яку вимагали багато наявних веб-розробників.

Було багато чого змінено, починаючи з Angular 2. Компанія змінила парадигму, яку використовував AngularJS, була змінена не тільки мова, а й архітектура, та підхід до прив'язки даних. Однак і AngularJS, і Angular продовжують використовувати програмісти та веб-розробники відповідно до їхніх вимог. Основні фактори, які відрізняються в Angular та AngularJS:

- AngularJS використовує архітектуру MVC або Model View Controller. Розробник розміщує бізнес-логіку в моделі, представленні й у контролері, а AngularJS виконує всю необхідну обробку для отримання результату. Основні блоки побудовані за допомогою компонентів та директив в AngularJS. Компоненти - це не що інше, як директиви із заздалегідь заданим шаблоном. Вони надають сучасну структуру додаткам, що полегшує створення та підтримку великих програм.

- AngularJS з самого початку використовував JavaScript, але для Angular 2 та пізніших версій почали використовувати TypeScript. TypeScript - це розширення JavaScript, яке забезпечує статичні типи в процесі розробки. Статичні типи дозволяють уникнути багатьох помилок, при розробці програмного забезпечення, а також покращують продуктивність, на відміну від динамічних типів, які ускладнюють використання AngularJS для великих та складних додатків.

- Ін'єкції залежностей (DI). Як AngularJS, так і Angular використовують залежність від ін'єкцій, але спосіб їх здійснення дуже відрізняється. У AngularJS DI вводиться в різні функції зв'язку, функції контролера та визначення директив. З іншого боку, Angular реалізує ієрархічну систему введення залежностей, використовуючи декларації, функції конструктора та постачальників.

- В Angular 2 існує власний інтерфейс командного рядка або CLI. Його використовують для генерації компонентів, служб тощо і навіть для швидкого та ефективного завершення проєктів. Він дозволяє легко генерувати різні версії одного і того ж проєкту для різних платформ з динамічною перевіркою типів. Angular CLI спрощує розробку додатків, та їх компіляцію. У AngularJS немає власного CLI.

- Використовуючи технологію прив'язки даних, Angular є більш інтуїтивно зрозумілим, ніж AngularJS. Розробник AngularJS повинен пам'ятати правильну директиву ng для прив'язки властивості чи події.

- Angular набагато швидший, ніж AngularJS. Двостороння прив'язка, яка зробила оригінальний Angular JS популярним серед веброзробників, виявила його складності, оскільки з його допомогою важко розробляти складні програми. Щоб забезпечити та здійснити двостороннє прив'язування, AngularJS продовжує перевіряти кожен масштабований змінний за її попереднім значенням, використовуючи цикл. Angular має потокову архітектуру, де виявлення змін здійснюється за допомогою однонапрямого потоку даних, що робить програми набагато швидшими.

Angular та AngularJS це вебфреймворки, які вимагають від розробника реалізовувати MVC патерн у своїй програмі [5]. Патерн MVC (Model-View-Controller) це один з найрозповсюдженіших шаблонів проєктування, який ділить логіку програми на окремі компоненти, що якісно впливає на розробку продукту, та її подальшу підтримку. Особливо зручно коли одночасно з клієнтською частиною, цей шаблон використовується на серверній частині, наприклад він є основним в багатьох серверних фреймворках: Spring MVC, NestJS, SailsJS, ASP.NET MVC Framework та інших.

При використанні шаблону MVC, програма ділиться на окремі компоненти: модель, представлення і контролер. Отже, у разі внесення змін або додавання нової модифікації у компонент, він повинен мінімально впливати на інші компоненти.

Головні завдання компонентів:

- Model (модель) - відповідає за зберігання даних користувача, і надання необхідного інтерфейсу до цих даних.

- View (представлення) - відповідає за дані, які будуть надаватися користувачу, а також за форму у якій вони будуть представлені.

- Controller (контролер) - містить бізнес-логіку додатка, реагуючи на події в браузері, та повідомляючи модель про оновлені дані.

За допомогою такої внутрішньої структури, система ділиться на самостійні частини й розподіляє логіку роботи програми між компонентами для того, щоб введення даних, обробка даних, та виведення цих даних користувачу не залежали один від одного.

Якщо простежити як працює шаблон MVC більш детально, то Controller відстежує дії користувача, наприклад, введення даних, або натискання клавіші. Після чого викликається запит або функція, яка звертається до компонента Model, щоб отримати необхідні дані, наприклад, з бази даних і за допомогою компонента View, ці дані надаються користувачу у потрібній йому формі. Архітектура такого роду робить компоненти незалежними та коли користувач використає контролер, це призведе до змін в базі даних, та оновлення цих даних для користувача.

Існують також шаблони, схожі на архітектуру MVC, наприклад MVP (Model-

View-Presenter) [10] та архітектура N-Tier. Різниця між MVC та MVP, в тому, що дані у MVC, передаються з Model у View, а у MVP проходять через View. Перевагою MVC є чітке розділення логіки представлення даних і логіки програми.

Найчастіше у реалізації MVC для взаємодії між представленням та моделлю, використовують спеціальні протоколи взаємодії, використовуючи апарат події (підписка/оповіщення). Коли внутрішні дані в моделі змінюються, відсилається сигнал всім залежним шаблонам, що дані оновились. Для цього зазвичай використовуються Observer, Strategy або Factory Method, щоб обрати правильний контролер, та взаємодіяти з моделлю.

Існують різні модифікації моделі MVC, найрозповсюдженіші серед них: пасивна та активна модель. Пасивна модель — це коли контролер стежить за змінами в моделі та у разі оновлення даних, відповідає за їх зображення користувачу. Активна модель — це коли сама модель повідомляє шаблон, що її дані оновилися за допомогою системи повідомлень. Такого виду система є більш незалежна між моделлю, контролером і шаблонами.

За допомогою сучасних технологій, таких як SPA та PWA, розробник може зробити взаємодію з користувачем більш інформативною та зручною. Від цього залежить кількість відвідувачів а також популярність сайту. У цьому можуть допомогти такі фреймворки як Angular, AngularJS, React та інші.

AngularJS вимагає від розробника реалізації оригінального MVC у своїх вебдодатках. Для цього він надає всі необхідні сервіси та технологію впровадження залежностей. Це допомагає Angular-додаткам мати чітку структуру, якісну підтримку, а також легко тестувати додаток на помилки.

AngularJS має великий технологічний функціонал для створення динамічних сторінок, у цьому йому допомагають: сервіси, модулі, фільтри, директиви, область застосування.

Особливу увагу слід приділити директивам в AngularJS. Оскільки вони використовуються для надання HTML нових можливостей. У процесі компіляції, директиви які знаходяться в HTML модифікують DOM, або додають йому нову поведінку. Також є можливість розробки своїх директив, як узвичаєно, їх називають за допомогою lowerCamelCase стилу.

В AngularJS також існує ієрархічна структура - scope, представлена у вигляді об'єктів. Вони використовуються для передачі даних між контролером і представленням. Вони схожі на DOM, але вони наслідують властивості батьківських scopes. Головним є \$rootScope, він є батьківським стосовно всіх інших об'єктів \$scope. За допомогою директиви \$watch можна встановити спостереження за виразами в рамках scope, в процесі виконання фази зв'язування шаблону. Директива \$Watch слідує за даними, та оновлює їх за необхідністю.

Сервіси - призначені для виконання окремої задачі. Наприклад \$http сервіс призначений для надсилання HTTP запитів і є обгорткою над стандартним XMLHttpRequest. Щоб використовувати сервіс необхідно під'єднати його до контролера, директиви, сервісу і т.д. Для створення сервісу необхідно використовувати фабричний метод factory. В AngularJS сервіси реалізуються за допомогою патерну singleton, щоб для проекту існував тільки один екземпляр, який можна викликати з кожного місця програми.

Фільтри використовуються для перебору даних перед зображенням їх користувачу, а також для фільтрації колекцій, масивів та інших типів даних.

Звдяки тому, що додатки на AngularJS завантажуються у вигляді декларативного опису, це дає змогу зручно підключати сторонні модулі, вказувати нові налаштування,

а також зручно тестувати додаток. За обробку подій, які виконують користувачі відповідає директива `ng-click`, яка схожа на виклик `onclick`. AngularJS замінює стандартний потік JavaScript на власний цикл обробки подій, за допомогою чого виконується зв'язування даних, обробки виключень, відстеження властивостей та інші операції.

Angular також використовує шаблон MVC, але його структура відрізняється. Сам фреймворк розділений на окремі модулі, кожен з яких реалізує певний функціонал. `AppModule` є кореневим модулем, який має набір елементів:

- `Component` — містить `web`-сторінки з HTML, CSS та основною логікою.
- `Service` — надає необхідні дані для компонентів.
- `Directive` — перетворює DOM елементи.

Компонент — надає інтерфейс та відповідає за логіку певної частини вебсторінки. Створюється за допомогою декоратора `@Component()`. Сервіси - надають всі необхідні дані компоненту, це можуть бути запити до сервера, або виконання певних алгоритмів. Директиви схожі на компоненти, але мають HTML-шаблони, створюються за допомогою декоратора `@Directive()`. Потім Angular компілює код для браузера за допомогою компілятора Angular Ivy.

Представлений Angular 2.0 у 2016 виправив більшість недоліків архітектури AngularJS, та впровадив багато нових технологій, які ускладнили розробку, але зробили її надійнішою. Одним з нововведень стала підтримка розробки під мобільні додатки, нативні та вебдодатки.

Розробка структурної схеми.

Структурна схема надає інформацію про взаємодію майбутніх частин програми, за який функціонал вони будуть відповідати, та як будуть взаємодіяти між собою. Не можна сказати що вони є інформативними, оскільки на них не можна відстежити, як дані передаються та змінюються. Тому в залежності від технічного завдання, структурні схеми розробляють для окремих частин програми.

Для розробки структурної схеми зазвичай використовують метод покрокової деталізації, щоб вказати всі компоненти з яких складається схема, а також набори підпрограм та підключені бібліотеки.

Структурними компонентами програми можуть називатися підсистеми, бібліотеки, бази даних і т.д. А за допомогою зв'язків можна продемонструвати, як вони взаємодіють між собою, обмінюються інформацією, підключати нові бібліотеки. При розробці структурної схеми програмного забезпечення були розглянуті основні модулі програми, та їх взаємодія.

Дуже важливо під час розробки, особливо якщо проект великий і має складну архітектуру, поділити програму на структури, щоб показувати логіку програми, показати місця, де підключаються бібліотеки, та за що вони відповідають.

В наведеній схемі взаємодія модулів, показана в схемі ієрархії. Де до головного модуля підключаються розроблені модулі, однак схема не відбиває порядок функціонування системи. Схема доповнюється розшифровкою функцій, які виконують підключення модулів.

У структурній схемі визначені зовнішні специфікації програми, які дають розуміння функціональній частині програми, за що вони відповідають, та як вони взаємодіють з вхідними та вихідними даними. Особливо важливо розуміти тип структури даних.

Розподіл програми на окремі модулі відбувався за принципом від загального до конкретного, де окремі модулі виступали у ролі сервісів, які виконували окремі задачі. Хоча є інші варіанти створення ієрархії, перебираючи декілька варіантів та

підтримуючи реалізацію шаблону MVC, такий розподіл надає найзручніший порядок введення частин в експлуатацію, які будуть легко підтримуватися та тестуватися.

Структурна схема показує головний принцип роботи програми, її основні та другорядні блоки, їх призначення, та їх взаємодію між собою. Це допомагає у розумінні роботи додатку, що полегшує подальшу його підтримку.

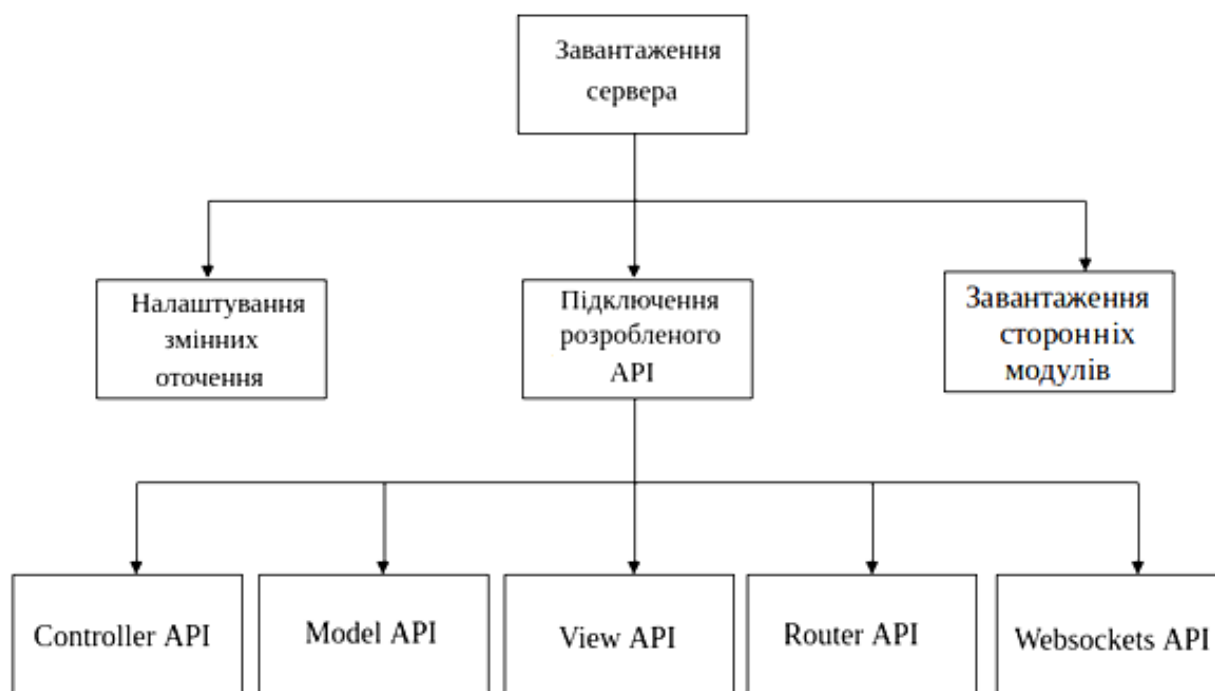


Рисунок 1 – Структурна схема

Джерело: [11]

Використовуючи всі вищезгадані технології, за допомогою AngularJS можна реалізувати вебсайт, використовуючи REST API та сокети, який буде задовільняти всім сучасним вимогам. Така архітектура та структура краще підходить для розробки малих та середніх додатків, які потрібно розробити за короткий проміжок часу, та які буде легко підтримувати.

Висновки. У дослідженні наведено теоретичне узагальнення для порівняння та виявлення кращих технологій відповідно до поставлених сучасних вимог у галузі веброзробки, та використання фреймворку AngularJS. Представлено дані, з яких можна зробити висновки, які технології сьогодні використовуються, у яких сферах, та для якого функціоналу призначені сучасні фреймворки. Які можливості та для яких проектів краще використовувати Angular та AngularJS. Рішення даного завдання полягало у вирішенні наступних задач: огляд фреймворків Angular та AngularJS, та порівняння їх функціональних можливостей для створення вебсайтів, огляд серверних технологій для розробки вебсайтів, сучасні архітектурні рішення для побудови вебсайтів. Розроблені додатки підтримують функціонал, який використовується на більшості сайтів в Інтернеті, серед основних можливостей це додавання медіафайлів, можливість надсилання e-mail повідомлень, використання сокетів для спілкування в чаті, авторизація та динамічний інтерфейс. За допомогою фреймворку AngularJS була продемонстрована технологія односторінкових додатків, яка надає можливість розробити швидкий та зручний для сприйняття інтерфейс.

Список літератури

1. Node.js v14.0.0 Documentation. URL: <https://nodejs.org/api/> (accessed 5 February 2022)
2. AngularJS. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/AngularJS> (accessed 6 February 2022)
3. AngularJS. URL: <https://angularjs.org/> (accessed 4 February 2022)
4. Односторінковий застосунок. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Односторінковий_застосунок (дата звернення 6.02.2022).
5. AngularJS MVC. URL: https://www.tutorialspoint.com/angularjs/angularjs_mvc_architecture.htm (accessed 5 February 2022)
6. Introduction to Node.js. URL: <https://nodejs.dev/> (accessed 6 February 2022)
7. Серверное программирование веб-сайтов. URL : <https://developer.mozilla.org/ru/docs/Learn/Server-side> (дата обращения: 5.02.2022)
8. Янг А., Мек Б., Кантелон М. Node.js в действии. 2-е издание. СПб.: Питер, 2018. 432 с.
9. John Resig, Bear Bibeault, Josip Maras Secrets of theJavaScript Ninja : Manning, 2016. 464с.
10. Что такое MVC. URL : <https://ru.hexlet.io/blog/posts/что-такое-mvc-rasskazyvaem-prostymi-slovami> (дата обращения: 5.02.2022)
11. Создаем приложение Art-pixel на Angular и Nest.js. Часть 1. URL: <https://habr.com/ru/post/647411/> (дата обращения: 4.02.2022)

References

1. Node.js v14.0.0 Documentation. *nodejs.org*. Retrieved from <https://nodejs.org/api/> [in English].
2. AngularJS. *uk.wikipedia.org*. Retrieved from <https://uk.wikipedia.org/wiki/AngularJS> [in English].
3. AngularJS. *angularjs.org*. Retrieved from: <https://angularjs.org/> [in English].
4. Odnostorinkovyi zastosunok [One-page application]. *uk.wikipedia.org*. Retrieved from https://uk.wikipedia.org/wiki/Односторінковий_застосунок [in Ukrainian]
5. AngularJS MVC. *tutorialspoint.com*. Retrieved from https://www.tutorialspoint.com/angularjs/angularjs_mvc_architecture.htm [in English].
6. Introduction to Node.js. *nodejs.dev*. Retrieved from <https://nodejs.dev> [in English].
7. Servernoe programirovanie veb-sajtov [Website Server Programming]. *developer.mozilla.org*. Retrieved from <https://developer.mozilla.org/ru/docs/Learn/Server-side> [in Russian]
8. Yang, A., Mek, B., & Kantelon, M. (2018). *Node.js in action*. (2d ed.). SPb.: Piter. [in Russian]
9. Resig, J, Bibeault, B, & Maras, J. (2016). *Secrets of theJavaScript Ninja* : Manning [in English].
10. CHto takoe MVC [What is MVC]. *ru.hexlet.io*. Retrieved from <https://ru.hexlet.io/blog/posts/что-такое-mvc-rasskazyvaem-prostymi-slovami> [in Russian]
11. Sozdaem prilozhenie Art-pixel na Angular i Nest.js. Chast 1 [Create an Art-pixel app with Angular and Nest.js. Part 1]. *habr.com*. Retrieved from <https://habr.com/ru/post/647411/> [in Russian]

Virtor Bosko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Liliia Konstantynova**, lecturer, **Oksana Konoplińska-Slobodeniuk**, lecturer, **Denis Fesechko**, master

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Analysis and Research of the angularJS Framework as a Website Development Tool

The growing popularity of web application development is reaching not only developers but also entrepreneurs looking for effective business solutions. The main evaluation criteria when developing a web application are its economic component, complexity of integration, UI, UX, the ability to solve a wide range of tasks, as well as the availability of documentation from the API. Using the framework can speed up and simplify the process of developing web applications. Therefore, the study of the AngularJS framework as a tool for website development and analysis of results is relevant today.

To solve this problem, a research program was identified, consisting of the following tasks: review of existing systems for website development using the AngularJS framework; research of the system and libraries for website development by means of the AngularJS framework; defining the capabilities and functionality of AngularJS in accordance with modern requirements in web development.

It has been found that some developers think that it is better not to use third-party developments and develop web applications from scratch, while others use frameworks because it greatly simplifies and speeds up development, this technology also reduces duplication of code, simplifies tuning and speed of website development. Using HTML as a template language in Angular.js and directives allow focusing on logic processing and being more productive. They can be reused, which also increases the readability of the code. Parts of the program are located inside Angular.js modules, which are easy to handle. This breakdown allows downloading only the necessary services and performing automatic testing effectively.

The work presents an analysis of the AngularJS framework to support the use of full-fledged classes, modular architecture, data binding, components that speed up and simplify program debugging, as well as strong points compared to other frameworks.

The work also analyzes the possibilities of developing websites using the AngularJS framework. For this, research and software implementation of various types of websites using the AngularJS framework was carried out. The framework disadvantages and advantages are considered. The analysis results in the justification for the choice of the framework for the development of websites depending on the objectives.

computer engineering, website, framework, AngularJ

Одержано (Received) 07.02.2022

Прорецензовано (Reviewed) 18.02.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.81

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.135-143](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.135-143)**Ю.А. Невдаха**, доц., канд. техн. наук, **В.О. Дубовик**, доц., канд. техн. наук,**В.В. Пукалов**, доц., канд. техн. наук, **Н.А. Невдаха**, **Д.В. Можейко***Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,
Україна**e-mail: uanevdakha@ukr.net*

Уточнений розрахунок котків фрикційних механізмів

Робота фрикційних механізмів заснована на використанні сил тертя, які виникають між його рухомими ланками. Оскільки фрикційні механізми працюють на основі використання сил тертя, то в першу чергу слід визначити величину нормального тиску між котками, необхідну для передачі заданого обертового моменту. Тому в роботі розглядаються і уточнюються кінематичні розрахунки, геометричні і силові параметри варіаторів. Виконується дослідження впливу силових параметрів на працездатність фрикційних передач різних типів та забезпечення їх довговічності. Пропонуються нові підходи до вирішення цих задач. Приводяться рекомендації щодо вибору матеріалів фрикційних котків.

фрикційні механізми, фрикційні передачі, варіатор, ролики, контактні напруження, міцність

Постановка проблеми. Фрикційні передачі мають широке застосування у різноманітних механізмах, для передавання обертового моменту за рахунок сил тертя між котками. Теоретичні дослідження цих механізмів потребують свого вдосконалення у зв'язку із зростаючими вимогами працездатності до них і наявності нових матеріалів для елементів тертя поверхонь.

При розрахунку робочих поверхонь фрикційних котків конічної передачі не в повній мірі враховуються радіуси кривизни в середньому перерізі, а тому контактні напруження передачі будуть визначені з деякою похибкою, що впливає на розрахунок працездатності передачі, а отже при проектуванні фрикційних механізмів необхідно це враховувати.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз досліджень [1-5], і перегляд публікацій дозволив зробити висновок, що в цих роботах, розрахунки фрикційних передач за контактними напруженнями мають узагальнений вигляд для всіх типів передач (циліндричних, конічних, лобовій).

При перевірці довговічності робочих поверхонь фрикційних котків умовно вважають, що найбільш небезпечними при викришуванні, спрацюванні і задирах поверхонь є максимальні нормальні контактні напруження.

Крім того в розглянутих роботах при визначенні радіусів кривизни дотичних поверхонь конічних котків не приділена увага радіусам кривизни в середньому перерізі, а це впливає на вірність розрахунку контактних напружень передачі.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження процесів, які відбуваються при роботі фрикційних механізмів і вдосконалення розрахунків їх параметрів з урахуванням радіусів кривизни в середньому перерізі.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо фрикційні передачі, які забезпечують постійне передавальне число. На рис. 1 наведена кінематична схема фрикційного механізму з циліндричними котками.

Цей механізм служить для перетворення обертального руху між паралельними валами з постійним відношенням кутових швидкостей. На рис. 2 представлена кінематична схема фрикційного механізму з конічними котками призначеного для передачі обертального руху між осями що перетинаються.

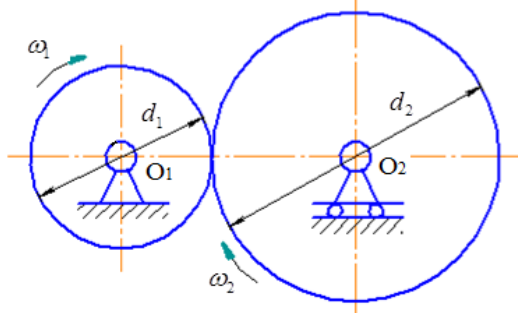


Рисунок 1 – Кінематична схема фрикційної передачі з циліндричними котками

Джерело: розроблено авторами

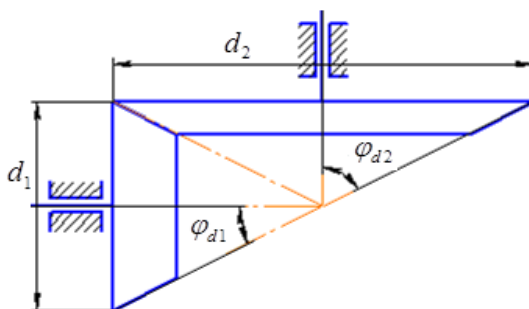


Рисунок 2 – Кінематична схема фрикційної передачі з конічними котками

Джерело: розроблено авторами

Для цієї ж мети може бути використана будь-яка передача (рис. 3), яка є найпростішим варіатором швидкості.

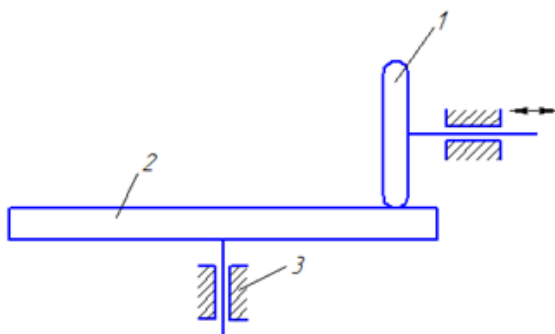


Рисунок 3 – Кінематична схема лобової передачі

Джерело: розроблено авторами

Переміщуючи ролик 1 уздовж своєї осі, можна змінювати не тільки величину, але і знак передавального відношення.

Виходячи з курсу дисципліни «Теорія машин та механізмів» визначено, що в якості профілів фрикційних котків слід брати центроїди для плоского механізму та аксоїди для просторового. Для постійного відношення кутових швидкостей центроїди

представляють собою кола діаметрів d_1 і d_2 , а аксоїди – є правильними конусами з кутами при вершинах $2\varphi_{d1}$ та $2\varphi_{d2}$. Передавальне число для ідеального механізму, в якому відсутнє ковзання рухомих ланок, визначається за наступними формулами:

- для механізму з циліндричними котками [1 - 7]:

$$U = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{T_2}{T_1 \cdot \eta} = \frac{d_2}{d_1}; \quad (1)$$

- для механізмів з конічними котками:

$$U = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{T_2}{T_1 \cdot \eta} = \frac{\sin \varphi_{d2}}{\sin \varphi_{d1}} = \frac{d_2}{d_1}. \quad (2)$$

Однак в дійсності має місце пружне ковзання ланок фрикційної передачі, що, природно, позначиться на величині передавального числа. З метою врахування наявності ковзання ланок у вираз (1) і (2) вводять коефіцієнт ξ :

$$U = \frac{1}{1-\xi} \cdot \frac{d_2}{d_1}, \quad (3)$$

де ξ – коефіцієнт відносного ковзання, величина якого знаходиться в межах 0,02...0,05.

Оскільки механізми що розглядаються працюють на основі використання сил тертя, то зрозуміло, що в першу чергу слід визначити величину нормального тиску між котками, необхідну для передачі заданого крутного моменту.

Розглянемо силові співвідношення у фрикційних передачах з циліндричними котками.

Якщо через F_t позначити колове зусилля (рис. 4), яке може викликати проковзування котків, а через F_s – силу тертя, що виникає в місці контакту котків, то умову надійної роботи фрикційної передачі може бути записано в наступному вигляді:

$$F_s \geq F_t = \frac{2T_2}{d_2}. \quad (4)$$

Вводячи коефіцієнт надійності β , можна від нерівності (4) перейти до рівняння [5 - 7]:

$$F_s = \beta \cdot F_t. \quad (5)$$

Середнє значення коефіцієнта β лежить в межах 1,25...1,5. Вибір цього коефіцієнта залежить від режиму і умов роботи передачі.

Так, наприклад, якщо розглядувана фрикційна передача застосовується в розрахунково-вирішальних механізмах, де помилка в передавальному числі істотно позначиться на результаті, вибирають коефіцієнт надійності значно що перевищує зазначені величини (до $\beta = 3$).

Для того щоб забезпечити виконання рівності (фор. 4), в місці контакту котків необхідно створити нормальний тиск за рахунок притискання котків. Позначимо через Q силу натискання котків. Щоб ця сила була передана на другий фрикційний коток, необхідно одну з опор котків зробити рухомою [1-3]. Відомо що

$$F_s = f \cdot Q, \quad (6)$$

де f – коефіцієнт тертя ковзання між фрикційними катками.

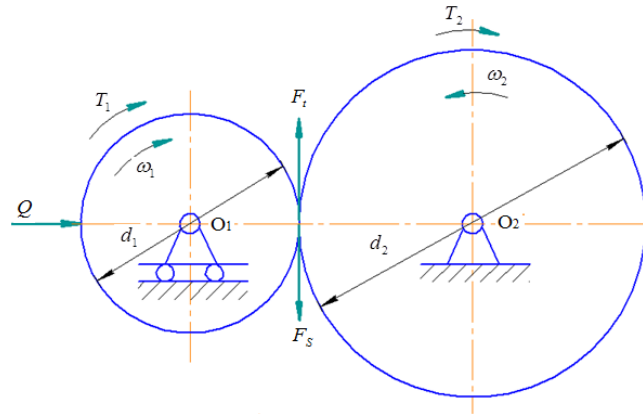


Рисунок 4 – Схема зусиль, що діють при роботі на котки фрикційної передачі

Джерело: розроблено авторами

Підставляючи вираз для F_s в рівняння (фор. 5), легко знайти формулу для визначення зусилля притискання циліндричних фрикційних котків, а саме:

$$Q = \frac{\beta}{f} \cdot F_t. \quad (7)$$

Для випадку передачі з клиновими котками (рис. 5) в розрахункову формулу (7) замість f слід підставити коефіцієнт тертя клинового повзуна f_k , рівний $\frac{f}{\sin \gamma}$, де γ – половина кута клина. Величина кута γ вибирається зазвичай в межах $120^\circ \dots 180^\circ$ [3 - 6]. При малих значеннях γ падає к.к.д. передачі і можливо навіть заклинювання.

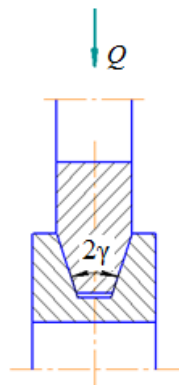


Рисунок 5 – Схема клинчастого котка

Джерело: розроблено авторами

Фрикційна передача з конічними котками.

Умова надійної роботи розглядаємої передачі (рис. 6) також може бути записана в наступному вигляді:

$$F_s = \beta \cdot F_t, \quad (8)$$

де β – коефіцієнт надійності.

В свою чергу, $F_s = f \cdot N$, де N – сила нормального тиску, який виникає між котками. Тоді

$$N = \frac{\beta}{f} \cdot F_t. \quad (9)$$

Нормальний тиск N в місці дотикання котків може бути створений за рахунок притискання одного з них. Якщо осьова сила, визиває необхідний нормальний тиск N , прикладена до котка 1, то її величина дорівнює

$$Q = N \cdot \sin \varphi_{d1} = \frac{\beta}{f} \cdot F_t \cdot \sin \varphi_{d1}. \quad (10)$$

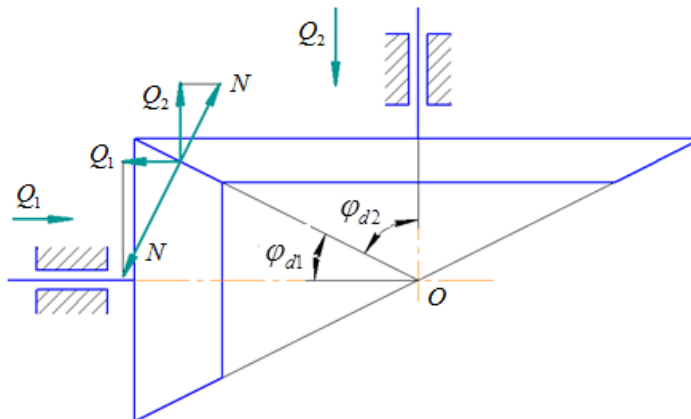


Рисунок 6 – До визначення зусиль притискання
Джерело: розроблено авторами

Якщо осьова сила прикладена до котка 2 (рис. 6), тоді

$$Q = N \cdot \sin \varphi_{d2} = \frac{\beta}{f} \cdot F_t \cdot \sin \varphi_{d2}. \quad (11)$$

Якщо прийняти, що індекс 1 відноситься до меншого котка, то $\varphi_{d1} < \varphi_{d2}$, тоді відповідно $Q_1 < Q_2$, звідки видно, що вигідніше необхідний нормальний тиск створювати за рахунок підтискання меншого котка.

Значення коефіцієнта f вибирається в залежності від матеріалів фрикційних котків [5, 7] і умови роботи механізму в цілому.

Перевірка довговічності робочих поверхонь фрикційних котків.

На поверхні дотику фрикційних котків внаслідок наявності стискувочої сили виникають змінні за величиною контактні напруження, які і викликають руйнування (викришування) робочих поверхонь. Умовно вважають, що найбільш небезпечними з точки зору викришування є максимальні нормальні контактні напруження $\sigma_{H \max}$, які визначаються для випадку початкового лінійного контакту за формулою

$$\sigma_{H \max} = 0,418 \sqrt{F_n \cdot \frac{E_{np}}{\rho_{np}}}, \quad (12)$$

де F_n – погонне контактне навантаження тобто навантаження, яке припадає на одиницю довжини контактної лінії;

$$E_{np} = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2} \text{ – приведений модуль пружності;}$$

E_1 і E_2 – модулі пружності матеріалів контактуючих тіл;

ρ_{np} – приведений радіус кривизни.

Для фрикційної передачі нормальні контактні напруження $\sigma_{H \max}$, визначаємо

$$\sigma_{H \max} = 0,418 \sqrt{\frac{K_{\text{реж}} \cdot F_n \cdot E_{np}}{B \cdot \rho_{np}}} . \quad (13)$$

Позначення величин, які входять до цієї формули

Нормальна сила F_n дорівнює Q_1 для циліндричних котків і $\frac{Q_1}{\sin \varphi_{d1}}$ для конічних котків. Через B позначена ширина котків (довжина контактної лінії).

Для циліндричних котків радіуси кривизни дотичних поверхонь дорівнюють $\rho_1 = \frac{d_1}{2}$ і $\rho_2 = \frac{d_2}{2}$. Для конічних фрикційних котків радіуси кривизни визначаються в середньому перерізі (рис. 7), а саме:

$$\rho_1 = \left(L - \frac{B}{2} \right) \cdot \operatorname{tg} \varphi_{d1}, \quad \rho_2 = \left(L - \frac{B}{2} \right) \cdot \operatorname{tg} \varphi_{d2} . \quad (14)$$

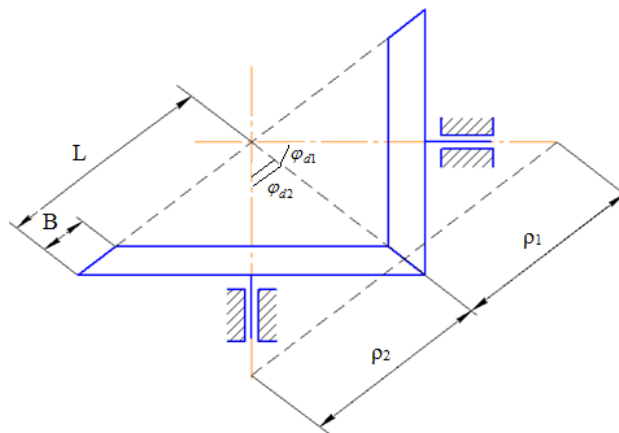


Рисунок 7 – До визначення приведенного радіуса кривизни конічних фрикційних котків
Джерело: розроблено авторами

Тоді при визначенні ρ_{np} для фрикційної передачі з конічними котками знак мінус відсутній у зв'язку з тим, що розглянуті передачі з внутрішнім дотиком не застосовуються в реальних конструкціях.

$$\rho_{np} = \frac{\left(L - \frac{B}{2} \right) \cdot \operatorname{tg} \varphi_{d1} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{d2}}{\operatorname{tg} \varphi_{d2} + \operatorname{tg} \varphi_{d1}} . \quad (15)$$

У формулі для визначення $\sigma_{H \max}$ $K_{\text{реж}}$ – коефіцієнт довговічності, що враховує потрібний строк служби роботи передачі і змінність режиму. Якщо обмежитися розрахунком фрикційної передачі за максимальними контактним напруженням, що і має місце в статті, то можна припустити $K_{\text{реж}} = 1$, і тоді рівняння міцності матиме вигляд:

$$\sigma_{H \max} = 0,418 \sqrt{\frac{F_n \cdot E_{np}}{B \cdot \rho_{np}}} \leq [\sigma]_H , \quad (16)$$

де $[\sigma]_H$ – допустиме контактне напруження.

Щоб забезпечити міцність передачі з точки зору викришування робочих поверхонь котків необхідно визначити нерівність (фор. 16).

Матеріали фрикційних котків.

До матеріалів з яких повинні бути виготовлені фрикційні котки, висувається ряд вимог. По-перше, вони повинні мати досить високе значення коефіцієнта тертя, що призведе до зменшення необхідного зусилля натискання. По-друге, матеріали повинні мати високу контактної міцність і зносостійкість, що збільшить довговічність передачі. Матеріали повинні мати досить високий модуль пружності, що зменшує пружне ковзання котків і т. п..

У цьому випадку, коли обидва котка виготовляються з різних матеріалів, доцільно ведений коток виконувати з більш зносостійкого матеріалу, щоб уникнути появи лисок на веденому котку при буксуванні.

Найбільшу компактність і високий коефіцієнт корисної дії передачі забезпечують котки, виконані з загартованих сталей. Але в цьому випадку потрібна велика точність виготовлення передачі і висока чистота поверхонь котків. Зважаючи на значні за величиною зусилля притискання вали передачі доцільно встановлювати на підшипниках кочення. Зазвичай передачі з котками із загартованих сталей при значних швидкостях працюють в мастилi.

У тому випадку, коли фрикційна передача відкрита і має значні габарити, можна в якості матеріалу котків застосовувати чавун. Для підвищення поверхневої твердості чавуну застосовують відбілювання, поверхнєве загартування і т.п.. Передача з чавуну здійснює менший шум в роботі, але внаслідок менших допустимих контактних напружень має великі габарити, що і обмежує її застосування.

Поєднання матеріалів сталь - текстоліт, сталь - фібра вимагає меншої точності виготовлення і меншу чистоту поверхонь. Коефіцієнт корисної дії такої передачі нижче, ніж для випадку металевих котків. Габарити ж передачі при інших рівних умовах завжди більші, оскільки ці матеріали мають більш низькі значення допустимих контактних напружень.

Всі інші матеріали (шкіра, пресований азбест, прогумована тканина, гума, папір) застосовуються у вигляді набойок на котки для підвищення коефіцієнта тертя.

Переваги і недоліки фрикційних передач.

Однією з основних переваг фрикційних передач перед зубчастими є простота виготовлення робочих тіл. Крім того фрикційні передачі не бояться перевантажень, так як при підвищеному крутному моменту можливе проковзування котків. Це явище одночасно є і істотним недоліком розглянутої передачі, тому що не можна гарантувати постійність передавального відношення. Другим недоліком є те, що опори фрикційної передачі працюють у важких умовах. Дійсно, опори, крім реакцій від корисного навантаження, повинні повністю сприймати зусилля притискання котків Q , які істотно перевищують передане колове зусилля. Так, якщо в вираз (фор. 7) підставити сприятливі значення β і f , а саме $\beta = 1,25$; $f = 0,15$, то

$$Q = \frac{1,25}{0,15} F_t \approx 8,3 F_t,$$

тобто в даних умовах зусилля натискання повинно бути більш ніж в 8 разів вище, ніж колове зусилля F_t .

Зазначені недоліки суттєво обмежують сферу застосування фрикційних передач.

Висновки. В роботі розглядається застосування і аналіз класичного розрахунку котків фрикційних механізмів. Розглядаємо найбільш вживані схеми фрикційних механізмів. На основі проведених досліджень запропоновано уточнену методику розрахунку фрикційних передач, приведено рекомендації до розрахунку довговічності фрикційних передач по контактним напруженням.

Список літератури

1. Павлице В.Т. Основы конструирования та розрахунок деталей машин. Київ: Вища школа, 1993. 356 с.
2. Иванов М.Л., Финогенов В.А. Детали машин: учеб. для машиностроительных специальностей вузов ; под ред. В.А. Финогенова. М.: Высш. шк., 2008. 383 с.
3. Дунаев П.Ф., Леликов О.П. Конструирование узлов и деталей машин: учеб. пособие для студ. техн. спец. вузов . 8-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 496 с.
4. Решетов Л.Н. Детали машин: учеб. для студ. Машиностроительных и механических специальностей вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1989. 496 с.
5. Березовский Ю.Н., Чернилевский Д.В., Петров М.С. Детали машин: учебник для машиностроительных техникумов . М.:Машиностроение, 1983. 384 с.
6. Киркач Н.Ф., Баласанян Р.А. Расчет и проектирование деталей машин, ч. 1 . Харьков: Вища школа, 1987. 336 с.
7. Гузенков П.Г. Детали машин: учеб. для студ. высших технических учебных заведений. М.: Высшая школа, 1982. 351 с.
8. Фрикційна передача : пат. на кор. модель № 7814 Україна : МКИ F16H1/24 ; опубл. 2005, Бюл. № 7. 4 с.
9. Фрикційна передача ; пат. на кор. модель № 12796 Україна : МКИ F16H 15/08 ; опубл. 2006, Бюл. № 3. 4 с.
10. Фрикційна передача : пат. на кор. модель № 116948 Україна : МКИ F16H 1/24 ; опубл. 2017, Бюл. № 11. 4 с.
11. Фрикційна передача : пат. на кор. модель № 90027 Україна : МКИ F16H 1/24 ; опубл. 2014, Бюл. № 9. 4 с.

References

1. Pavlyshche, V.T. (1993). *Osnovy konstruiuvannia ta rozrakhunok detalei mashyn* [Fundamentals of design and calculation of machine parts]. Kyiv: Vyshcha shkola [in Ukrainian].
2. Ivanov, M.L. & Finogenov, V.A. (2008). *Machine parts*. V.A. Fynohenova (Ed.). Moscow: Vyssh. shk. [in Russian].
3. Dunaev, P.F. & Lelikov, O.P. (2004). *Design of units and parts of machines*. (8 d ed.) . Moscow: Izdatel'skij centr «Akademija» [in Russian].
4. Reshetov, L.N. (1989). *Machine parts*. (4 d ed.) . Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
5. Berezovskij, Ju.N., Chernilevskij, D.V. & Petrov, M.S. (1983). *Machine parts*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
6. Kirkach, N.F. & Balasanjan, R.A. (1987). *Raschet i proektirovanie detalej mashin* [Calculation and design of machine parts]. Part. 1. Har'kov: Vishha shkola [in Russian].
7. Guzenkov, P.G. (1982). *Detali mashin* [Machine parts]. Moscow: Vysshaja shkola [in Russian].
8. Util. model pat. 7814 Ukraine : MKY F16H1/24 . Fryktsiina peredacha [Friction transmission]. Has been published 2005, Biul. № 7. 4 p. [in Ukrainian].
9. Util. model pat. 12796 Ukraine : MKY F16H 15/08 . Fryktsiina peredacha [Friction transmission]. Has been published 2006, Biul. № 3. 4 p. [in Ukrainian].
10. Util. model pat. 116948 Ukraine : MKY F16H 1/24 . Fryktsiina peredacha [Friction transmission]. Has been published 2017, Biul. № 11. 4 p. [in Ukrainian].
11. Util. model pat. 90027 Ukraine : MKY F16H 1/24 . Fryktsiina peredacha [Friction transmission]. Has been published 2014, Biul. № 9. 4 p. [in Ukrainian].

Yuriy Nevdakha, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Dubovyk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Pukalov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Natalia Nevdakha**, **D. Mozheiko**
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

The Calculation of Rollers of Friction Mechanisms is Specified

As is known, friction mechanisms are used to convert rotational motion between parallel shafts or whose axes intersect with a constant or variable gear ratio. In the latter case, they are called variators. The operation of friction mechanisms is based on the use of friction forces that occur between its moving parts.

Since the mechanisms under consideration work on the basis of the use of friction forces, it is clear that first of all it is necessary to determine the amount of normal pressure between the rollers required to transmit a given torque.

Therefore, the work unravels and refines the kinematic calculations, geometric and force parameters of the variators. A study of the influence of force parameters on the performance of friction gears of different types and ensuring their durability. New approaches to solving these problems are proposed. Recommendations for the choice of friction roller materials are given.

It is stated that the materials for friction rollers must have a high coefficient of friction, contact strength, wear resistance, as well as a high modulus of elasticity to reduce the elastic slip of the rollers.

friction mechanisms, friction transmissions, variator, rollers, contact stresses, strength

Одержано (Received) 26.02.2022

Прорецензовано (Reviewed) 14.03.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 539.3

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.144-154](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.144-154)**Л.М. Кривоблоцька**, доц., канд. фіз.-мат. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,
Україна**e-mail:krivoblotsky19@gmail.com*

Напружений стан гнучких пластин з отвором

Дана постановка і метод розв'язку класу задач з нелінійної механіки гнучких пластин з отвором; для цього сформульовані граничні умови; запропоновано метод розв'язку – розклад по безрозмірному параметру моментного навантаження; в результаті отримана послідовність лінійних граничних задач для визначення прогинів і функцій напружень для пластинки в довільному наближенні. Розв'язана неосесиметрична задача про згин гнучкої пластинки з отвором; одержано формули для обчислення прогинів і функції напружень.

безрозмірний параметр, геометрична нелінійність, гнучка пластина з отвором, прогини, функція напружень

Постановка проблеми. Сучасні сільськогосподарські машини, машини для виробництва та роздачі кормів по конструкції відносяться до одних з найбільш складних машин. Причому ця сільськогосподарська техніка працює в складних експлуатаційних умовах – сезонний характер роботи, агресивні середовища, посилений абразивний знос. Вказані машини та механізми працюють в форсованому режимі, з великими вібраційними та динамічними навантаженнями. Розрахунки на міцність деталей машин та елементів конструкцій з концентраторами напружень в більшості випадків можна звести до розрахункових схем для плоскої нелінійної задачі і крайовим задачам теорії пластин і оболонок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми концентрації напружень біля отвору пластин при їх розтягу, стиску або зсуву (в лінійної та нелінійної постановках) присвячені багаточисельні дослідження ряду вчених, серед яких слід назвати Г.М.Савіна, О.М.Гузя, О.С.Космодамианського, Е.Ф.Бурмістрова, Н.П.Флейшмана, В.І.Тульчія та інші. Узагальнені результати по лінійній проблемі концентрації напружень представлені в монографіях [9-12].

Задачам пружного геометрично нелінійного згину пластин з отвором присвячено порівняно мало досліджень, оскільки при їх розв'язку зустрічається ряд принципових труднощів.

Головні з них полягають в тому, що при застосуванні ітераційних схем розв'язку довільного типу, суттєво збільшується на “нескінченності” порядок особливостей, які породжують початкові (лінійні) наближення. В кінцевому підсумку прогини, зусилля, моменти при відході від отвору катастрофічно зростають. Причина цього феномену в тому, що суттєво розрізняються порядки диференціальних операторів лінійної

Саме квадратично нелінійні оператори спричиняють “намотування” порядків особливостей. До речі, якщо розглянути аналогічні задачі для випадку розтягу нескінченних пластин з отвором з урахуванням фізичної нелінійності, то вказані порядки однакові і вказане явище не має місця.

В зв'язку з цим виникла задача пошуку таких аналітичних методів розв'язку вказаної задачі, які б дозволили суттєво зменшити в шуканих розв'язках порядок сингулярностей на “нескінченності” і дали б можливість виконувати розрахунки силових характеристик в довільній точці пластини.

Постановка завдання. Розглянемо пластину товщини h , яка ослаблена криволінійним отвором з достатньо гладким контуром Γ . Вважаємо, що в пластинці має місце чистий згин не тільки при малих, а і при порівняно великих прогинах. На рис. 1 схематично зображена модель досліджуваної системи і точки прикладання сил F , які викликають згинаючі моменти величини M . Будемо також припускати, що розмір отвору такої величини, при якому можна нехтувати впливом зовнішнього краю прикладання навантаження на напружено-деформований стан в околі отвору.

Іншими словами – зовнішнє навантаження прикладається на “нескінченності”.

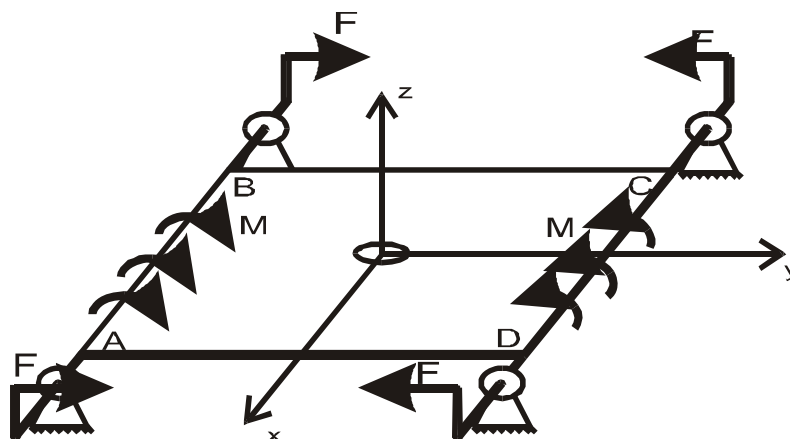


Рисунок 1 – Схема моделі досліджуваної системи

Ставиться задача: дослідити напружено-деформований стан біля отвору в припущенні, що пластина геометрично нелінійно згинається під дією вказаних моментів.

Виклад основного матеріалу. Для розв'язку задачі необхідно знайти функції прогинів $w(\alpha_1, \alpha_2)$ та функцію напружень $\Phi(\alpha_1, \alpha_2)$, які задовольняють відомим рівнянням Кармана :

$$Lw = \frac{1}{D} B(w, \Phi); \quad L\Phi = \frac{1}{2} Eh B(w, \Phi), \quad (1)$$

де $B(w, \Phi)$ - білінійна диференціальна форма виду

$$B(w, \Phi) = H_2 w H_1 \Phi + 2 H_{12} w H_{12} \Phi + H_1 w H_2 \Phi, \quad (2)$$

де H_1, H_2, H_{12} – лінійні диференціальні оператори такої аналітичної структури

$$H_1 \dots = \frac{1}{A_2} \frac{\partial}{\partial \alpha_2} \left(\frac{1}{A_2} \frac{\partial}{\partial \alpha_2} \dots \right) + \frac{1}{A_1^2 A_2} \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} \frac{\partial}{\partial \alpha_1}; \quad H_2 = \text{curl} H_1; \quad (3)$$

$$H_{12} \dots = \frac{1}{A_2} \left[-\frac{\partial}{\partial \alpha_2} \left(\frac{1}{A_1} \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \dots \right) + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} \frac{\partial}{\partial \alpha_2} \dots \right].$$

Зусилля $T_{11}, T_{22}, T_{12} = T_{21}$, моменти $M_{11}, M_{22}, M_{12} = M_{21}$, кривизни визначаються через вказані оператори наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} T_{11} &= H_1 \Phi, \quad T_{12} = H_{12} \Phi; \\ \mathfrak{A}_{11} &= -H_2 w, \quad \mathfrak{A}_{12} = H_{12} w; \\ M_{11} &= D(H_1 + \nu H_2) w, \quad M_{12} = -D(1 - \nu) H_{12} w. \end{aligned} \right\} (\text{curl}). \quad (4)$$

Вираз для узагальнених перерізуючих зусиль можна представити через оператори H_1, H_2, H_{12} наступним чином:

$$\begin{aligned} Q_1^* &= Q_1 w \quad (\text{curl}), \quad (5) \\ Q_1 \dots &= \frac{1}{A_1 A_2} \left\{ \frac{\partial}{\partial \alpha_1} (A_2 (H_1 + \nu H_2) \dots) + (1 - \nu) \frac{\partial}{\partial \alpha_2} (A_1 H_{12} \dots) \right. \\ &\quad \left. + (1 - \nu) \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_2} H_{12} \dots - \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} (H_2 + \nu H_1) \dots \right\} + (1 - \nu) \frac{1}{A_2} \frac{\partial}{\partial \alpha_2} H_{12} \dots \end{aligned} \quad (\text{curl})$$

На контурі Γ шукані функції w та Φ повинні задовольняти наступним граничним умовам

$$\begin{aligned} H_1 \Phi|_L &= 0, \quad H_{12} \Phi|_L = 0; \\ (H_1 + \nu H_2) w|_L &= 0; \\ Q_1 w|_L &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Крім цього, шукані функції повинні задовольняти умовам на «нескінченності», тобто наближатися до напруженого стану аналогічної пластини без отвору.

Розв'язок поставленої задачі можна знаходити різними варіантами методів ітерацій, серед яких використовуємо найбільш простий – метод розкладу по параметру [1].

Шукані функції w і Φ подаємо в вигляді наступних розкладів по параметру ε :

$$\begin{aligned} w &= \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon^{2k-1} w_{2k-1}(\alpha_1, \alpha_2), \quad \Phi = \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon^{2k} \Phi_{2k}(\alpha_1, \alpha_2) \\ T_{\alpha\beta} &= \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon^{2k} T_{\alpha\beta, 2k}(\alpha_1, \alpha_2); \quad \mathfrak{A}_{\alpha\beta} = \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon^{2k-1} \mathfrak{A}_{\alpha\beta, 2k-1}(\alpha_1, \alpha_2) \end{aligned} \quad (7)$$

Тут ε – безрозмірне значення параметра, за який приймаємо інтенсивність моментного навантаження на «нескінченності»:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \frac{\alpha^2 a^2}{h^4} M, \quad M = \max(M_1, M_2).$$

Для визначення шуканих функцій $w_{2k-1}(\alpha_1, \alpha_2)$, $\Phi_{2k}(\alpha_1, \alpha_2)$ ($k=1, 2, \dots$) отримуємо два типа лінійних граничних задач.

Якщо одержана певна кількість наближень в процесі розв'язку таких задач, то можна дослідити НДС при великих прогинах пластинки в довільній точці, в тому числі концентрацію моментів та зусиль в околі контуру Γ .

Метод малого параметра широко застосовували при розв'язуванні нелінійних задач теорії пластин і оболонок, в тому числі при розв'язуванні задач про концентрацію зусиль, моментів [2], [3], [6].

Поряд з декартовою системою координат введемо полярну систему, тобто положення довільної точки M серединної площини пластини до деформації будемо задавати координатами r та φ . Тоді в усіх співвідношеннях слід покладати $\alpha_1 = r$, $\alpha_2 = \varphi$.

У цьому випадку досліджувану нелінійну граничну задачу будемо формувати у безрозмірному виді, в полярних координатах.

Маємо наступні рівняння рівноваги

$$\Delta^2 \Delta^2 w T_\rho \mathfrak{A}_\rho + 2T_{\rho\varphi} \mathfrak{A}_{\rho\varphi} + T_\varphi \mathfrak{A}_\varphi = 0. \quad (8)$$

$$\Delta^2 \Delta^2 \Phi = \alpha^2 (\mathfrak{A}_{\rho\varphi}^2 - \mathfrak{A}_\rho \mathfrak{A}_\varphi). \quad (9)$$

і граничні умови:

$$\left. \frac{\partial^2 w}{\partial \rho^2} + \nu \left(\frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial w}{\partial \rho} \right) \right|_{\rho=1} = 0;$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial \rho} \Delta^2 w + (1-\nu) \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} \right) \right) \right|_{\rho=1} = 0; \quad (10)$$

$$\left. \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} \right|_{\rho=1} = 0; \quad \left. \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} \right) \right|_{\rho=1} = 0.$$

До цих співвідношень необхідно додавати умови на «нескінченності»:

$$T_{\rho\rho}, T_\rho \rightarrow 0 \text{ при } \rho \rightarrow \infty; \quad M_{\rho\rho} \rightarrow \frac{1}{2}(1 - \cos 2\varphi); \quad M_{\rho\varphi} \rightarrow \frac{1}{2} \sin 2\varphi \quad (11)$$

Зв'язок розмірних та безрозмірних (рисочка зверху) величин такий:

$$\bar{w} = \frac{w}{h}, \quad \rho = \frac{r}{a}, \quad \alpha^2 = 12(1 - \nu^2), \quad \bar{\Phi} = \frac{\alpha^2}{Eh^3} \Phi,$$

$$\bar{T}_\rho = \frac{a^2 \alpha^2}{Eh^3}, \quad \dots, \quad \bar{\mathfrak{x}}_\rho = \frac{a^2}{h} \mathfrak{x}_\rho, \quad \dots, \quad \bar{M}_\rho = \frac{\alpha^2 a^2}{Eh^4} M_\rho,$$

де a – радіус отвору;

$T_\rho, T_\varphi, T_{\rho\varphi}$ – відповідно радіальні, кільцеві та зсувні зусилля; аналогічного змісту позначення для моментів $M_\rho, M_\varphi, M_{\rho\varphi}$;

в подальшому рисочку над безрозмірними величинами відкидаємо.

Аналогічно (8) покладаємо

$$w = \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \varepsilon^k w_k; \quad \Phi = \sum_{m=2,4,6,\dots}^{\infty} \Phi_m \varepsilon^m. \quad (12)$$

Для випадку застосування полярних координат граничні задачі зводяться до розгляду наступної послідовності граничних задач:

$$\varepsilon : \Delta^2 \Delta^2 w_1 = 0;$$

$$L_1 w_1 \Big|_{\rho=1} = 0; \quad L_2 w_1 \Big|_{\rho=1} = 0. \quad (13)$$

$$\varepsilon^2 : \Delta^2 \Delta^2 \Phi_2 = \alpha^2 (\mathfrak{x}_{\rho\varphi,1}^2 - \mathfrak{x}_{\rho,1} \mathfrak{x}_{\varphi,1});$$

$$N_1 \Phi_2 \Big|_{\rho=1} = 0 \quad N_{12} \Phi_2 \Big|_{\rho=1} = 0. \quad (14)$$

$$\varepsilon^3 : \Delta^2 \Delta^2 w_3 = -T_{\rho,2} \mathfrak{x}_{\rho,1} - 2T_{\rho\varphi,2} \mathfrak{x}_{\rho\varphi,1} - T_{\varphi,2} \mathfrak{x}_{\varphi,1};$$

$$L_1 w_3 \Big|_{\rho=1} = 0; \quad L_2 w_3 \Big|_{\rho=1} = 0. \quad (15)$$

і т.д.

В цих співвідношеннях $L_1 \dots, L_2 \dots, N_1 \dots, N_{12} \dots$ – лінійні диференціальні оператори наступного типу:

$$L_1 \dots = \frac{\partial^2 \dots}{\partial \rho^2} + \nu \left(\frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \dots}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \dots}{\partial \rho} \right);$$

$$L_2 \dots = \frac{\partial}{\partial \rho} \Delta^2 \dots + (1 - \nu) \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 \dots}{\partial \varphi^2} \right);$$

$$N_1 \dots = \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \dots}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \dots}{\partial \rho}; \quad N_{12} \dots = \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \dots}{\partial \varphi} \right),$$

де Δ^2 – оператор Лапласа в полярних координатах.

При розв'язанні граничних задач (13) – (15) виникає необхідність на кожному кроці ітерації визначати загальні та частинні розв'язки бігармонічних рівнянь в полярних координатах. Вгадати ці представлення інколи буває важко, а головне – можна загубити деякі специфічні доданки. Для полегшення та стандартизації процедури обчислень виведемо спеціального виду формули для визначення вказаних розв'язків.

Стосовно розглядуваної проблеми доцільно розглядати, в силу механічної та геометричної симетрії, бігармонійне рівняння в полярних координатах з правою частиною наступного вигляду:

$$\Delta^2 \Delta^2 u = \sum_{m=0}^{\infty} f_m(\rho) \cos m\varphi \quad (m = 0, 2, 4, \dots), \quad (16)$$

де $f(\rho)$ – довільна обмежена на напівінтервалі $\rho \in [1, \infty)$ функція.

Пропонується така послідовність одержання формул для частинних інтегралів.

Розглядаємо спочатку бігармонійне рівняння з правою частиною

$$\Delta^2 \Delta^2 u_m = f_m(\rho) \cos m\theta \quad (m = 0, 2, 4, \dots), \quad (17)$$

де покладемо $\rho = e^{\xi}$, $u_m(\rho, \theta) = e^{k\xi} \tilde{u}_m(\xi, \theta)$, $k \in N$ – довільне число.

Після перетворень отримуємо рівняння такого виду:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^4 \tilde{u}_m}{\partial \xi^4} + 4(k-1) \frac{\partial^3 \tilde{u}_m}{\partial \xi^3} + 2(3k^2 - 6k + 2) \frac{\partial^2 \tilde{u}_m}{\partial \xi^2} + \\ & + 4(k^2 - 3k + 2) \frac{\partial \tilde{u}_m}{\partial \xi} + k^2(k-2) \tilde{u}_m + 2(k^2 - 2k + 2) \frac{\partial^2 \tilde{u}_m}{\partial \theta^2} + \\ & + 4(k-1) \frac{\partial^3 \tilde{u}_m}{\partial \xi \partial \theta^2} + 2 \frac{\partial^4 \tilde{u}_m}{\partial \xi^2 \partial \theta^2} + \frac{\partial^4 \tilde{u}_m}{\partial \theta^4} = e^{(4-k)\xi} f_m(\xi) \cos m\theta, \\ & (m = 0, 2, 4, \dots; k \in N). \end{aligned} \quad (18)$$

Функції $\tilde{u}_m = \tilde{u}_m(\xi, \theta)$ можна трактувати як деякі поверхні від вказаних змінних; на них розглянемо інтегральні криві ($\xi = \text{const}, \theta$). Вони повинні задовольняти рівнянням

$$\frac{d^4 u_m^*}{d\theta^4} + 2(k^2 - 2k + 2) \frac{d^2 u_m^*}{d\theta^2} + k^2(k-2) u_m^* = e^{(4-k)\xi} f_m(\xi) \cos m\theta \quad (19)$$

$$(m = 0, 1, 2, \dots; k \in N).$$

Інтегруємо ці рівняння методом Лагранжа в припущенні, що постійні інтегрування залежать від змінної ξ . При цьому необхідно розрізняти частинні випадки $k=0$, $k=1$, $k=2$ та загальний випадок $k \neq 1$ та $k \neq 2$. Загальні інтеграли рівнянь (19), які ми отримуємо, потім «примушуємо» бути розв'язками більш загальних рівнянь (18) (за допомогою певного вибору згаданих постійних інтегрування). В результаті одержуємо системи звичайних диференціальних рівнянь для визначення постійних інтегрування. Маючи розв'язок цих рівнянь для вказаних значень $k \in N$ і $m = 0, 2, 4, \dots$ в кінцевому результаті знайдемо загального вигляду формули для визначення загальних розв'язків однорідних рівнянь (17) та відповідні їм частинні інтеграли.

Так для $m=0$ загальний розв'язок однорідного рівняння буде

$$\bar{u}_0 = A_{01}^0 + A_{02}^0 \ln \rho + A_{03}^0 \rho^2 + A_{04}^0 \rho^2 \ln \rho, \quad (20)$$

для $m = 2, 4, 6 \dots$ маємо

$$\bar{u}_m = (A_{m1}^0 \rho^m + \frac{A_{m2}^0}{\rho^{m-2}} + \frac{A_{m3}^0}{\rho^m} + A_{m4}^0 \rho^{m+2}) \cos m \theta. \quad (21)$$

Відповідно для вказаних значень m отримуємо формули для визначення частинних інтегралів при довільному завданні функції вигляду $f(\rho)$:

$$u_0^* = \frac{1}{4} \left[3\rho^2 \ln \rho \int \rho f_0(\rho) d\rho - \rho^2 \int \rho(1 + \ln \rho) f_0(\rho) d\rho + \ln \rho \int \rho^3 f_0(\rho) d\rho - \int \rho^3 (\ln \rho - 1) f_0(\rho) d\rho \right] \quad (m=0) \quad (22)$$

$$u_m^* = \frac{1}{8m(m^2-1)} \left[-(m+1)\rho^m \int \rho^{3-m} f_m(\rho) d\rho - (m-1)\rho^{-m} \int \rho^{3+m} f_m(\rho) d\rho + (m+1)\rho^{-m+2} \int \rho^{m+1} f_m(\rho) d\rho + (m-1)\rho^{m+2} \int \rho^{1-m} f_m(\rho) d\rho \right] \cos m \theta \quad (m=2, 4, 6 \dots). \quad (23)$$

Розглянемо задачу про згин моментами на «нескінченності» гнучкої пластинки з круглим отвором. Використовуючи формули (20) – (23) після громіздких обчислень, які тут випускаємо ([4], [5]) одержимо представлення загальних розв'язків граничних задач (13)-(15) в трьох наближеннях.

Маємо:

$$w = \varepsilon \{ a_2 \rho^2 + b_2 \ln \rho + [a_0 \rho^2 + a_1 + b_{-2} \rho^{-2}] \cos 2\varphi \} + \varepsilon^3 \left\{ \sum_{k=0}^3 a_{2k}^{(0)} \rho^{2k} + \sum_{k=1}^2 b_{-2k}^{(0)} \rho^{-2k} + \left(\sum_{k=0}^2 c_{2k}^{(0)} \rho^{2k} + \sum_{K=1}^2 d_{-2k}^{(0)} \rho^{-2k} \right) \ln \rho + \right. \quad (24)$$

$$\Phi = \varepsilon^2 \left\{ \sum_{k=0}^2 e_{2k}^{(0)} \rho^{2k} + \sum_{k=1}^2 g_{-2k}^{(0)} \rho^{-2k} + f_0^{(0)} \ln \rho + f_2^{(0)} \ln^2 \rho + \left[\sum_{k=0}^1 e_{2k}^{(2)} \rho^{2k} + g_{-2}^{(2)} \rho^{-2} + \left(\sum_{k=0}^1 f_{2k}^{(2)} \rho^{2k} + h_{-2}^{(2)} \rho^{-2} \right) \ln \rho \right] \cos 2\varphi + \right. \\ \left. + \left[\sum_{k=0}^1 e_{2k}^{(4)} \rho^{2k} + \sum_{k=1}^2 g_{-2k}^{(4)} \rho^{-2k} \right] \cos 4\varphi \right\}. \quad (25)$$

Наведемо деякі з цих коефіцієнтів, щоб мати представлення про їх аналітичну структуру.

$$a_{02}^{(0)} = d_{0,l/2,0}; \quad d_{0,l/2,0} = \frac{1}{8} N_{0,-4} + \frac{1}{8} N_{0,l,-4}; \quad N_{0,-4} = -2A_{02}a_5 + \frac{3}{8}B_2a_4 + \frac{1}{24}B_6a_1 - \frac{5}{16}B_4a_3 + \\ + \frac{1}{8}A_6a_2 - 4B_{02}a_3 - \frac{1}{4}A_4a_5; \quad N_{0,l,-4} = -\frac{1}{2}A_4a_5 + \frac{1}{3}B_4a_3; \quad A_4 = 2a_3^2 + a_5^2;$$

$$\begin{aligned}
B_2 &= 4(a_1 a_5 - 2a_2 a_3); \quad A_6 = 24a_3 a_4; \quad A_8 = 36a_4^2; \quad B_4 = 4a_3 a_5; \quad B_6 = 12a_4 a_5; \\
B_{02} &= -\frac{3}{64} B_4; \quad A_{02} = -\frac{1}{4} A_4; \\
a_1 &= \frac{-M}{4D(1-\nu)}; \quad a_2 = \frac{-M}{4D(1+\nu)}; \quad a_3 = \frac{-M}{2D(1-\nu)}; \quad a_4 = \frac{-M}{4D(3+\nu)}; \quad a_5 = \frac{-M}{2D(3+\nu)}.
\end{aligned}$$

На основі формули (24), (25) можна обчислювати в довільних точках різні силові і деформаційні характеристики пластинки: радіальні, зсувні і кільцеві зусилля, радіальні і кільцеві моменти та інше.

Так, наприклад, формула для обчислення кільцевих моментів має вид:

$$\begin{aligned}
M_{\varphi\varphi} &= \varepsilon \{ A_0 + B_{-2}\rho^{-2} + (C_0 + D_{-2}\rho^{-2} + D_{-4}\rho^{-4}) \cos 2\varphi \} + \\
&+ \varepsilon^3 \left\{ \sum_{k=0}^2 A_{2k}^{(0)} \rho^{2k} + \sum_{k=1}^3 B_{-2k}^{(0)} \rho^{-2k} + \left(\sum_{k=0}^1 C_{2k}^{(0)} \rho^{2k} + \sum_{k=1}^3 D_{-2k}^{(0)} \rho^{-2k} \right) \ln \rho + \right. \\
&+ (E_0^{(0)} + E_{-2}^{(0)} \rho^{-2}) \ln^2 \rho + \left[\sum_{k=0}^2 A_{2k}^{(2)} \rho^{2k} + \sum_{k=1}^4 B_{-2k}^{(2)} \rho^{-2k} + \left(\sum_{k=0}^1 C_{2k}^{(2)} \rho^{2k} + \right. \right. \\
&+ \left. \left. \sum_{k=1}^2 D_{-2k}^{(2)} \rho^{-2k} \right) \ln \rho + (E_0^{(2)} + E_{-4}^{(2)} \rho^{-4}) \ln^2 \rho \right] \cos 2\varphi + \left[\sum_{k=0}^1 A_{2k}^{(4)} \rho^{2k} + \right. \\
&+ \left. \sum_{k=1}^3 B_{-2k}^{(4)} \rho^{-2k} + \left(\sum_{k=0}^1 C_{2k}^{(4)} \rho^{2k} + \sum_{k=1}^3 D_{-2k}^{(4)} \rho^{-2k} \right) \ln \rho \right] \cos 4\varphi + \\
&\left. + \left(\sum_{k=0}^1 A_{2k}^{(6)} \rho^{2k} + \sum_{k=2}^4 B_{-2k}^{(6)} \rho^{-2k} \right) \cos 6\varphi \right\}. \quad (26)
\end{aligned}$$

Вже з аналізу отриманих виразів для $w, M_{\varphi\varphi}$ бачимо, що вони містять доданки з співмножниками $\rho^4; \rho^2; \ln \rho; \rho^2 \ln \rho; \ln^2 \rho$. Порядок такого типу особливостей (при $\rho \rightarrow \infty$) суттєво зростає з номером наближень. Звідки випливає, що силові характеристики на «нескінченності» будуть неперервно зростати.

Бачимо, що маємо справу з розбіжними рядами, які в подальшому намагаємося використовувати для обчислень різного типу характеристики НДС. Розбіжні ряди вперше почав використовувати Л.Ейлер в обчисленнях і в теорії аналітичного продовження функцій комплексного змінного. Так, в книзі [15] взнаємо наступну інформацію:

“Ця Ейлерова ідея – використання розбіжних рядів – одна з небагатьох, що замість визнання – зустріла у наступних покоління математиків – рішучий опір, як абсолютної хибна...” “Тільки подальший розвиток математики в напрямі Вейерштрасової теорії аналітичних функцій дає змогу оборонити Ейлерові позиції і в справах розбіжних рядів”.

Наступний рішучий вклад у використанні розбіжних ітераційних процесів зробив математичний гігант початку ХХ століття А.Пуанкаре. в працях [13], [14], він у свій час писав: “Итак, мы должны рассмотреть соотношение новой природы, которое может существовать между функцией аргументов x и μ , которую мы будем обозначать символом $\varphi(x, \mu)$, и расходящимся рядом по степеням μ ,

$$f_0 + \mu f_1 + \mu^2 f_2 + \dots + \dots \mu^p x^p + \dots$$

”Астрономы сказали бы, что этот ряд сходится и что он представляет функцию μ . Они постоянно имеют дело с рядами, которые формально удовлетворяют дифференциальным уравнениям, и оставляют вопрос о сходимости этих рядов. На первый взгляд такой подход кажется совершенно незаконным. И тем не менее такой подход часто приводит к цели (подчеркнуто нами).

Чтобы объяснить, в чём здесь дело, необходимо более подробно остановиться на этом вопросе. Именно это я и собираюсь сделать”.

В подальшому систематична теорія розбіжних рядів була викладена у фундаментальній монографії Харди Г. [7]. Широко розбіжні ряди зустрічаються і використовуються в різних варіантах теорії поля ; досить, наприклад, навести статтю [12] і наведені в ній наукові джерела.

Теорії підсумовування рядів типу Фур’є по системі функцій, що є розв’язками спеціального типу граничної задачі, присвячено дослідження А.Н.Тихонова [8]. Він виходить з того, що коефіцієнти Фур’є завжди визначаються з певною похибкою і тому ряди Фур’є за цими коефіцієнтами є розбіжними. Використовуючи створену ним теорію розв’язування некоректних проблем, А.Н.Тихонов в остаточному рахунку побудував спеціальний метод підсумовування вказаних рядів Фур’є.

Висновки. Дана постановка і метод розв’язання нового класу задач з нелінійної механіки гнучких пластин з отвором; для цього сформульовані у спеціальній формі рівняння Кармана і відповідні граничні умови; запропоновано метод розв’язку – розклад по безрозмірному параметру моментного навантаження на «нескінченності» деформаційних і силових характеристик; в результаті отримана послідовність лінійних граничних задач для визначення прогинів і функцій напружень для пластинки в довільному наближенні.

Розв’язана аналітично в трьох наближеннях неосесиметрична задача про згин гнучкої пластинки з отвором; одержано в загальному виді формули для обчислення прогинів і функції напружень. Підтверджено на основі одержаних розв’язків наявність сингулярностей в ітераціях, які обумовлюють зростання прогинів і силових характеристик не тільки при $\rho \rightarrow \infty$, а і з ростом номера наближення (ітерації). Історичний досвід показує, що ці два-три наближення в багатьох випадках визначають розв’язки задач, придатні в практичному сенсі. Відомо, що з розбіжними рядами як математичними об’єктами спеціальної природи необхідно поводитися по особливим правилам і законам. Наприклад, застосування особливого підсумовування в роботі Харді [7] дозволяє успішно використовувати такі ряди для проведення відповідних обчислень.

Список літератури

1. Каюк Я.Ф., Алексеева М.К. О методе разложения по параметру в задачах изгиба гибких пластин и оболочек . *Прикладна механіка*. 1979. 15, № 8. С. 63-68.
2. Каюк Я.Ф., Ващенко Л.Ф. Геометрически нелинейное деформирование мягких оболочек под несимметричной нагрузкой . *Прикладная механика*. 1980. 16, № 8. С. 16-23.
3. Каюк Я.Ф., Хижняк В.К. Метод квазилинеаризации в некоторых нелинейных задачах механики . *Прикладная механика*. 1981. 17, № 5. С. 25-32.
4. Каюк Я.Ф., Кривоблоцкая Л.Н. Метод регуляризации сингулярных итераций в нелинейных задачах изгиба пластин с отверстием . *Вісник Донецького університету, Сер. А: Природничі науки*. 2002. Вип. 1. С. 83-90.
5. Каюк Я.Ф., Кривоблоцкая Л.Н. Концентрация моментов в окрестности круглого отверстия пластины при больших изгибах . *Вісник Донецького університету, Сер. А: Природничі науки*. 2002. Вип. 2. С. 187-191.
6. Каюк Я.Ф., Кривоблоцкая Л.Н. Сингулярные итерации в нелинейных задачах концентрации напряжений . *Теорет. и прикладная механика*. 2002. Вып. 36. С.98-108.

7. Харди Г. Расходящиеся ряды. М.: Издательство иностранной литературы, 1951. 273 с.
8. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Физматгиз, 1986. 287 с.
9. Савин Г.Н., Гузь А.Н., Цурпал И.А. Физически нелинейные задачи пластин и оболочек, ослабленных отверстиями. Труды школы по нелинейным задачам. Тарту: Изд-во Тартусского университета, 1966. С. 204-234.
10. Савин Г.Н., Флейшман Н.П. Пластинки и оболочки в рёбрами жесткости. Киев: Наукова думка. 383 с.
11. Савин Г.М., Тульчий В.І. Довідник з концентрації напружень. Київ: Вища школа, 1976. 410 с.
12. Проблемы механики: сб. статей; под ред. Х. Драйдена, Т. Кармана. М.: Изд-во иностр. лит, 1959. 340 с.
13. Пуанкаре А. Избранные труды, I, Новые методы небесной механики. М.: Наука, 1971. С. 335-340.
14. Пуанкаре А. Лекции по небесной механике. М.: Наука, 1965. 537 с.
15. Кравчук М. Вплив Ейлера на подальший розвиток математики. Київ, видавн. Всеукраїнської Акад. наук. 1935// Науковопопулярні праці, вид. КПП, 2000. С.54-56.

References

1. Kaiuk, Ya.F. & Alekseeva, M.K. (1979). O metode razlozheniia po parametru v zadachakh izgiba gibkikh plastin i obolochek [On the parameter expansion method in the problems of planes and shells bending]. *Prikladna mekhanika – Applied Mechanics*, 8, 63-68 [in Russian].
2. Kaiuk, Ya.F. & Vashchenko, L.F. (1980). Geometricheski nelineinoie deformirovaniie miahkikh obolochek pod nesimmetrichnoi nagruzkoі [Geometrically nonlinear deformation of soft shells under asymmetric load]. *Prikladnaia mekhanika – Applied Mechanics*, 8, 16-23 [in Russian].
3. Kaiuk, Ya.F. & Khyzhniak, V.K. (1981). Metod kvazilinearizatsii v nekotorykh nelineinykh zadachakh mekhaniki [Method of quasi-linearization in some nonlinear problems of mechanics]. *Prikladnaia mekhanika – Applied Mechanics*, 5, 25-32 [in Russian].
4. Kaiuk, Ya.F. & Krivoblotskaya, L.N. (2002). Metod regularizatsii singuliarnykh iteratsii v nelineinykh zadachakh izgiba plastin s otverstiiem [Method of regularization of singular iterations in nonlinear problems of bending of plates with a hole]. *Visnyk Donetskoho universytetu – Bulletin of Donetsk University, ser. A: Pryrodnychi nauky – Natural Sciences, issue 1*, 83-90 [in Russian].
5. Kaiuk, Ya.F. & Krivoblotskaya, L.N. (2002). Kontsentratsiya momentov v okrestnosti kruglogo otvestiya plastyny pri bol'shikh izgibakh [The concentration of moments in the vicinity of the round hole of the plate at large bends]. *Visnyk Donetskoho universytetu – Bulletin of Donetsk University, ser. A: Pryrodnychi nauky – Natural Sciences, issue 2*, 187-191 [in Russian].
6. Kaiuk, Ya.F. & Krivoblotskaya, L.N. (2002). Singulyarnyie iteratsii v nelineynykh zadachakh kontsentratsii napryazheniy [Singular Iterations in Nonlinear Stress Concentration Problems]. *Teoreticheskaia i prikladnaia mekhanika – Theoretical and Applied Mechanics, issue 36*, 98-108 [in Russian].
7. Hardy, G. (1951). *Raskhodiashchiiesia riady [Divergent Series]*. Moscow: Izdatelstvo inostrannoi literatury [in Russian].
8. Tikhonov, A.N. & Arsenin, V.Ya. (1986) *Metody resheniya nekorrektnykh zadach [Methods for incorrect problems solving]*. Moscow: Fizmatgiz [in Russian].
9. Savin, G.N. & Guz, A.N., Tsurpal I.A. (1966). *Fizicheski nelineinye zadachi plastin i obolochek, oslablennykh otverstiiami [Physically nonlinear problems of plates and shells weakened by holes//Proceedings of the school on nonlinear problems]*. Tartu: Izdatelstvo Tartusskogo universiteta [in Russian].
10. Savin, G.N. & Fleishman (N.d.). *Plastinki i obolochki s riobrami zhestkosti [Plates and shells with stiffening ribs]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
11. Savin, G.M. & Tulchii, V.I. (1976). *Dovidnyk z kontsentratsii napruzhen [Stress Concentration Handbook]*. Kyiv: Vyshcha shkola [in Ukrainian].
12. Dryden, H. & Karman, T. (Eds.). (1959). *Problemy mekhaniki [Problems of mechanics]*. Moscow: Izdatelstvo inostrannoi literatury [in Russian].
13. Poincare, A. (1971). *Novyie metody nebesnoi mekhaniki. Izbrannyie trudy [New methods of celestial mechanics. Selected works]*. (Vol. I). Moscow: Nauka [in Russian].
14. Poincare, A. (1965). *Lektsii po nebesnoi mekhanike [Lectures on celestial mechanics]*. Moscow: Nauka [in Russian].
15. Kravchuk, M. (2000). *Vplyv Eilera na podalshyi rozvytok matematyky [The influence of Euler on the further development of mathematics]*. Kyiv: vydavnytstvo Vseukrainskoi Akademii nauk [in Ukrainian].

Larysa Kryvoblotska, Assoc. Prof., PhD in Physics and Mathematics
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Stress State of Flexible Plates with a Hole

The article is dedicated to solving of problems of nonlinear mechanics of plates and shells – problems about stress-deformed state of flexible plates with hole under action of moment loading on “infinity”.

Solve of problems is offered to find with method of expansion of parameter of the external loading. During the solving was determined, that the value of bending and power descriptions unlimitedly increase at breaking from the edge of hole. For elaboration of regularization methods was conducted the survey and analysis of problems from different fields of mechanics. On the basis of this survey was formed the new approach to the solving of problem of regularization: it is offered to change the usual notions about particular sum of series and methods of their summing. It is created such methods of linear and nonlinear summing, when in summable functions the arbitrary parameters and functions enter. On basis of this method was solved the new geometrical-nonlinear problems of plates and shells mechanics in nonaxes-symmetrical axes-symmetrical arrangement about bending on “infinity” with moment loading of plates with hole. It is established, that the finding numeral data, diagrams do not conflict with the usual notions about stress-deformed conditions of plates with hole; definite mechanical effects are got. The methods of regularization are approved on test problems.

It is grounded mathematically, that the got solutions to equilibrium equations with some asymptotical exactness and exactly to the linear limit conditions, if the operators of initial problem will be polylinear.

dimensionless parameter, geometric nonlinearity, flexible plate with a hole, deflections, stress function

Одержано (Received) 16.03.2022

Прорецензовано (Reviewed) 24.03.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

УДК 629.113.5.62-592

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.154-160](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.154-160)

В.О. Дубовик, доц., канд. техн. наук, **О.Л. Пузирьов**, доц., канд. техн. наук,
Ю.А. Невдаха, доц., канд. техн. наук, **В.В. Пукалов**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кіровоградський, Україна
e-mai: zenesperanto@gmail.com

Експериментальні дослідження двоструменевого способу захисту розплавленого металу при наплавленні в середовищі CO₂

Зварювання і наплавлення в середовищі захисних газів займає перше місце за об'ємом наплавленого металу і виготовленої продукції серед інших механізованих способів дугового зварювання. В роботі розглядаються різні способи захисту зони плавлення металу шляхом витиснення повітря із зони горіння дуги. Наводяться результати порівняльних досліджень захисних властивостей газового струменя пальників різних конструкцій. Розглядаються технологічні схеми захисту двошвидкісним струменем CO₂ пальниками конічного і циліндричного перерізу. Наводяться рекомендації по швидкісним параметрам захисного газу, який витікає з центрального і периферійного перерізу пальника. Дослідження спрямовані на забезпечення ефективного захисту розплавленого металу від азоту повітря, а також зменшення витрати захисного газу при цьому.

зварювання, наплавлення, шов, покриття, захисний газ, газовий захист, електрична дуга, зона термічного впливу, потенційне ядро

Постановка проблеми. Технології зварювання та наплавлення в середовищі захисних газів отримали широке розповсюдження в промисловості при виготовленні конструкцій та відновленні працездатності деталей машин. Основними їх перевагами

поряд з іншими способами механізованого зварювання є відносно низька вартість матеріалів для наплавлення, високі експлуатаційні властивості отриманих покриттів, можливість спостерігати за процесами наплавлення та вносити певні корективи безпосередньо при напавленні. До недоліків слід віднести: підвищене розбризування металу, важкість збільшення продуктивності процесу, обмеженість в керуванні фізико-хімічними властивостями металу покриття зокрема його розкислення і легування. Ці недоліки частково усуваються застосуванням порошкових дротів і порошкоподібних флюсів, які вводяться в зону горіння дуги. Сучасні технології зварювання і наплавлення дуговим способом засновані на створенні ефективного газового захисту матеріалу шва від проникнення повітря в зону розплавленого металу. Фізичний захист полягає у витісненні повітря із зони горіння дуги – зони плавлення металу шляхом подачі під тиском із сопла пальника захисного газу. Поряд з цим залишаються розкритими питання швидкісних параметрів захисного струменя та витрати газу з точки зору економії матеріалів, а також вибір конструкції пальників, що можуть відповідати цим вимогам.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд літературних джерел по питанню забезпечення захисту зони плавлення металу виявив певні проблеми зварювання в умовах рухомих повітряних потоків тобто при наявності вітру. Особливо це актуально при виготовленні металоконструкцій за межами виробничих приміщень.

Дослідження таких вчених як: Б.Є. Патон, М.М Новожилов, В.І. Нечаєв, Г.М. Абрамович, С.Ю. Крашенинников, А.М. Секундов, І.К. Походня та ін. вказують на те, що при витратах захисного газу 25 – 30 л/хв. і діаметру вихідного сопла пальника від 15 до 20 мм. та такій же відстані від поверхні деталі, руйнування захисної зони здійснюється повітряним потоком, який рухається із швидкістю приблизно 2,5 м/с. На практиці ж критичними є швидкості руху повітря близько 1,0 м/с при діаметрах сопел пальників 15...20 мм. та витратах захисних газів від 15 до 25 л/хв.

Одним із шляхів вирішення проблеми забезпечення захисту зони розплавленого металу в зоні горіння дуги, при зварюванні в умовах рухомих повітряних потоків, було збільшення жорсткості захисного струменя за рахунок підвищення швидкості витоку захисного газу. Це в свою чергу приводило до зниження економічних показників процесу за рахунок отримання великих витрат газового середовища. При цьому дослідження інших вчених вказували на погіршення захисту розплавленого металу при великих витратах захисних газів.

Аналіз досліджень [1-7] показує, що найбільший вплив на захист зони реакції розплавленого активного металу з азотом повітря має тільки потенційне ядро струменя.

При напавленні неактивних металів у середовищі вуглекислого газу в області основної і прикордонної ділянок, що отримували регулюванням відстані сопла від деталі і швидкістю наплавлення, забезпечується вміст повітря 4...6%.

Застосовуючи ці технологічні прийоми при зварюванні низьковуглецевих і низьколегованих сталей в середовищі CO₂ при наявності вітру за рахунок збільшення витрат вуглекислого газу підвищували жорсткість струменя, але при зварюванні активних металів в аргоні досягти таких результатів не вдавалося.

В деяких роботах пропонували покращити захист реакційної зони за рахунок застосування захисних ковпаків і насадок для місць наплавлення, а також зменшувати відстань між соплом пальника і поверхнею наплавлення. В умовах виробництва ці заходи виявилися недоцільними так-як вони забезпечували перегрівання і забризкування захисних елементів та сопел розплавленим металом, а також заважали візуальному спостереженню за технологічним процесом.

Ці дослідження показують, що є певна межа можливостей струменя захисного газу при наявності рухомих повітряних потоків незважаючи на підвищення витрат захисного газу надійний захист реакційної зони не може бути забезпечений.

Пояснення цього явища наведено в дослідженнях Г.М. Абрамович, С.Ю. Крашенинніков, А.М. Секундов [3] де вказано, що втрата захисних властивостей струменя відбувається за рахунок скорочення довжини потенційного ядра внаслідок чого спостерігається виникнення турбулентності і утворення нерівномірного профілю швидкості газового середовища, що викликано збільшенням витрат останнього.

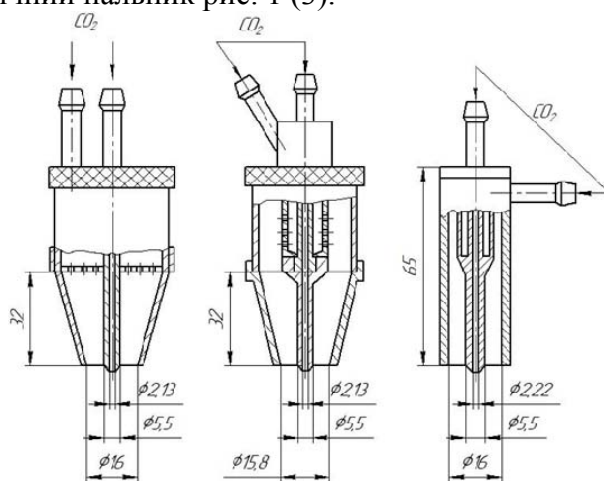
Проведений аналіз літератури показав, що захисні можливості одношвидкісного струменя обмежені як по швидкості так і по витраті газового середовища, а перспективним є застосування двох і більше струменів з різними швидкостями руху захисного газу.

Постановка завдання. Дослідження захисних властивостей двошвидкісного струменя вуглекислого газу та обґрунтування його параметрів при наплавленні в умовах рухомих повітряних потоків.

Виклад основного матеріалу. Згідно досліджень вчених [1 - 7] якість наплавленого металу і його фізико-механічні властивості залежать від вмісту азоту у самому шві. Підвищений вміст азоту у металі покриття приводить до утворення тріщин і як наслідок зниження його міцності від втоми та експлуатаційних властивостей, а тому необхідно запобігти проникненню повітря в реакційну зону при горінні електричної дуги.

При проведенні досліджень надійності захисту реакційної зони експерименти проводили в два етапи: перший – без горіння дуги (ізотермічні умови); другий – в умовах горіння дуги. Перший етап досліджень дозволив виконати порівняльні дослідження впливу конструкцій пальників на можливості захисту реакційної зони від рухомих повітряних потоків і раціональної витрати газу. Другий етап дозволив дослідити вміст азоту у наплавленому металі в умовах руху повітряних потоків,

Для експериментів брали пальники з конічними соплами рис. 1 (1 і 2), в них була різна схема подачі вуглекислого газу, а також був взят найбільш поширений у виробництві циліндричний пальник рис. 1 (3).



1, 2 – пальники з конічними соплами; 3 – пальник з циліндричним соплом

Рисунок 1 – Конструкції пальників для дослідження процесу наплавлення у двошвидкісному газопорошковому струмені CO₂

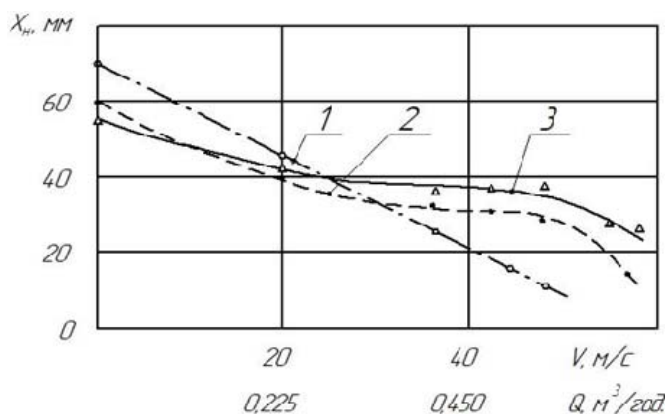
Джерело: розроблено авторами з використанням [1-8]

Діаметри сопел приймали згідно рекомендацій виробництва - 16 мм. Це забезпечувало допустимі для реального виробництва витрати вуглекислого газу при якомога найбільших його швидкостях.

Для проведення експериментів керувалися наступними технологічними нормами і рекомендаціями:

- витрати вуглекислого газу згідно технологічних норм не повинні бути більшими ніж $1,2 - 2,0 \text{ м}^3/\text{год.}$ (в сумі центральної і периферійної частини);
- з метою забезпечення легування шва порошкоподібними присадними матеріалами швидкість витоку вуглекислого газу повинна знаходитись в межах від 20 до 50 м/с;
- діаметр центрального сопла повинен не забризкуватись краплями розплавленого металу і забезпечувати необхідну швидкість і прийнятну (згідно технологічних норм) витрату захисного газу, а отже знаходитись в межах від 2,0 до 2,5 мм.

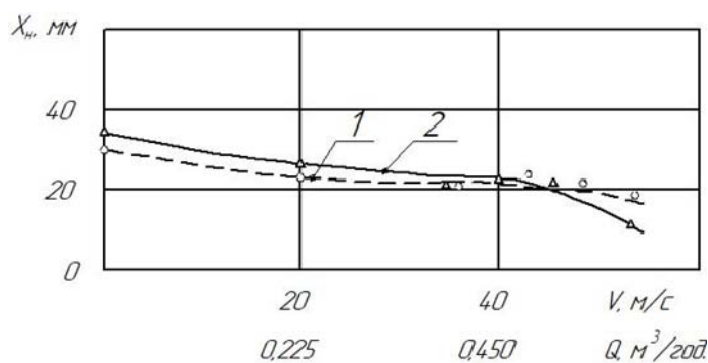
Дослідження залежності довжини потенційного ядра кожного з вибраних пальників від швидкості центрального струменя захисного газу виконували при наступних швидкостях руху CO_2 із зовнішнього сопла: 1,0; 1,35; 1,95 м/с (рис. 2).



1 – $V=1,0 \text{ м/с}$; 2 – $V=1,35 \text{ м/с}$; 3 – $V=1,95 \text{ м/с}$.

Рисунок 2 – Вплив швидкості витікання вуглекислого газу по центральному соплу на довжину потенційного ядра для пальника 1

Джерело: розроблено авторами



1 – пальник 2; 2 – пальник 3.

Рисунок 3 – Вплив швидкості витікання вуглекислого газу по центральному соплу на довжину потенційного ядра при $V=1,95 \text{ м/с}$.

Джерело: розроблено авторами

При виборі швидкості витоку захисного газу керувалися виробничими нормами і досвідом підприємств (до $2,0 \text{ м}^3/\text{год.}$).

За мінімальні швидкості витіку вуглекислого газу були прийняті результати попередніх досліджень [1, 3, 4, 6, 7]. В цих дослідженнях наведено результати по визначенню залежностей витрат вуглекислого газу, діаметру сопел та відстаней від їх поверхонь до реакційної зони на вміст азоту у наплавленому металі.

В результаті отримані дані показують, що при швидкості витікання вуглекислого газу 0,64 м/с і витраті 0,45 м³/год. мали високий вміст азоту - 0,02%, який зменшувався до 0,008 - 0,01% при збільшенні швидкості витікання вуглекислого газу від 1,0 м/с (0,8 м³/год.) до 1,5 м/с (1,3 м³/год.).

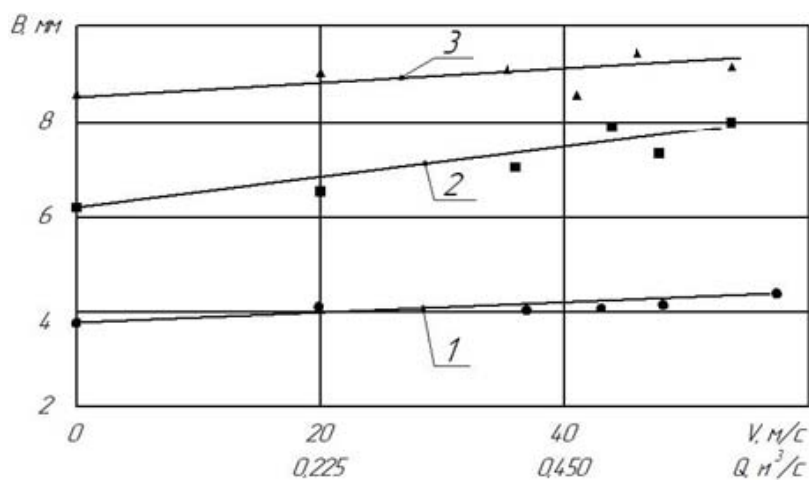
Результати дослідження залежності довжини потенційного ядра від швидкості витікання вуглекислого газу по центральному соплу наведені на рис. 2 і 3.

Аналіз наведених даних показує, що скорочення довжини ядра відбувається при малих швидкостях витікання газу із зовнішнього сопла і носить лінійний характер. При збільшенні швидкості захисного струменя спочатку спостерігається певне зменшення ядра струменя, а потім ядро стає стабільним і при швидкості більше 50...55 м/с воно знову знижується. Незабруднена повітрям зона спостерігається у діапазоні швидкостей витікання вуглекислого газу по центральному соплу від 20 до 50 м/с згідно рис. 2. (криві 2, 3).

Згідно даних (рис. 2) бачимо, що найкращий захист реакційної зони при наплавленні в середовищі вуглекислого газу забезпечує пальник 1.

Порівняльні дослідження потенційних ядер струмені розглянутих пальників (при периферійній швидкості 1,95 м/с та швидкостях вуглекислого газу по центральному соплу від 20 до 50 м/с) дають змогу зробити висновок що найбільшу незабруднену повітрям зону створював пальник 1 (рис. 2, 3).

Додаткова турбулентність периферійного потоку (внаслідок контактування струменів із стінками пальника при радіальному введенні газу [1, 3, 4, 6, 7]) обумовлює меншу довжини потенційного ядра пальників 1, 2 та сприяє більш нерівномірному профілю швидкості газу. В роботі [3] підтверджено, що додаткова турбулентність, яка виникає за рахунок різниці швидкостей між периферійною та центральною областями потоку захисного газу, при введенні додаткового високошвидкісного струменя, призведе до скорочення потенційного ядра. Це явище добре ілюструє вимірювання ширини зони змішування (рис. 4), яка вказує на інтенсивність зростання турбулентності потоку газового середовища. Ширина зони змішування показує стійкість струменя захисного газу при взаємодії з конвективними і вітровими потоками.



1 – пальник 2; 2 – пальник 2; 3 – пальник 3.

Рисунок 4 – Залежність ширини зони змішування з повітрям від швидкості витікання вуглекислого газу по центральному соплу при $V=1,95$ м/с

Джерело: розроблено авторами з використанням [3, 4, 7]

Струмені захисного газу з пальника 1 мають незначний темп наростання зони змішування у порівнянні з пальниками 2, 3.

Висновки. Порівняльні дослідження параметрів струменів захисних газів пальників 1 - 3 (при $V = 1,95$ м/с і $V = 20 - 50$ м/с) показують, що кращий захист реакційної зони забезпечує пальник 1. Довжина потенційного ядра струменя пальника 1 не менша, ніж у промислового пальника 3 при $V_{нов} = 0$, що підтверджує можливість забезпечення більш надійного захисту металу шва при наплавленні в двошвидкісному струмені вуглекислого газу.

Список літератури

1. Новожилов Н. М. Основы металлургии дуговой сварки в газах. М. : Машиностроение, 1979. 232 с.
2. Походня И. К. Газы в сварных швах. М. : Машиностроение, 1972. 256 с.
3. Турбулентное смешение газовых струй / Абрамович Г. Н. и др.). М.: Наука, 1974. 272 с.
4. Влияние формы сопла и характера истечения газового потока на качество защиты сварного шва / Степанов В. В. и др. *Сварочное производство*. 1976. № 6. С. 34-36.
5. Багрянский К. В., Добротина З. А., Хренов К. К. Теория сварочных процессов. К. : Высшая школа, 1976. 423 с.
6. Ардентов В. В., Федоренко Г.А. О струйной защите при газо электрической сварке. *Сварочное производство*. 1973. № 1. С. 3-5.
7. Безбах Д. К. Сварка на открытых площадках в судостроении и судоремонте. Л. : Судостроение, 1974. 135 с.
8. А.с. 856710 (СССР). Способ дуговой сварки /Баженов В. В., Трусов А. Г., Овчинников В. А. и др. Опул. в Б.И., 1981. № 31.

References

1. Novozhilov, N.M. (1979). *Osnovy` metallurgii dugovoj svarki v gazakh* [Fundamentals of Metallurgy of Arc Welding in Gases]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
2. Pokhodnya, I.K. (1972). *Gazy v svarnykh shvakh* [Gases in welds]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
3. Abramovich, G.N., Krashennnikov, S.Yu., Sekundov, A.N. et al. (1974). *Turbulentnoe smeshenie gazovy`kh struj* [Turbulent mixing of gas jets]. Moscow: Nauka [in Russian].
4. Stepanov, V.V., Nechaev, V.I., Fofanov, A.A. et al. (1976). Vliyanie formy` sopla i kharaktera istecheniya gazovogo potoka na kachestvo zashhity` svarnogo shva [Influence of the shape of the nozzle and the nature of the outflow of the gas flow on the quality of the protection of the weld]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 6, 34-36 [in Russian].
5. Bagryanskij, K.V., Dobrotina, Z.A. & Khrenov, K.K. (1976). *Teoriya svarochny`kh proccessov* [Theory of welding processes]. Kiev: Vy`sshaya shkola [in Russian].
6. Ardentov, V.V. & Fedorenko, G.A. (1973). O strujnoj zashhite pri gazo e`lektricheskoy svarke [On jet protection in gas-electric welding]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 1, 3-5 [in Russian].
7. Bezbakh, D.K. (1974). *Svarka na otkry`ty`kh ploshhadkakh v sudostroenii i sudoremonte* [Welding in open areas in shipbuilding and ship repair.]. Leningrad: Sudostroenie [in Russian].
8. A.s. 856710 (USSR). Bazhenov V.V., Trusov A.G., Ovchinnikov V.A, et al. (1981). Sposob dugovoj svarki [Arc welding method]. Opubl. v B.I., № 31.

Viktor Dubovyk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olexandr Puzyrov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yuriy Nevdakha**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Pukalov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Experimental Studies of a Two-jet Method of Protection of Molten Metal During Surfacing in CO₂

In the industry of restoration of details and production of designs from low-carbon and low-alloy steels the technology of welding by an electrode of continuous section which melts in the environment of carbon dioxide has become widespread. Welding and surfacing in shielding gases ranks first in terms of the amount of weld metal and manufactured products among other mechanized arc welding methods.

Today, the need for wires for welding in shielding gases is about 200 thousand tons. Today's requirements indicate that welding technologies in shielding gases will occupy a leading position for the next 15

to 20 years. This is due to the relatively low cost of materials for surfacing, high performance properties of the obtained coatings, the ability to monitor the surfacing processes and make certain adjustments directly during surfacing. Along with the advantages of surfacing in a protective gas, there are also disadvantages: increased spraying of the metal, the difficulty of increasing the productivity of the process, limited control over the physicochemical properties of the coating metal in particular its deoxidation and alloying. These shortcomings are partially eliminated by the use of flux-cored wires and powdered fluxes, which are introduced into the combustion zone of the arc.

The main problem is the ingress of air into the combustion zone of the arc and the interaction of air nitrogen with molten metal, which negatively affects the quality of the latter. Modern technologies of arc welding and surfacing are based on the creation of effective gas protection of the weld material from the penetration of air into the area of molten metal. Physical protection is the expulsion of air from the combustion zone of the arc - the zone of melting of the metal by supplying under pressure from the nozzle of the shielding gas burner.

Therefore, the paper considers various ways to protect the melting zone of the metal by expelling air from the combustion zone of the arc. The results of comparative studies of the protective properties of the gas jet of burners of different designs are presented. The technological scheme of protection with two-speed CO₂ jet by burners of conical and cylindrical section is considered. Recommendations for the velocity parameters of the shielding gas flowing from the central and peripheral cross-section of the burner are given. Research is aimed at ensuring effective protection of molten metal from air nitrogen, as well as reducing the consumption of shielding gas.

welding, surfacing, seam, coating, shielding gas, gas shielding, electric arc, thermal zone, potential core

Одержано (Received) 19.03.2022

Прорецензовано (Reviewed) 25.03.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 621.383:624.046

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.161-168](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.161-168)

В.А. Настоящий, проф., канд. техн. наук, **В.А. Пашинський**, проф., д-р техн. наук, **М.В. Пашинський**, канд. техн. наук, **М.С. Якименко**, доц., канд. фіз.-мат. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: pva.kntu@gmail.com

Методика розрахунку несучої здатності сонячних панелей як елемента забезпечення енергоефективності будівель

Запропонована методика розрахунку несучої здатності сонячних панелей, розташованих на дахах малоповерхових будинків. Отримані робочі формули для визначення допустимого прольоту панелі типової конструкції залежно від навантажень, відношення розмірів її сторін та кута нахилу до горизонту. З урахуванням кліматичних навантажень у м. Кропивницький встановлено, що вирішальним є розрахунок за вимогами другого граничного стану. Допустимий проліт сонячної панелі з обшивками із загартованого скла товщиною 3 мм може змінюватися від 0,68 м до 1,36 м.
енергоефективність будівель, сонячні панелі, несуча здатність

Постановка проблеми. Однією з поширених енергозберігаючих технологій у галузі будівництва є улаштування сонячних панелей на дахах малоповерхових будинків, які можуть практично повністю забезпечити потреби в електроенергії. На відміну від стаціонарних сонячних електростанцій, кути нахилу та орієнтація сонячних панелей за сторонами світу визначаються конструкцією покрівлі і можуть істотно відрізнятися від оптимальних. Вимушена схема установки обумовлює необхідність прогнозування електричної потужності та оцінювання несучої здатності сонячних панелей з урахуванням кліматичних навантажень для даного географічного району, розмірів панелі та кута її нахилу до горизонту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для забезпечення малоповерхових будівель електроенергією використовуються монокристалічні та полікристалічні сонячні панелі різних виробників. Вони відрізняються розмірами та електричними характеристиками, але мають подібні конструкції у вигляді двох шарів загартованого скла, між якими розміщуються фотоелектричні комірки [1, 2]. Номенклатура сонячних панелей, наявних на українському ринку, широко представлена в мережі Internet. Вибірковий аналіз сайтів торговельних організацій [3, 4] показав, що ширина більшості сонячних панелей, з яких монтуються сонячні електростанції, коливається від 65 см до 130 см, а довжина приймає значення 99...239 см. Панелі менших розмірів, представлені в [4], зазвичай використовуються для живлення окремих невеликих об'єктів типу вуличних ліхтарів, світлофорів, електронних дорожніх знаків тощо.

Сонячні панелі встановлюються на металевий каркас і працюють на згин як плити, обперті по контуру. Навантаження від власної ваги панелей можна визначити за даними виробника, наведеними в [3, 4] та на інших інтернет-сторінках, а кліматичні навантаження від снігу, вітрового тиску та ожеледі – за рекомендаціями ДБН В.1.2-2:2006 [5]. Інженерна методика визначення зусиль та прогинів панелей базується на

таблицях коефіцієнтів [6], залежних від відношення сторін панелі. Найменшими при постійній ширині (прольоті) є зусилля в квадратних панелях. Якщо довжина перевищує ширину більше ніж удвічі, панель можна розраховувати як балку на двох шарнірних опорах з прольотом, рівним ширині панелі.

Перевірки міцності та прогинів сонячних панелей можна виконувати за загальними правилами опору матеріалів та розрахунку пластин [6]. Необхідні для виконання розрахунків механічні характеристики скла наведені в роботах [7, 8]. Аналогічний підхід до розрахунку віконного скла від дії вітрового тиску та змін температури в склопакеті реалізовано в роботі [9]. Відсутність у довідковій літературі та в чинних нормах України чітких вказівок щодо розрахунку сонячних панелей спонукає до розроблення простої інженерної методики розрахунку несучої здатності сонячних панелей за критеріями міцності та жорсткості.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розроблення методики оцінювання несучої здатності сонячних панелей з урахуванням розмірів панелі, кута нахилу до горизонту та кліматичних навантажень у заданому географічному районі.

Передумови та початкові дані. Сонячні панелі встановлюються на металеві каркаси паралельно поверхні скатної покрівлі, тому з урахуванням можливого розміщення на покрівлях мансард в розрахунках несучої здатності панелей розглянуті кути нахилу до горизонту в межах $15^\circ \dots 75^\circ$. Вибірковий аналіз панелей, описаних в [3, 4], дає відношення їх довжини до ширини в межах 1,4...2,0 при ширині (прольоті) панелі 65...130 см. За даними [7, 8] прийняті значення розрахункового опору загартованого скла $R = 35$ МПа та модуля пружності $E = 70$ ГПа. Кліматичні навантаження на панель визначаються за ДБН [5].

Навантаження на панель. На сонячні панелі, розташовані на покрівлях будинків, можуть діяти навантаження від власної ваги, снігу, вітрового тиску та ожеледно-вітрове навантаження. За даними [3, 4], характеристичне значення навантаження від власної ваги панелей становить $p_e = 98 \dots 125$ Па. Враховуючи порівняно невеликий діапазон зміни навантаження та встановлений в [10] коефіцієнт надійності $\gamma_{fmp} = 1,1$, для подальших розрахунків в запас надійності приймемо узагальнене експлуатаційне розрахункове значення навантаження від власної ваги сонячних панелей $p_e = 125$ Па та граничне $p_m = 138$ Па.

Кліматичні навантаження визначені для умов м. Кропивницький згідно з вимогами ДБН [5] з урахуванням особливостей розміщення та конструкції сонячних панелей, а також строку служби 100 років. Характеристичні значення та коефіцієнти надійності за кліматичними навантаженнями дорівнюють:

для ваги снігового покриву	$S_0 = 1230$ Па, $\gamma_{fms} = 1,14$, $\gamma_{fes} = 0,49$;
для максимального тиску вітру	$W_0 = 410$ Па, $\gamma_{fmw} = 1,14$, $\gamma_{few} = 0,21$;
для тиску вітру при ожеледі	$W_B = 210$ Па, $\gamma_{fmwg} = 1,16$;
для товщини стінки ожеледі	$b = 22$ мм, $\gamma_{fmg} = 1,16$.

Для виконання конструктивних розрахунків панелі як плити, обертої по контуру, необхідно визначити складову рівномірно розподіленого навантаження, яка діє перпендикулярно до площини панелі, нахиленої під кутом α до горизонту. Робочі формули для визначення цього навантаження отримані виходячи з вимог і формул ДБН [5] для двох сполучень навантажень. З метою спрощення наведених нижче формул (1)...(3), коефіцієнти, які завжди дорівнюють одиниці, до наведених нижче формул не включені.

Граничне розрахункове значення для сполучення 1 (власна вага панелі, сніг і максимальний тиск вітру) дорівнює

$$q_{1m} = \gamma_n \left[\gamma_{fmp} \cdot p_0 \cdot \cos \alpha + \psi \left(\gamma_{fms} \cdot S_0 \cdot \mu \cdot \cos^2 \alpha + \gamma_{fmw} \cdot W_0 \cdot C_{aer} \cdot C_h \right) \right]. \quad (1)$$

Експлуатаційне розрахункове значення для сполучення 1 дорівнює

$$q_{1e} = \gamma_n \left[p_0 \cdot \cos \alpha + \psi \left(\gamma_{fes} \cdot S_0 \cdot \mu \cdot \cos^2 \alpha + \gamma_{few} \cdot W_0 \cdot C_{aer} \cdot C_h \right) \right]. \quad (2)$$

Граничне розрахункове значення для сполучення 2 (власна вага панелі, ожеледь з відповідним вітровим тиском) дорівнює

$$q_{2m} = \gamma_n \left[\gamma_{fmp} \cdot p_0 \cdot \cos \alpha + \gamma_{fmg} \cdot b \cdot k \cdot \mu_2 \cdot \rho \cdot g \cdot \cos \alpha + \gamma_{fmwg} \cdot W_0 \cdot C_{aer} \cdot C_h \right]. \quad (3)$$

Оскільки нормами [5] для ваги ожеледі встановлене лише граничне розрахункове значення, експлуатаційне розрахункове значення для сполучення 2 також обчислюється за формулою (3) з урахуванням коефіцієнта надійності за навантаженням від власної ваги панелі $\gamma_{fmp} = 1$.

У формулах (1)...(3) позначено:

γ_n – коефіцієнт відповідальності за [10];

ψ – коефіцієнт сполучення двох змінних навантажень, який згідно з [5] дорівнює 0,9;

μ – коефіцієнт переходу від ваги снігового покриву на поверхні ґрунту до снігового навантаження на покрівлю, який згідно зі схемою 1 додатка Ж ДБН [5] приймає значення $0 \leq \mu \leq 1$ залежно від кута нахилу покрівлі;

C_{aer} – аеродинамічний коефіцієнт, який визначається за схемою 2 додатка І ДБН [5] з урахуванням форми та співвідношення розмірів споруди і в запас надійності приймається рівним $0 \leq C_{aer} \leq 0,8$ залежно від кута нахилу панелі;

C_h – коефіцієнт висоти споруди, який згідно з пунктом 9.9 ДБН [5] для місцевості типу ІІ (сільська місцевість з невеликими спорудами, будинками і деревами) на висоті 10 м над поверхнею землі прийнято рівним 0,9;

$\mu_2 = 0,6$ – частка поверхні елемента, що піддається обледенінню;

$k = 1$ – коефіцієнт з таблиці 10.2 ДБН [5] для висоти над поверхнею 10 м;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння;

$\rho = 0,9 \text{ г/см}^3$ – густина льоду.

Результати обчислення навантажень за формулами (1)...(3) для різних кутів нахилу панелей наведені в таблиці 1. Результуючі розрахункові значення нормальної до поверхні панелі складової сумарного навантаження q_m та q_e прийняті більшими з відповідних значень для двох розглянутих сполучень навантажень.

Таблиця 1 – Розрахункові значення навантажень на сонячні панелі

α	μ	C_{aer}	q_{1m}	q_{2m}	q_m	q_{1e}	q_{2e}	q_e
15	1	0,15	1498	320	1498	696	307	696
20	1	0,20	1446	324	1446	666	312	666
25	1	0,25	1376	327	1376	629	315	629
30	0,857	0,30	1143	327	1143	521	315	521
35	0,714	0,35	930	325	930	421	314	421
40	0,572	0,40	743	322	743	332	311	332
45	0,429	0,50	608	328	608	260	319	328
50	0,286	0,60	507	334	507	201	325	334
55	0,143	0,70	440	337	440	157	330	337
60	0	0,80	406	340	406	127	333	340
65	0	0,80	395	317	395	117	312	317
70	0	0,80	383	293	383	107	289	293
75	0	0,80	371	269	371	96	266	269

На рисунку 1 зображені графіки залежності навантажень від кута нахилу панелей, побудовані за даними таблиці 1. З рисунка видно, що для розрахунку за першою групою граничних станів вирішальним є перше сполучення навантажень (власна вага панелі, сніг і максимальний тиск вітру). Перевірку прогину при кутах нахилу панелей до 42° слід виконувати з урахуванням першого сполучення навантажень, а при більших кутах нахилу вирішальним стає друге сполучення навантажень (власна вага панелі та ожеледь з відповідним вітровим тиском). Це твердження справедливе для умов м. Кропивницький, але в інших місцевостях співвідношення навантажень може бути іншим.

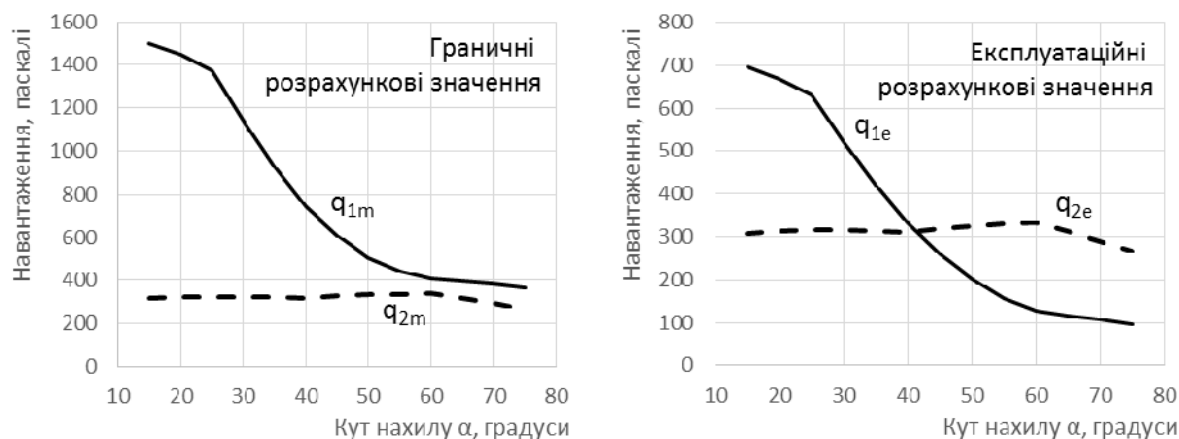


Рисунок 1 – Залежності розрахункових значень навантажень від кута нахилу панелей

Джерело: розроблено авторами

Розрахунки несучої здатності панелей. Сонячна панель складається з двох шарів загартованого скла, між якими розміщені фотоелементи. В запас надійності зв'язок між верхнім і нижнім склом не враховується. Тоді конструкцію сонячної панелі можна представити у вигляді двох плит, які працюють на згин незалежно одна від одної, сприймаючи половину діючого навантаження кожна. Розрахунок плит, шарнірно обпертих по контуру, з достатньою точністю можна виконати з використанням коефіцієнтів, наведених в [6] та в інших джерелах. З урахуванням визначених цим методом максимальних значень згинальних моментів і прогинів, перевірки міцності та жорсткості сонячних панелей слід виконувати за формулами:

$$\sigma = \frac{3 \cdot k_m q_m L^2}{h^2} \leq R; \quad \frac{f}{L} = \frac{k_f q_e L^3}{2 \cdot E \cdot h^3} \leq \left[\frac{f}{L} \right]. \quad (4)$$

Коефіцієнти k_m і k_f наведені в таблицях [6] залежно від відношення B/L більшого розміру панелі до меншого. Для полегшення автоматизації розрахунків ці залежності апроксимовані виразами:

$$k_m = 0,3145 - \frac{0,267}{(B/L)^{0,33}}; \quad k_f = 0,472 - \frac{0,428}{(B/L)^{0,246}}. \quad (5)$$

У формулах (4) і (5) позначено:

q_m , q_e – граничне та експлуатаційне розрахункові значення рівномірно розподіленого навантаження на панель за формулами (1), (2), (3), Па;

B , L – більший та менший розміри панелі, м;

h – товщина скла, мм;

R – розрахунковий опір скла при згині, Па;

E – модуль пружності скла, Па.

Гранично допустимі відносні прогини встановлені в ДСТУ [11] для плит прольотом до 1 м рівними 1/120 прольоту, а при прольоті 3 м вони дорівнюють 1/150 прольоту. Враховуючи, що менший проліт сонячних панелей зазвичай не перевищує 1,3 м, в запас надійності прийняте гранично допустиме значення прогину $[L/f] = 125$.

З формул (3) і (4) видно, що напружено-деформований стан плити відомої конструкції визначається трьома параметрами: розрахунковим значенням навантаження q_m чи q_e , які у свою чергу залежать від кута нахилу панелі α , меншим прольотом L та відношенням більшого розміру плити до меншого B/L . Для зменшення кількості впливаючих параметрів та забезпечення можливості табличного й графічного відображення результатів вирішено визначати гранично допустимі значення прольоту панелі за критеріями міцності L_m та жорсткості L_f . З формул (4) отримані залежності:

$$L_m = h \cdot \sqrt{\frac{R}{3 \cdot k_m q_m}}, \quad L_f = h \cdot \sqrt[3]{\frac{2 \cdot E}{k_f q_e [L/f]}}. \quad (6)$$

З формул (6) видно, що допустимий проліт панелей за критеріями міцності L_m та жорсткості L_f прямо пропорційний товщині скла h . Це дозволяє легко перерахувати допустимі прольоти при зміні товщини скла обшивок, або підібрати необхідну товщину скла при заданому прольоті сонячної панелі.

Розрахунки за наведеними формулами реалізовані у вигляді розрахункового бланку в середовищі Microsoft Excel. Він дозволяє для довільних вихідних даних виконати розрахунки та побудувати залежності, зображені на рисунках 1 і 2. Таким чином розв'язується завдання оцінювання несучої здатності сонячної панелі відомих розмірів, встановленої в заданій географічній точці під певним кутом до горизонту.

Результати розрахунків за формулами (6) для різних значень кута нахилу α та вказаних на графіках відношень розмірів сторін панелі B/L відображені на рисунках 2а та 2б. Немонотонний вигляд залежностей на рисунку 2б пояснюється проілюстрованою на рисунку 1 зміною розрахункової комбінації експлуатаційних значень навантажень. Розрахунки показали, що для кліматичних навантажень у м. Кропивницький в усіх випадках вирішальною є умова жорсткості.

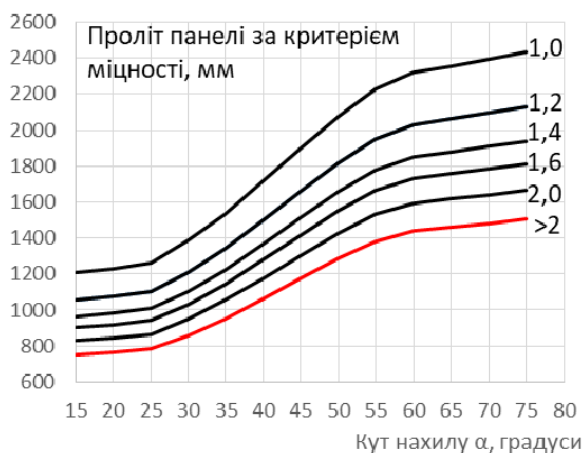


Рисунок 2а – Допустимі прольоти сонячних панелей за критерієм міцності при різних відношеннях розмірів сторін та кута нахилу до горизонту
Джерело: розроблено авторами

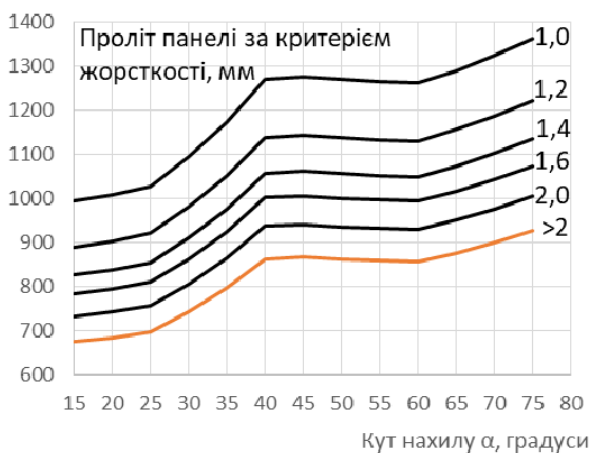


Рисунок 2б – Допустимі прольоти сонячних панелей за критерієм жорсткості при різних відношеннях розмірів сторін та кута нахилу до горизонту

З рисунків 2а та 2б видно, що допустимий проліт (менший розмір) сонячної панелі з обшивками із загартованого скла товщиною 3 мм може змінюватися від 0,68 м до 1,36 м. Він зростає при збільшенні кута нахилу та при наближенні відношення розмірів сторін B/L до одиниці. До кута нахилу 42° допустимий проліт істотно зростає унаслідок зменшення снігового навантаження. При більших кутах нахилу панелей вирішальним стає ожеледно-вітрове навантаження, яке мало залежить від кута нахилу панелі.

Аналіз розмірів панелей за даними [3, 4] показав, що відношення довжини більшої сторони до меншої в основному змінюється від 1,4 до 2,0. В цих межах допустимий проліт змінюється на 13...16%. Незначні зміни дозволяють з метою спрощення прийняти в запас надійності значення допустимого прольоту, що відповідають відношенню сторін $B/L = 2,0$. Гарантований запас надійності при усіх можливих відношеннях розмірів сторін панелей B/L можна отримати при використанні нижньої кривої з рисунків 2а та 2б, яка відповідає $B/L > 2$ і по суті отримана у результаті розрахунку панелі, як балки на двох опорах. Такий варіант розрахунку занижує допустимі прольоти сонячних панелей на 23...29% порівняно з розрахунком для $B/L = 1,4$.

Висновки.

1. Отримані робочі формули для обчислення навантажень, перевірки міцності та жорсткості, а також визначення допустимого за критеріями міцності та жорсткості прольоту сонячних панелей, які встановлюються на покрівлях малоповерхових будівель під різними кутами до горизонту.

2. Встановлено, що в умовах м. Кропивницький перевірку міцності завжди слід виконувати на комбінацію навантажень від власної ваги панелі, снігу та вітру. Перевірку жорсткості при невеликих кутах нахилу панелі слід здійснювати на цю ж комбінацію навантажень, а при кутах понад 42° вирішальним стає ожеледно-вітрове навантаження.

3. Допустимий проліт (менший розмір) сонячної панелі зростає при збільшенні кута нахилу до горизонту та при наближенні відношення розмірів сторін панелі до одиниці. Для панелей з обшивками із загартованого скла товщиною 3 мм проліт становить 0,68...1,36 м. В усіх розрахункових випадках в умовах м. Кропивницький вирішальною є умова жорсткості.

4. Реалізація обчислень у формі розрахункового бланку в середовищі Microsoft Excel дозволяє виконати аналогічні обчислення для інших вихідних даних.

5. Подальші дослідження орієнтуються на встановлення допустимих прольотів сонячних панелей типової конструкції в умовах кожної з областей України.

Список літератури

1. Сонячна панель. Матеріал з Вікіпедії – вільної енциклопедії. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Сонячна_панель (дата звернення: 07.09.2021)
2. Сонячна батарея - будова і принцип роботи. URL: <https://prel.prom.ua/ua/a315870-sonyachna-batareya-budova.html> (дата звернення: 07.09.2021)
3. ECO TECH UKRAINE. Солнечная энергетика, энергоэффективные технологии. Продажа, строительство, сервис. URL: <https://eco-tech.com.ua/g11422607-solnechnye-batarei-paneli> (дата звернення: 07.09.2021)
4. Solar-Tech. Альтернативні джерела енергії. Продаж, установка, обслуговування. URL: <https://solar-tech.com.ua/ua/solar-electricity/solar-panels/> (дата звернення: 11.09.2021)
5. ДБН В.1.2-2:2006. Система надійності та безпеки в будівництві. Навантаження і впливи. Київ: Мінбуд України, 2006. 59 с.
6. Таблицы для расчета пластин, шарнирно опертых по контуру. URL: <http://doctorlom.com/item374.html> (дата звернення: 11.09.2021)

7. Міцність скла. Несуча здатність. Розрахунок на міцність. Допустимі напруження при згин. URL: <https://okna.ua/ua/library/art-mitsnist-skla-nesucha-zdatnist> (дата звернення: 16.09.2021)
8. Характеристики стекла – общие технические характеристики. Стекольная Компания. URL: <https://90zavod.ru/xarakteristiki/xarakteristiki-stekla-obshhie-tekhnicheskie-xarakteristiki-sostav-prochnost-i-t-%E2%80%95stekolnaya-kompaniya.html#i-22> (дата звернення: 16.09.2021)
9. Куренкова А.Ю., Кузьменко А.В., Куренкова О.М. Формула стеклопакета для зданий повышенной этажности. *Инженерно-строительный журнал*. 2011. № 8. С. 63–68.
10. ДБН В.1.2-14 : 2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. К.: Мінрегіон України. 2018. 30 с. (Державні будівельні норми України)
11. ДСТУ Б В.1.2-3 : 2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. К.: Мінбуд України, 2006. 15 с. (Національний стандарт України).

References

1. Sonyachna panel'. Material z Vikipediyi — vil'noyi entsyklopediyi. [Solar panel. From Wikipedia, the free encyclopedia]. *uk.wikipedia.org*. Retrieved from https://uk.wikipedia.org/wiki/Сонячна_панель [in Ukrainian].
2. Sonyachna batareya - budova i pryntsyyp roboty. [Solar battery - structure and principle of operation]. *prel.prom.ua*. Retrieved from <https://prel.prom.ua/ua/a315870-sonyachna-batareya-budova.html> [in Ukrainian].
3. ECO TECH UKRAINE. Solnechnaya energetika, energoeffektivnyye tekhnologii. Prodazha, stroitel'stvo, servis. [ECO TECH UKRAINE. Solar energy, energy efficient technologies. Sale, construction, service]. *eco-tech.com.ua*. Retrieved from <https://eco-tech.com.ua/g11422607-solnechnye-batarei-paneli> [in Russian].
4. Solar-Tech. Al'ternatyvni dzhherela enerhiyi. Prodazh, ustanovka, obsluhovuvannya. [Solar-Tech. Alternative Energy Sources. Sale, installation, service]. *solar-tech.com.ua*. Retrieved from <https://solar-tech.com.ua/ua/solar-electricity/solar-panels/> [in Ukrainian].
5. DBN V.1.2-2:2006. Systema nadiynosti ta bezpeky v budivnytstvi. Navantazhennya i vplyvy. [DBN V.1.2-2: 2006. Reliability and safety system in construction. Loads and effects] (2006). Kyiv: Ministry of Construction of Ukraine [in Ukrainian].
6. Tablitsy dlya rascheta plastin, sharnirno opertykh po konturu. [Tables for calculating plates hinged along the contour]. *doctorlom.com*. Retrieved from <http://doctorlom.com/item374.html> [in Russian].
7. Mitsnist' skla. Nesucha zdattist'. Rozrakhunok na mitsnist'. Dopustymi napruzhennya pry z-hyn. [Strength of glass. Load-bearing capacity. Calculation of strength. Permissible bending stresses]. *okna.ua*. Retrieved from <https://okna.ua/ua/library/art-mitsnist-skla-nesucha-zdatnist> [in Ukrainian].
8. Kharakteristiki stekla – obshchiye tekhnicheskiye kharakteristiki. Stekol'naya Kompaniya. [Glass characteristics - general technical characteristics. Glass Company]. *90zavod.ru*. Retrieved from: <https://90zavod.ru/xarakteristiki/xarakteristiki-stekla-obshhie-tekhnicheskie-xarakteristiki-sostav-prochnost-i-t-%E2%80%95stekolnaya-kompaniya.html#i-22> [in Russian].
9. Kurenkova, A.Yu. (2011). Formula steklopaketa dlya zdaniy povyshennoy etazhnosti. [Formula of double-glazed windows for high-rise buildings]. *Formula steklopaketa dlja zdaniy povyshennoj jetazhnosti – Engineering and construction magazine*, 8, 63–68 [in Russian].
10. Systema zabezpechennya nadiynosti ta bezpeky budivel'nykh ob'yektiv. Zahal'ni pryntsyyp zabezpechennya nadiynosti ta konstruktyvnoyi bezpeky budivel' i sporud [Reliability and safety system for construction projects. General principles of ensuring the reliability and structural safety of buildings and structures.] (2018). *DBN V.1.2-14:2018*. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine [in Ukrainian].
11. Systema zabezpechennya nadiynosti ta bezpeky budivel'nykh ob'yektiv. Prohyny i peremishchennya. Vymohy proektuvannya [System for ensuring the reliability and safety of construction sites. Deflections and displacements. Design requirements]. (2006). *DSTU B V.1.2-3:2006*. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine [in Ukrainian].

Vladyslav Nastoyashchii, Prof., PhD tech. sci., **Viktor Pashynskiy**, Prof., DSc., **Mykola Pashynskiy**, PhD tech. sci., **Serhii Yakimenko**, Assoc. Prof., PhD phys.&math. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Method for Calculating the Bearing Capacity of Solar Panels as an Element of Ensuring the Energy Efficiency of Buildings

Extensive use of solar panels for providing low-rise buildings with electricity has led to the development of methods for assessing the load-bearing capacity of solar panels, taking into account the size of the panel, the angle of inclination to the horizon and climatic loads in a given geographical area.

The solar panels are calculated as plates hinged along the contour. Self-weight loads of the panel, snow, wind and ice loads are determined according to DBN B.1.2-2: 2006 "Loads and impacts" and are reduced to a component that is normal to the plane of the panel. Working formulas were obtained for determining the extreme and operational design values of loads, checking the strength and deflection of panels, as well as the maximum allowable spans according to the criteria of strength and structural rigidity. An example of calculation of solar panels placed at angles of inclination to the horizon from 15° to 75° on the roof of a building in Kropyvnytskyi were performed. Strength checks should be performed on combinations of panel self-weight, snow and maximum wind pressure. Deflection check at small angles of panels inclination is carried out taking into account the same combination of loads, and at big angles of inclination - taking into account only ice load. In all cases, the condition of rigidity is decisive. Permissible span L (smaller size) of a solar panel with 3 mm tempered glass sheathing in the conditions of Kropyvnytskyi varies from 0.68 m to 1.36 m. It increases as the angle of inclination increases and as the B/L ratio approaches to 1. The allowable span varies by 13...16% with length ratio of the larger side of solar panel to the smaller one in the range from 1.4 to 2.0. This allows to take the values of the allowable span, corresponding to the ratio of the parties $B/L=2.0$ in order to simplify the safety margin.

The obtained working formulas and their implementation in the form of a calculation sheet in Microsoft Excel allows to perform similar calculations for other source data. Further research focuses on the establishment of allowable spans of solar panels of typical design in the conditions of each of the regions of Ukraine.

energy efficiency of buildings, solar panels, bearing capacity

Одержано (Received) 28.09.2021

Прорецензовано (Reviewed) 22.10.2021

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

УДК 624.044:624.012

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.168-175](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.168-175)

В.А. Пашинський, проф., д-р. техн. наук, **А.А. Тихий**, доц., канд. техн. наук, **М.В. Пашинський**, канд. техн. наук, **С.О. Карпушин**, доц., канд. техн. наук, **В.В. Яцун**, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: a.a.tihiy@gmail.com*

Порівняння методів розрахунку плитних фундаментів з урахуванням результатів інженерно-геологічних вишукувань та геодезичних спостережень за процесом просідання

На прикладі фундаменту під силос зернохосвища у вигляді круглої залізобетонної плити діаметром 20,4 м виконане порівняння трьох методів розрахунку осідання суцільних плитних фундаментів. Розрахунки за моделлю плити на пружній основі та за моделлю об'ємних скінченних елементів дали середні значення осідання 2,15 см та 2,4 см, близькі до фактичної величини 1,75 см, отриманої за результатами натурних геодезичних спостережень, що велися з початку будівництва об'єкту. Регламентований чинними нормами проектування розрахунок за методом пошарового підсумовування дав різко завищений результат 13,7 см.

плитні фундаменти, осідання, методи розрахунку

Постановка проблеми. Сучасні світові тенденції до збільшення висоти будівель і споруд у комплексі з освоєнням територій з несприятливими інженерно-геологічними умовами обумовлюють доцільність використання фундаментів у вигляді суцільних залізобетонних плит [1, 2]. Такі фундаменти, при порівняно невеликій товщині та глибині закладення, простоті технологічного процесу влаштування, мають переваги щодо передачі значних навантажень навіть на слабкі ґрунти, а також забезпечують дотримання конструктивних вимог щодо незмінного взаємного положення елементів будівель високого класу відповідальності [3].

Особливої актуальності набувають питання проектування фундаментів для циліндричних споруд агропромислового комплексу, зокрема силосів зерносховищ [4, 5]. Огороджувальна металоконструкція силосу зерносховища за ваговими показниками співрозмірна з вагою зерна [6], тому залізобетонна плита фундаменту, що є по суті дном силосу, представляє собою рівномірно завантажений диск. Класично фундамент у вигляді суцільної залізобетонної плити розглядається як круга в плані плита на пружній основі. Другим розрахунковим положенням для даного плитного фундаменту є порожній силос, при цьому плита фундаменту завантажена лише по периметру. Робота плити фундаменту може нагадувати низькочастотне реверсивне деформування мембрани, що стиснена по периметру. Це призводить до необхідності виконання досить складних розрахунків взаємного реверсивного напружено-деформованого стану основи і самого плитного фундаменту. Процес проектування істотно ускладнюється при неоднорідних та неузгоджених ґрунтових нашаруваннях основи в межах будівельного майданчика, що виявлені в результаті інженерно-геологічних вишукувань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно з вимогами чинних норм проектування [7], основи та фундаменти розраховуються за методом граничних станів. Головна мета розрахунку основ зводиться до виключення надто великих, у тому числі нерівномірних, осідань фундаментів, які можуть призвести до деформування, пошкодження або руйнування будівлі чи споруди, яка обпирається на фундамент. Гранично допустимі значення осідань різних фундаментів наведені в ДБН [8]. Класична методика визначення осідання фундаментів полягає у визначенні вертикальних деформацій достатньо тонких шарів ґрунту, розміщених на різній глибині. Осідання фундаменту дорівнює сумі деформацій усіх шарів від підшови фундаменту до глибини затухання деформацій.

Відомо [2], що ґрунти в основах багатьох споруд, особливо в складних інженерно-геологічних умовах та при великих навантаженнях, досить часто працюють за межею лінійного деформування. Це викликає необхідність розрахунку системи "будівля-фундамент-основа" на основі положень нелінійної механіки ґрунтів.

Необхідність застосування нелінійних підходів при вирішенні складних геотехнічних задач обґрунтована в статтях [4, 5], де акцентується увага на необхідності урахування переміщень основи за рахунок пластичних деформацій ґрунту, особливо при аналізі зсувних процесів на схилах. Комплексне застосування нелінійних методів разом з методом скінченних елементів дозволяє підвищити ефективність проектних рішень.

В роботі [2] показано, що максимальне наближення математичної моделі до реальних умов і найкраще поєднання надійності та економічності можна досягнути за рахунок використання нелінійних методів розрахунків, що базуються на рішенні пружно-пластичних задач. Одна і та ж розрахункова модель ґрунту дозволяє розглянути граничні стани двох груп та визначити напружено-деформований стан кожної точки основи з урахуванням заданих фізичних умов, а також морфології,

геології, гідрогеології, фільтраційного тиску, динамічних навантажень та інших факторів. Зв'язок між пластичними деформаціями та напруженнями в основі відображається диференційними рівняннями, вибір яких визначається видом пружно-пластичної моделі.

В роботі [4] показано, що визначення осідань на основі моделей лінійно-деформованого середовища призводить до завищення реальних осідань у 2,3...2,5 рази і тим самим обумовлює високі запаси несучої здатності основи. Нелінійні рішення пропонується реалізувати чисельними методами, зокрема методом скінченних елементів. Можливість таких рішень реалізована в програмному комплексі Structure construction automatic design (SCAD)++[9].

Більш простими моделями, які дозволяють певною мірою врахувати нелінійність роботи ґрунтової основи є моделі плит на пружній основі зі змінними характеристиками [10]. Характеристики основи задаються через коефіцієнт постелі, який характеризує роботу ґрунту під навантаженням та визначається окремо для кожної зони основи.

Особливо актуальним є уточнення розрахунків основ під суцільні плитні фундаменти значних розмірів, у межах яких необхідно адекватно урахувати як природну мінливість характеристик основи, так і деформативність самого фундаменту. Досвід проектування [5] показує, що існуючі методи розрахунків плитних фундаментів можуть давати різні результати, значною мірою відмінні від експериментальних даних.

Постановка завдання. З'ясувати закономірності і особливості спільної роботи плитного фундаменту і ґрунтової основи, дослідити вплив анізотропії ґрунтів на напружено-деформований стан основ плитних фундаментів, з'ясувати особливості визначення розрахункового опору основ плитних фундаментів, розробити метод визначення осідань основ плитних фундаментів за даними короткострокових геодезичних вимірів.

Об'єкт дослідження. Порівняння методів розрахунку здійснене на прикладі фундаменту під силос зернохосвища об'ємом 8841 м³. Фундамент виконаний у вигляді круглої залізобетонної плити діаметром 20,4 м і товщиною 0,8 м, заглибленої в ґрунт на 1,1 м. Для установки сталевих конструкцій силосу вище поверхні ґрунту влаштована друга плита товщиною 600 мм з конструктивним армуванням, яка одночасно служить днищем силосу. Простір між плитами заповнений утрамбованим фракційним щебенем. Схема вертикального перерізу фундаменту з геологічним розрізом ґрунтової основи зображена на рисунку 1.

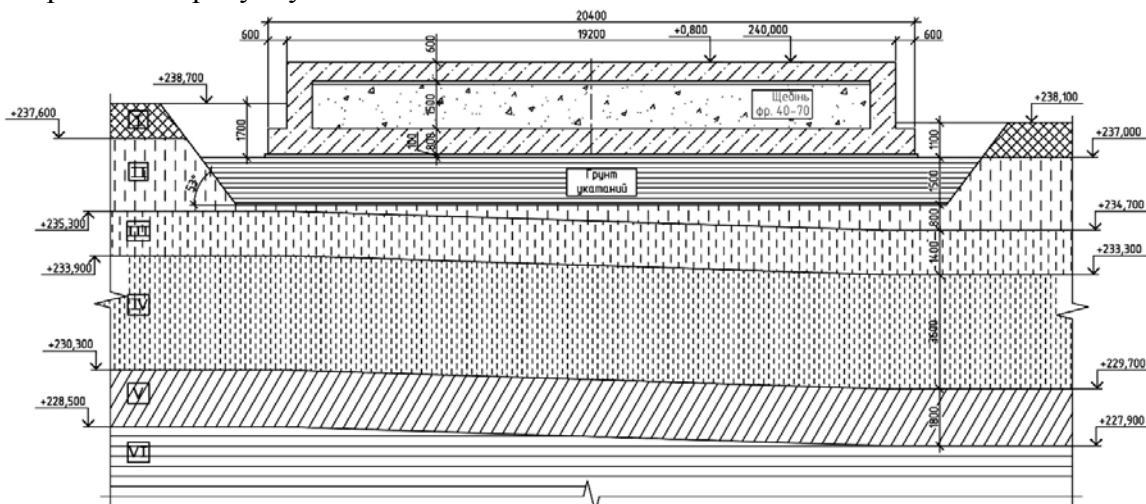


Рисунок 1 – Схема фундаментної плити та основи під силос ємністю 8,841 тис. м³
Джерело: робочі креслення зернохосвища.

Методика і результати інженерно-геологічних вишукувань. Зображений на рисунку 1 геологічний розріз побудовано за результатами інженерно-геологічних вишукувань, виконаних згідно з вимогами ДБН [11]. У процесі вишукувань в зоні розміщення зерносховища були пробурені свердловини глибиною близько 10 м, з яких відбиралися зразки ґрунтів основи. Отримані за результатами випробувань технічні характеристики ґрунтів наведені в таблиці 1, а їх позначення та товщини шарів вказані на рисунку 1. Наявні ґрунти можуть бути використані в якості природної основи, а наведені технічні характеристики забезпечують можливість виконання розрахунків осідання фундаменту відомими методами, які обрані для виконаного нижче порівняльного аналізу.

Таблиця 1 – Технічні характеристики ґрунтів основи силосу

Найменування	Питома вага, тс/м ³	Модуль деформації, тс/м ²	Модуль пружності, тс/м ²	Коефіцієнт Пуассона	Коефіцієнт переущільнення	Тиск переущільн., тс/м ²
I – насипний шар	2	2500	20833,333	0,35	1	5
II – суглинок жовто-бурий, лесоподібний	1,68	820	6833,333	0,35	1	5
III - суглинок палево-жовтий, лесоподібний	1,72	870	7250	0,35	1	5
IV - суглинок бурий, лесоподібний	1,8	1000	8333,333	0,35	1	5
IV(в) - суглинок бурий, лесоподібний	1,837	570	4750	0,35	1	5
V - суглинок жовтий, водонасичений	1,91	570	4750	0,35	1	5
VI – глина бура, непросідна	2	2200	18333,333	0,42	1	5

Джерело: розроблено авторами

Розрахунок за моделлю Вінклера. Ця модель представляє собою плиту на пружній основі з коефіцієнтом постелі. Коефіцієнт стиснення C зв'язує інтенсивність вертикального відпору ґрунту з його осіданням. На підставі геологічних даних з таблиці 1 встановлено, що для різних зон підшви фундаменту коефіцієнт постелі змінюється в таких межах: $C = 0,07 \dots 1215 \text{ т/м}^3$.

Осідання різних зон підшви фундаменту визначені в модулі «Кросс» програмного комплексу SCAD Office. При сумарному навантаженні на фундамент 2741 тс осідання різних зон фундаменту змінюються від 0,37 см до 4,75 см при середньому значенні 2,15 см. Товщина деформованого шару основи становить 12,24 м.

Розподіли коефіцієнта постелі C та величин осідання по підшві фундаменту відображені на рисунках 2 і 3, де більші значення відображаються більш темним кольором. З рисунків видно, що в напрямку від центру до краю фундаменту коефіцієнти постелі зростають, а осідання зменшуються. Істотне зменшення коефіцієнтів постелі спостерігається також у зоні зовнішнього контуру фундаменту.

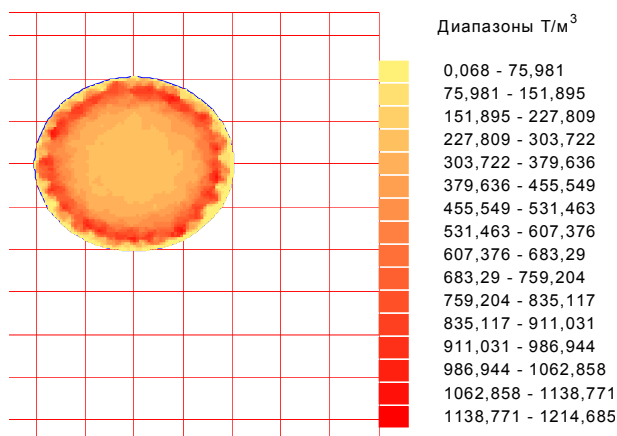


Рисунок 2 – Коефіцієнт постелі C
Джерело: розроблено авторами

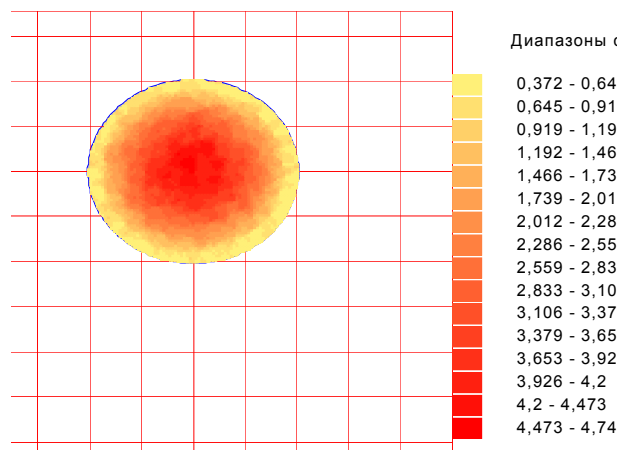
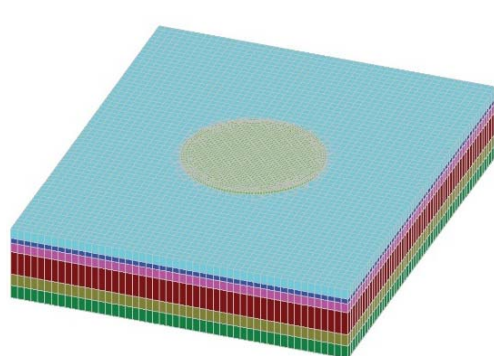


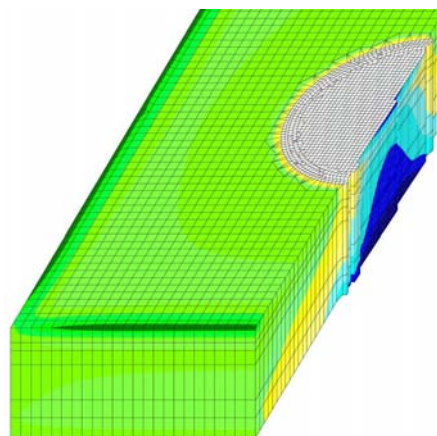
Рисунок 3 – Осідання фундаменту
Джерело: розроблено авторами

Розрахунок за моделлю об'ємних скінченних елементів. Ґрунтова основа представлена у вигляді лінійно-деформованого шару скінченної товщини. У схему введені 6 верхніх шарів, зображених на рисунку 1, нижче яких ґрунт вважається нестисливим. Розміри моделі в плані обмежені шляхом включення до розрахункової схеми масиву ґрунту, віддаленого не більше ніж на півтори товщини деформованого шару основи. Для фундаменту, зображеного на рисунку 1, розглянуто ґрунтовий масив у формі паралелепіпеда з розмірами в плані 40.4×40.4 м. Розрахункова схема ґрунтової основи зображена на рисунку 4, а необхідні для розрахунків характеристики ґрунтів наведені в таблиці 1.



Плита		$h=0.8$
ґрункатаний		$E = 20833 \text{ T/m}^2$
ПґЕ-2		$E = 6833 \text{ T/m}^2$
ПґЕ-3		$E = 7250 \text{ T/m}^2$
ПґЕ-4		$E = 8333 \text{ T/m}^2$
ПґЕ-5		$E = 4750 \text{ T/m}^2$
ПґЕ-6		$E = 18333 \text{ T/m}^2$

Рисунок 4 – Схема основи для розрахунку за методом скінченних елементів
Джерело: розроблено авторами



-45,62	-41,29	-15,32	-10,99
-41,29	-36,96	-10,99	-6,66
-36,96	-32,63	-6,66	-2,33
-32,63	-28,3	-2,33	2,0
-28,3	-23,97	2,0	6,33
-23,97	-19,65	6,33	10,66
-19,65	-15,32	10,66	14,99

Рисунок 5 – Деформована схема ґрунтової основи під плитний фундамент
Джерело: розроблено авторами

Модель (рис. 4) сформована в середовищі програмного комплексу SCAD Office на основі об'ємних скінченних елементів кубічної форми. Статичний розрахунок розробленої моделі виконаний в лінійній постановці. У результаті розрахунку встановлені переміщення окремих скінченних елементів та загальна деформована схема ґрунтової основи, наведена на рисунку 5. Осідання фундаменту в різних зонах змінюються від 0,23 см до 4,56 см при середньому значенні 2,4 см.

Окрім того, за результатами розрахунку отримані рекомендації щодо армування круглої фундаментної плити металевим силосу, представлені у формі ізополів необхідної площі перерізу робочої арматури на метр ширини плити.

Розрахунок за методом пошарового підсумовування. Ґрунтова основа розглядається як лінійно-деформований напівпростір. Технічні характеристики усіх шарів ґрунту прийняті згідно з таблицею 1. Обчислення осідання фундаменту згідно з вказівками ДБН В.2.1-10:2018 [8] реалізоване в середовищі Microsoft Excel за відомою методикою [4].

Для виконання розрахунку товща ґрунтової основи до глибини 12,1 м розділена на 26 шарів товщиною 40 см та 50 см. У результаті розрахунку отримане осідання фундаментної плити рівне 13,7 см, яке можна вважати максимальним значенням по усій підшві фундаменту.

Натурні геодезичні спостереження за осіданням. Для аналізу використані дані, отримані інститутом «Укрґенпроект», м. Київ по спостереженню за осіданнями плитних фундаментів декількох силосів для зберігання зерна в м. Кропивницький: силос для зберігання зерна місткістю 8841 м³ та силос для зберігання зерна місткістю 6390 м³. Спостереження за осіданнями [12] велися з початку будівництва об'єктів і до їх стабілізації. Репери для нівелювання були розташовані в місцях, що забезпечують незмінність позначки репера протягом всього терміну спостережень. Фактичне середнє осідання основи споруди за період спостереження склало 17,5 мм (від 11 до 24 мм). Аналіз даних спостережень показує, що осідання фундаментів силосу практично стабілізувалися, нерівномірність осідань не перевищує допустимих величин.

Висновки. Порівняння результатів розрахунку осідань фундаменту показало, що врахування геологічних особливостей основи є визначальним фактором при аналізі НДС фундаменту. Цей фактор істотно впливає на переміщення вузлів фундаменту і напруження в конструктивних елементах.

Порівняння результатів осідання фундаменту показали наступні значення: модель на пружній основі з визначеним коефіцієнтом постелі – 4,75 см; модель на пружній основі з використанням об'ємних скінченних елементів – 4,56 см; осідання за деформаціями основ згідно ДБН В.2.1-10:2018 – 13,7 см; реальні геодезичні спостереження – 2,4 см.

Аналізуючи способи врахування основи, можна зробити висновок, що модель з використанням коефіцієнтів постелі відрізняється простотою реалізації, в той час як модель конструкції з основою з об'ємних скінченних елементів більш трудомістка, але дозволяє за допомогою деформованих схем з більшою точністю спрогнозувати поведінку конструкції в реальних геологічних умовах із заданими навантаженнями. Метод пошарового підсумовування, регламентований ДБН В.2.1-10:2018, дає різко завищені значення просідань, порівняно з першими двома методами. Результати цього розрахунку істотно перевищують реальні значення просідань, визначених натурними геодезичними спостереженнями, і тим самим створюють надмірні запаси надійності при проектуванні фундаментів.

Список літератури

1. Будівельні конструкції: навчальний посібник / Ю.Л. Винников, С.Ф. Пічугін, О.О. Довженко, А.О. Дмитренко. Полтава: ТОВ «АСМІ», 2015. 400 с.
2. Механіка ґрунтів. Основи та фундаменти : підручник / В.Б. Швець та ін.; Дніпропетровськ: «Пороги», 2014. 232 с.
3. ДСТУ 8855:2019. Будівлі та споруди. Визначення класу наслідків (відповідальності). Київ ДП «УкрНДНЦ», 2019. 13 с. (Національний стандарт України).
4. Іваник І.Г., Пожар Р.С., Іваник Я.І. Математична модель розрахунку круглого в плані залізобетонного силосу, посиленого композитними стрічками. *Вісник Одеської Державної академії будівництва та архітектури*. 2013. Вип. 49. С. 111–119.
5. Розрахунок круглого в плані залізобетонного фундаменту, посиленого композитними матеріалами / І.Г. Іваник та ін. Електронний науковий архів Науково-технічної бібліотеки Національного університету «Львівська політехніка». Львів: Львівська політехніка, *Теорія і практика будівництва*. 2013. №755. С. 144–151.
6. Масюк Г.Х. Залізобетонні конструкції інженерних споруд промислових підприємств: Навчальний посібник. Рівне: НУВГП, 2011. 212 с.
7. ДСТУ-Н Б В.1.1–27:2010: Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. Київ, Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010. 123 с. (Національний стандарт України).
8. ДБН В.2.1-10:2018: Основи і фундаменти будівель та споруд. [Чинний від 01-01-2019]. К.: Міністерство будівництва України, 2018. 36 с.
9. SCAD help. Онлайн-курси від розробників. URL: <https://scadhelp.com/courses> (дата звернення: 27.09.2021).
10. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. К.: Сталь, 2002. 600 с.
11. ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню та переробці зерна. К.: Мінрегіонбуд України, 2009. 39 с.
12. Статистичний аналіз результатів геодезичних зйомок колій мостових кранів у виробничих будівлях / В. А. Пашинський, А. А. Тихий, М. В. Пашинський, С. Ф. Пічугін. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. Вип. 81. С. 87–96.

References

1. Vynnykov, YU.L., Pichugin, S.F., Dovzhenko, O.O. & Dmytrenko, A.O. (2015). *Budivsel'ni konstruktsiyi: navchal'nyy posibnyk [Building constructions: textbook]*. Poltava: TOV «ASMI» [in Ukrainian].
2. Shvets', V.B., Boyko, I.P., Vynnykov, YU.L. & Zotsenko, M.L. (2014). *Mekhanika gruntiv. Osnovy ta fundamenti [Soil mechanics. Bases and foundations]*. Dnipropetrovsk: «Porohy» [in Ukrainian].
3. *Budivli ta sporudy. Vyznachennya klasu naslidkiv (vidpovidal'nosti) [Buildings and structures. Determining the class of consequences (responsibility)]*. (2019). DSTU 8855:2019. Kyiv, DP «UkrNDNTS» [in Ukrainian].
4. Ivanyk, I.H., Pozhar, R.S. & Ivanyk, Ya.I. (2013). *Matematychna model' rozrakhunku kruhloho v plani zalizobetonnoho sylosu, posylenoho kompozytnymy strichkami [Mathematical model of round calculation in terms of reinforced concrete silo reinforced with composite tapes]*. Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. Odessa, ODABA, 49, part. 2, 111–119 [in Ukrainian].
5. Ivanyk, I.H., Martynovych, B.T., Pozhar, R.S., Ivanyk, Yu.I. & Ivanyk, Ya.I. (2013). *Rozrakhunok kruhloho v plani zalizobetonnoho fundamentu, posylenoho kompozytnymy materialamy [Calculation of round in terms of reinforced concrete foundation reinforced with composite materials]*. Electronic scientific archive of the Scientific and Technical Library of the National University "Lviv Polytechnic". Lviv, Lviv Polytechnic. *Teoriia i praktyka budivnytstva –Theory and practice of construction*, 755, 144–151. [in Ukrainian].
6. Masyuk, H.Kh. (2011). *Zalizobetonni konstruktsiyi inzhenernykh sporud promyslovykh pidpryyemstv: Navchal'nyy posibnyk [Reinforced concrete structures of engineering structures of industrial enterprises: Textbook]*. Rivne: NUVGP [in Ukrainian].
7. *Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiynykh vplyviv, vid pozhezh. Budivsel'na klimatohiya. [Protection against dangerous geological processes, harmful operational influences, fire. Construction climatology]*. (2010). DSTU-N B V.1.1–27:2010. Kyiv, Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine, 123 p. [in Ukrainian].

8. *Osnovy i fundamenti budivel' ta sporud [Foundations of buildings and structures]*. (2018). DBN V.2.1-10:2018. Kyiv: Ministry of Construction of Ukraine [in Ukrainian].
9. SCAD help. Online courses from developers. *scadhelp.com*. Retrieved from: <https://scadhelp.com/courses> [in Russian].
10. Perel'muter, A.V. & Slivker, V.I. (2002). *Raschetnyye modeli sooruzheniy i vozmozhnost' ikh analiza [Design models of structures and the possibility of their analysis]*. Kiev : Steel [in Russian].
11. Pidpryyemstva, budivli i sporudy po zberihannyu ta pererobtsi zerna [Enterprises, buildings and structures for storage and processing of grain]. (2009). *DBN V.2.2-8-98*. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine [in Ukrainian].
12. Pashynskiy, V.A., Tykhyi, A.A., Pashynskiy M.V. & Pichugin S.F. (2020). Statystychnyy analiz rezul'tativ heodezychnykh z'yomok kolyi mostovykh kraniv u vyrobnychkykh budivlyakh [Statistical analysis of the results of geodetic surveys of bridge cranes in industrial buildings]. *Visnyk Odes'koi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury – Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Vol. 81*, 87-96 [in Ukrainian].

Victor Pashynskiy, Prof., DSc., **Andrii Tykhyi**, Assoc. Prof., **Mykola Pashynskiy**, PhD tech. sci., **Serhii Karpushyn**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Yatsun**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Comparison of Methods for Calculating Slab Foundations, Taking Into Account the Results of Geotechnical Surveys and Geodetic Observations of the Subsidence Process

Increasing the height of buildings and structures in combination with the development of areas with unfavorable geotechnical conditions cause the use of foundations in the form of solid reinforced concrete slabs. In complex geotechnical conditions and under high loads, the soils can work beyond linear deformation. This necessitates the calculation of the system "building-foundation-soil" based on the assumptions of nonlinear soil mechanics. The issue of designing foundations for cylindrical structures of the agro-industrial complex, in particular granaries, is especially relevant. The task of this study is a comparative analysis of different methods for calculating the subsidence of slab foundations to select a rational model of deformation of the soil.

The comparison of calculation methods is carried out on the example of the foundation under the granary with a volume of 8841 m³. The foundation is made in the form of a round reinforced concrete slab with a diameter of 20.4 m. The characteristics of the soil are established by the results of geotechnical surveys. The calculation according to the Winkler model (elastic base plate with one coefficient of subgrade reaction) was performed in the "Cross" module of the SCAD Office software package. With a total load on the foundation of 2741 tf, its average subsidence is 2.15 cm. The calculation according to the model of three-dimensional finite elements of cubic shape was performed in the environment of the SCAD Office software package. The average subsidence of the foundation is 2.4 cm. The calculation by the method of layer-by-layer summation according to the instructions of DBN B.2.1-10: 2018 gave the subsidence of the foundation slab equal to 13.7 cm. The actual average subsidence of the foundation during the observation period in different areas of the foundation was 1.1... 2.4 cm and averaged 1.75 cm.

The comparison of the analyzed methods for determining the subsidence of the foundation indicates the closeness of the results of calculations on the model of the slab on an elastic basis and the model of three-dimensional finite elements to the actual value of subsidence and the greatly higher result of the calculation by layer summation. The use of the latter method leads to excessive reliability in the design of foundations.

slab foundations, subsidence, calculation methods

Одержано (Received) 11.10.2021

Прорецензовано (Reviewed) 21.11.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

В.А. Пашинський, проф., д-р техн. наук, **М.В. Пашинський**, канд. техн. наук,
В.В. Дарієнко, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: pva.kntu@gmail.com*

Метрологічне забезпечення контролю технічних характеристик будівельних матеріалів і виробів

На основі теорії похибок та методу лінеаризації функцій випадкових величин отримані робочі формули для оцінювання імовірних похибок експериментального визначення середньої густини, вологості, водопоглинання та міцності при стиску будівельних матеріалів на зразках правильної геометричної форми. Отримані формули дозволяють обґрунтовано вибрати засоби вимірювань з урахуванням необхідної точності визначення технічних характеристик.

будівельні матеріали, технічні характеристики, випробування, імовірні похибки

Постановка проблеми. Основні технічні характеристики різноманітних будівельних матеріалів і виробів (середня густина, водопоглинання, міцність при стиску) визначаються експериментальним шляхом. Контрольні випробування виконують за стандартними методиками, які регламентують форму, розміри та кількість зразків, необхідні засоби вимірювань, порядок проведення випробувань та опрацювання результатів. При виконанні наукових досліджень та в деяких інших випадках виникає необхідність випробувань зразків нестандартних розмірів. Така необхідність може обумовлюватися неможливістю отримання зразків стандартних розмірів або проведенням масових випробувань десятків чи сотень зразків з метою імовірнісного подання результатів. У таких випадках постає проблема вибору засобів вимірювання вхідних параметрів, точність яких забезпечить оцінювання результуючих технічних характеристик з допустимими похибками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи визначення вказаних вище технічних характеристик різних матеріалів встановлені відповідними стандартами, які з урахуванням особливостей матеріалів регламентують необхідну форму, розміри та порядок підготовки зразків, точність вимірювань розмірів, маси та інших вхідних параметрів, порядок проведення випробувань та обробки результатів. Характерними прикладами є Державні стандарти [1, 2, 3], які відображають сутність методів визначення середньої густини, вологості, водопоглинання та міцності при стиску будівельних розчинів, бетонів та інших матеріалів.

Прикладом випробувань зразків нестандартних розмірів можуть служити наші роботи [4, 5], у яких за результатами випробувань понад 400 зразків будівельної кераміки у формі куба з ребром 2 см отримані закони розподілу середньої густини, водопоглинання та міцності при стиску, а також встановлена залежність показника морозостійкості від ступеню насичення пор водою. Отримані результати дозволили в роботі [6] спрогнозувати довговічність цегляних стін за критерієм втрати морозостійкості поверхневого шару в реальних кліматичних умовах України.

Технічні характеристики будівельних матеріалів, визначені методами [1, 2, 3], є результатами непрямих вимірювань, точність яких залежить від точності визначення

безпосередньо виміряних вхідних параметрів. Загальна методика оцінювання невизначеності результатів непрямих вимірювань досить детально викладена в нормативних документах [7, 8], посібнику [9] та в інших джерелах. Методика базується на оцінюванні статистичних характеристик випадкової величини результату непрямого вимірювання через статистичні характеристики випадкових величин вхідних параметрів. В типовому випадку нелінійної функції вимірювання ця операція виконується викладеним в [9] методом лінеаризації функцій випадкових величин.

Показана в [4, 5] необхідність випробувань зразків будівельних матеріалів нестандартних розмірів обумовлює потребу в отриманні конкретних робочих формул для оцінювання імовірних похибок результатів експериментального визначення міцності при стиску, густини, вологості та водопоглинання будівельних матеріалів на зразках правильної геометричної форми.

Постановка завдання. Мета даної роботи полягає в отриманні робочих формул для оцінювання імовірних відносних похибок визначення технічних характеристик будівельних матеріалів при випробуваннях зразків правильної геометричної форми.

Методика оцінювання невизначеності та імовірних похибок. Розглядаються встановлені в [1, 2, 3] та в інших стандартах способи визначення міцності при стиску, середньої густини, вологості та водопоглинання на зразках будівельних матеріалів правильної геометричної форми. В усіх випадках вказані характеристики є результатами непрямих вимірювань, які обчислюються через вхідні параметри: розміри зразків, масу зразків, руйнівне зусилля при випробуваннях на стиск. Як вхідні параметри, так і результуючі технічні характеристики є випадковими величинами, ступінь невизначеності яких виражається стандартами розподілів або імовірними відносними похибками, що відповідають заданій забезпеченості результату. Оцінювання невизначеності результатів непрямих вимірювань технічних характеристик будівельних матеріалів базується на загальній методиці [7, 8] та відомому методі лінеаризації функцій випадкових величин [9].

За наявності вибірок достатнього обсягу стандартні невизначеності вхідних параметрів, які безпосередньо вимірюються під час випробувань, можна встановити шляхом статистичної обробки за методикою [6]. Враховуючи незначну кількість випробувань зразків однієї серії, яка вимагається стандартами [1, 2] та іншими, більш реальним способом є використання ціни поділки засобу вимірювання (лінійки, штангенциркуля, терезів, випробувальної машини тощо). Виходячи з рівномірного розподілу [9] результату вимірювання в межах ціни поділки засобу вимірювання D_k , стандартна невизначеність результату безпосереднього вимірювання k -того вхідного параметра дорівнює:

$$S_k = D_k / \sqrt{12} \approx 0,3 \cdot D_k. \quad (1)$$

Рівняння випробування, за яким обчислюють необхідну технічну характеристику Y як результат непрямого вимірювання через L виміряних вхідних параметрів X_k , має загальний вигляд

$$Y = \varphi(X_1 \dots X_k \dots X_L), \quad (2)$$

який конкретизується відповідно до стандартного методу визначення кожної технічної характеристики. Як правило, рівняння (2) є нелінійним відносно вхідних параметрів X_k .

Шукане значення технічної характеристики Y є функцією випадкових величин X_k і також представляє собою випадкову величину. Математичне сподівання результуючої випадкової величини Y визначається шляхом підстановки до конкретного виразу

рівняння випробувань (2) безпосередньо вимірюваних значень вхідних параметрів X_k . Стандарт (стандартна невизначеність) результату перетворення (2) можна визначити шляхом лінеаризації функції (2) за методикою [9]. Для цього необхідно знайти частинні похідні конкретизованого виразу (2) по кожному з вхідних параметрів X_k і підставити їх до загальної формули, наведеної в [7, 8, 9]

$$S_Y = \sqrt{\sum_{k=1}^L \left(\frac{\partial \varphi}{\partial X_k} \right)^2 S_k^2} \quad (3)$$

та виконати необхідні алгебраїчні перетворення і спрощення. Результатом буде робоча формула для обчислення стандартної невизначеності S_Y технічної характеристики матеріалу, визначеної стандартним методом непрямого вимірювання з урахуванням випадкових похибок вимірювань вхідних параметрів.

Імовірна відносна похибка результату вимірювання (у відсотках) визначається, виходячи із закону нормального розподілу [9] шуканої технічної характеристики:

$$\Delta_Y = 100 \cdot t_\beta \cdot S_Y / M_Y. \quad (4)$$

де t_β – аргумент функції нормального розподілу, що відповідає забезпеченості β ;

M_Y – середнє або фактично отримане значення дослідженого параметра;

S_Y – стандартна невизначеність результату непрямого вимірювання за (3).

Значення t_β встановлюється для двосторонньої забезпеченості. Зокрема, при $t_\beta = 1,64$ отримуємо забезпеченість результату $\beta = 0,9$, при $t_\beta = 1,96$ – $\beta = 0,95$, а при $t_\beta = 2,58$ – $\beta = 0,99$. Це означає, що відносна похибка результату визначення технічної характеристики не перевищує значення (4) для 90%, 95% чи 99% випадків.

Робочі формули для оцінювання імовірних похибок результатів непрямих вимірювань технічних характеристик отримані за викладеною методикою. Нижче наведені рівняння непрямих вимірювань, які представляють собою наведені в [1, 2, 3] та інших стандартах формули для визначення технічних характеристик матеріалів за результатами випробувань, а також формули для обчислення імовірних відносних похибок результату непрямого вимірювання цих характеристик на базі виразів (3) і (4).

Наведені нижче формули (5)...(11) припускають, що усі розміри зразка вимірюються з однаковою точністю, тобто $D_a = D_b = D_c = D_d$. У формулах (5)...(11) використані такі позначення:

a, b, c, d – середні чи одиничні розміри зразка, виміряні з однаковою точністю;

m_c і m_n – маси сухого і вологого (насиченого водою) зразка;

D_F, D_m і D_a – ціни поділок засобів вимірювання зусилля, маси та розмірів зразка.

F – руйнівне зусилля при випробуванні на стиск;

Водопоглинання та вологість за масою, а також імовірна відносна похибка їх визначення оцінюються за формулами:

$$W = \frac{m_n - m_c}{m_c} \cdot 100\%; \quad \Delta_W = \frac{3000 \cdot t_\beta \cdot D_m}{W \cdot m_c^2} \cdot \sqrt{m_c^2 + m_n^2}. \quad (5)$$

Середня густина зразків у формі паралелепіпеда розмірами $a \times b \times c$:

$$\rho = \frac{m}{a \cdot b \cdot c}; \quad \Delta_\rho = \frac{30 \cdot t_\beta}{\rho \cdot a^2 \cdot b^2 \cdot c^2} \cdot \sqrt{a^2 \cdot b^2 \cdot c^2 \cdot D_m^2 + (a^2 \cdot b^2 + a^2 \cdot c^2 + b^2 \cdot c^2) \cdot m^2 \cdot D_a^2}. \quad (6)$$

Середня густина зразків кубічної форми з ребром a :

$$\rho = \frac{m}{a^3}; \quad \Delta_{\rho} = \frac{30 \cdot t_{\beta}}{\rho \cdot a^4} \cdot \sqrt{a^2 \cdot D_m^2 + 3 \cdot m^2 \cdot D_a^2}. \quad (7)$$

Середня густина циліндричних зразків діаметром d та висотою c :

$$\rho = \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot c \cdot d^2} \approx \frac{1,27 \cdot m}{c \cdot d^2}; \quad \Delta_{\rho} = \frac{38,2 \cdot t_{\beta}}{\rho \cdot c^2 \cdot d^2} \cdot \sqrt{c^2 \cdot d^2 \cdot D_m^2 + (d^2 + c^2) \cdot m^2 \cdot D_c^2}. \quad (8)$$

Межа міцності при стиску призматичних зразків з прямокутним перерізом розмірами $a \times b$:

$$R = \frac{F}{a \cdot b}; \quad \Delta_R = \frac{30 \cdot t_{\beta}}{R \cdot a^2 \cdot b^2} \cdot \sqrt{a^2 \cdot b^2 \cdot D_F^2 + (a^2 + b^2) \cdot F^2 \cdot D_a^2}. \quad (9)$$

Межа міцності при стиску зразків квадратного перерізу зі стороною a :

$$R = \frac{F}{a^2}; \quad \Delta_R = \frac{30 \cdot t_{\beta}}{R \cdot a^3} \cdot \sqrt{a^2 \cdot D_F^2 + 2 \cdot F^2 \cdot D_a^2}. \quad (10)$$

Межа міцності при стиску циліндричних зразків діаметром d та висотою c :

$$R = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2} \approx \frac{1,27 \cdot F}{d^2}; \quad \Delta_R = \frac{38,2 \cdot t_{\beta}}{R \cdot d^3} \cdot \sqrt{d^2 \cdot D_F^2 + F^2 \cdot D_a^2}. \quad (11)$$

Розрахунки за формулами (5)...(11) з урахуванням фактичних значень вхідних параметрів та можливої точності їх вимірювання дозволяють оцінити відносні похибки непрямих вимірювань основних технічних характеристик будівельних матеріалів і виробів та здійснити обґрунтований вибір засобів вимірювання для забезпечення необхідної точності результатів.

Вибір засобів вимірювання для експериментального визначення технічних характеристик будівельних матеріалів здійснюється на основі аналізу імовірних похибок непрямого визначення цих характеристик. У якості прикладу оцінимо точність визначення середньої густини цементно-піщаного будівельного розчину з номінальним значенням $\rho \approx 1800 \text{ кг/м}^3 = 0,0018 \text{ г/мм}^3$. Згідно з ДСТУ [1], випробування слід проводити на зразках кубічної форми з ребром 70,7 мм. Зразки вимірюються штангенциркулем з ціною поділки $D_a = 0,1 \text{ мм}$ та зважуються на технічних терезах з градацією важків $D_m = 0,2 \text{ г}$.

У якості альтернативних варіантів випробувань розглянемо кубічні зразки з ребром 50 мм і 30 мм, а також зважування на поштових терезах з ціною поділки 10 г та вимірювання лінійкою з ціною поділки 1 мм. Загалом проаналізовано 12 можливих варіантів визначення середньої густини розчину, які перелічені в таблиці 1. В усіх випадках необхідна для обчислень маса зразків визначалася через їх номінальний об'єм та середню густина. При реальних випробуваннях слід враховувати фактично отримані середні значення розмірів і маси випробуваних зразків.

При випробуваннях будівельних матеріалів засоби вимірювань вхідних параметрів слід обирати такими, щоб вони забезпечували визначення технічних характеристик з достатньою точністю при максимальній простоті виконання вимірювань. Критерієм допустимості використання тих чи інших засобів вимірювання є імовірні відносні похибки непрямого визначення середньої густини розчину, наведені в останньому стовпці таблиці 1. Вони обчислені за формулою (7) для двосторонньої забезпеченості 0,95.

З таблиці видно, що стандартний метод випробувань [1] кубів з розміром ребра 70,7 мм забезпечує отримання результатів з похибками $\Delta\rho \leq \pm 0,46\%$. Зважування на поштових терезах збільшує імовірну похибку до 0,54%, що також можна вважати достатньо точним результатом. У випадку вимірювання розмірів лінійкою імовірні похибки зростають до 1,44...1,47%, що теж можна вважати задовільним результатом.

Таблиця 1 – Імовірні похибки визначення середньої густини при використанні різних зразків та засобів вимірювання

№	Засоби вимірювань	D_a , мм	D_m , г	$\Delta\rho$, %
Куби з номінальним розміром ребра 70,7 мм і масою 636 г				
1	Штангенциркуль, технічні терези	0,1	0,2	0,46
2	Штангенциркуль, поштові терези	0,1	10,0	0,54
3	Лінійка, технічні терези	1,0	0,2	1,44
4	Лінійка, поштові терези	1,0	10,0	1,47
Куби з номінальним розміром ребра 50 мм і масою 225 г				
5	Штангенциркуль, технічні терези	0,1	0,2	0,65
6	Штангенциркуль, поштові терези	0,1	10,0	1,05
7	Лінійка, технічні терези	1,0	0,2	2,04
8	Лінійка, поштові терези	1,0	10,0	2,20
Куби з номінальним розміром ребра 50 мм і масою 49 г				
9	Штангенциркуль, технічні терези	0,1	0,2	1,20
10	Штангенциркуль, поштові терези	0,1	10,0	3,97
11	Лінійка, технічні терези	1,0	0,2	3,44
12	Лінійка, поштові терези	1,0	10,0	5,11

Джерело: розроблено авторами

Зменшення розмірів зразків при використанні тих же засобів вимірювання істотно збільшує імовірні похибки. При випробуванні кубів з ребром 50 мм досить точні результати з похибкою близько 1% можна отримати при використанні штангенциркуля та технічних або поштових терезів. Вимірювання розмірів зразків лінійкою виводить похибки за межі 2%. Куби з розміром ребра 30 мм досить точно можна випробувати тільки при використанні штангенциркуля та технічних терезів. Усі інші варіанти вимірювань призводять до отримання надто великих похибок визначення середньої густини.

Виконаний приклад показує, що для досить точного визначення середньої густини цементно-піщаного розчину на стандартних кубах з розміром ребра 70,7 мм можна використовувати поштові терези з ціною поділки 10 г та сталеву лінійку з ціною поділки 1,0 мм. Таке відхилення від вимог стандарту [1] істотно спростить процедуру випробувань при достатній точності результатів. Куби з розміром ребра 50 мм також можна зважувати на поштових терезах, але вимірювати їх розміри слід штангенциркулем з ціною поділки 0,1 мм. При випробуваннях кубів з розміром ребра 30 мм слід використовувати тільки штангенциркуль і технічні терези.

Висновки.

1. Отримані робочі формули для оцінювання імовірних відносних похибок експериментального визначення середньої густини, вологості, водопоглинання та міцності при стиску будівельних матеріалів і виробів за результатами випробувань зразків правильної геометричної форми.

2. Використання отриманих формул дає змогу здійснити обґрунтований вибір засобів вимірювання для забезпечення необхідної точності результатів визначення технічних характеристик при максимальній простоті виконання вимірювань.

3. Аналогічним чином можуть бути отримані робочі формули для оцінювання імовірних відносних похибок результатів визначення інших характеристик (міцності при згині, розтягу та зсуві, міцності теплоізоляційних матеріалів при стиску до заданої деформації, теплопровідності) та при використанні зразків інших форм.

Список літератури

1. ДСТУ Б В.2.7-239:2010 (EN 1015-11:1999, NEQ). Розчини будівельні. Методи випробувань. Київ: Мінрегіонбуд України. 2010. 34 с. (Державний стандарт України).
2. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Державний стандарт України. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. Київ: Мінрегіонбуд України. 2010. 43 с.
3. ДСТУ Б В.2.7-42-97. Будівельні матеріали. Методи визначення водопоглинання, густини і морозостійкості будівельних матеріалів і виробів. Київ: Держкоммістобудування України. 1997. 22 с. (Державний стандарт України).
4. Пашинський В. А., Сідей В. М. Експериментально-статистичні дослідження технічних характеристик будівельних матеріалів . *Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди* : зб. наук. праць. 2012. Вип. 24. С. 24-30.
5. Пашинський В. А., Сідей В. М. Вплив вологості на характеристики морозостійкості будівельної кераміки . *Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди* : зб. наук. праць. 2013. Вип. 26. С. 331–337.
6. Пашинський В. А., Сідей В. М. Довговічність цегляних стін в кліматичних умовах України . *Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди* : зб. наук. праць. 2014. Вип. 29. С. 468–474.
7. ЕА-4/02 М : 2013. Вираз невизначеності вимірювання при калібруванні. Європейська асоціація з акредитації. 2013. 73 с. URL: https://naau.org.ua/wp-content/uploads/2015/06/EA-4_02.pdf (дата звернення: 17.11.2021)
8. РМГ 43-2001. Применение "Руководства по выражению неопределенности измерений" Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск: Издательство стандартов, 2002. 20 с.
9. Поджаренко В. О., Васілевський О. М., Кучерук В. Ю. Опрацювання результатів вимірювань на основі концепції невизначеності: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2008. 128 с.
10. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. 12-е изд., стер. М. : Высшая школа. 2018. 658 с.

References

1. Derzhavnyy standart Ukrayiny. Rozchyny budivel'ni. Metody vyprobuvan'. [State standard of Ukraine. Building solutions. Test methods.]. (2010). *DSTU B V.2.7-239: 2010 (EN 1015-11:1999, NEQ)*. Kyiv: Ministerstvo budivnytstva Ukrainy [in Ukrainian].
2. Derzhavnyy standart Ukrayiny. Betony. Metody vyznachennya mitsnosti za kontrol'nyy zrazkamy [State standard of Ukraine. Concrete. Methods for determining the strength of control samples]. (2010). *DSTU B V.2.7-214:2009*. Kyiv : Ministerstvo budivnytstva Ukrainy [in Ukrainian].
3. Derzhavnyy standart Ukrayiny. Budivel'ni materialy. Metody vyznachennya vodopohlynannya, hustyny i morozostiykosti budivel'nykh materialiv i vyrobiv [State standard of Ukraine. Building materials. Methods for determination of water absorption, density and frost resistance of building materials and products]. (1997). *DSTU B V.2.7-42-97*. Kyiv : Derzhkommistobuduvannya [in Ukrainian].
4. Pashynskiy, V.A. & Sidey, V.M. (2012). Eksperymental'no-statystychni doslidzhennya tekhnichnykh kharakterystyk budivel'nykh materialiv [Experimental and statistical studies of technical characteristics of building materials] . *Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy : zb. nauk. prats' – Resource-saving materials, structures, buildings and structures: Collection of scientific works, Issue 24*, 24-30 [in Ukrainian].
5. Pashynskiy, V.A. & Sidey, V.M. (2013). Vplyv volohosti na kharakterystyky morozostiykosti budivel'noyi keramiky [Influence of humidity on frost resistance characteristics of building ceramics] // *Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy : zb. nauk. prats' – Resource-saving materials, structures, buildings and structures: Collection of scientific works, Issue 26*, 331–337 [in Ukrainian]

6. Pashynskiy, V.A. & Sidey, V.M. (2014). Dovichnist' tsehlyanykh stin v klimatichnykh umovakh Ukrainy [Durability of brick walls in climatic conditions of Ukraine] . *Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy : zb. nauk. prats' – Resource-saving materials, structures, buildings and structures: Collection of scientific works, Issue 29*, 468–474 [in Ukrainian]
7. EA-4/02 M : 2013. (2013). Expression of measurement uncertainty during calibration. European Accreditation Association. *naau.org.ua*. Retrieved from: https://naau.org.ua/wp-content/uploads/2015/06/EA-4_02.pdf
8. RMG 43-2001. (2002). Primeneniye "Rukovodstva po vyrazheniyu neopredelennosti izmereniy" [Application of "Guidelines for the Expression of Uncertainty of Measurements"] . *Mezhdgosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii – Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification*. Minsk: Publishing house of standards [in Russian]
9. Podzharenko, V.O., Vasilevskiy, O.M. & Kucheruk, V.Yu. (2008). *Opratsyuvannya rezul'tativ vymiryuvan' na osnovi kontseptsii nevyznachenosti [Elaboration of measurement results based on the concept of uncertainty]*. Vinnitsa: VNYU. [in Ukrainian].
10. Wentzel, E.S. (2018). *Teoriya veroyatnostey [Probability theory]*. (Issue 12). Moscow : Higher School [in Russian].

Viktor Pashynskiy, Prof., ScD, **Mykola Pashynskiy**, PhD, **Viktor Darienko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine,

Metrological Control of Technical Characteristics Evaluation of Building Materials and Products

The problem of assessing the possible relative errors of the technical characteristics of building materials when testing samples of the correct geometric shape has been solved.

The work is based on the theory of errors and on the method of linearization of functions of random variables. The technical characteristics of the materials are determined by the equations of indirect measurements through the input parameters, directly measured during the tests with known level of accuracy. Linearization of the equations of indirect measurement allowed to obtain dependences for determining the standard and probable relative errors of determining the average density, humidity, water absorption and compressive strength of building materials. Samples of the correct geometric shape of the following types are considered: cube, parallelepiped, circular cylinder. The input values of the obtained formulas are the size and weight of the samples, as well as the destructive force during compression. The accuracy of direct measurement of these values is determined by the values of division of the corresponding measuring instruments. The obtained formulas give possible relative errors of indirect measurements of the analyzed technical characteristics corresponding to the given two-way security level. The use of the obtained formulas allows you to reasonably choose the means for measuring the input parameters that provide the necessary accuracy of the results of determining the technical characteristics with the maximum ease of performing the measurements. The method for assessing the accuracy and the choice of measuring instruments for measuring the size and mass of samples is illustrated by an example of determining the average density of a mortar based on the results of testing cubic samples of different sizes.

The results of the study can be used in the experimental determination of the analyzed technical characteristics of building materials of other types, as well as extended to assess the accuracy of other technical characteristics, which are determined by indirect methods.

building materials, technical characteristics, testing of materials, probable errors

Одержано (Received) 24.11.2021

Прорецензовано (Reviewed) 10.12.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

О.В. Лізунков, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: avlizunkov@gmail.com

Організація контролю викидів шкідливих речовин цементного заводу

Будівництво автомобільних доріг в Україні з цементобетонним покриттям потребує збільшення виробництва цементу на існуючих цементних заводах України за рахунок інтенсифікації технологічних процесів, що збільшує викиди шкідливих речовин в атмосферу, впливає на стан здоров'я робітників заводу та викликає забруднення навколишніх населених пунктів.

Внаслідок реорганізації Санітарно-епідеміологічної служби України, скасування дії частини нормативних документів, за якими проектувалися діючі цементні заводи, виникає потреба розглянути питання організації контролю викиду шкідливих речовин в сучасних умовах, що рекомендується враховувати при розробці проекту організації будівництва нових підприємств.

цемент, промисловий пил, шкідливі речовини, гранично допустимі концентрації, охорона праці, контроль стану атмосферного повітря

Постановка проблеми. На сьогоднішній день в Україні активно реалізується Програма Президента "Велике будівництво", одним з напрямів якої є будівництво доріг з цементобетонним покриттям. Основним компонентом суміші для улаштування цементобетонного покриття є портландцемент ПЦ М 400 Д0 Ц, витрата якого на один квадратний метр складає 420 ... 440 кг, що вимагає нарощування темпів виробництва цементу на існуючих цементних заводах, як правило за рахунок інтенсифікації виробничих процесів, або модернізації цих заводів, або проектування та будівництво нових підприємств по виробництву цементу [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Цементні заводи відносяться до підприємств з інтенсивним викидом пилу, що забруднює атмосферне повітря населених пунктів на відстані до 20 кілометрів, в залежності від потужності заводу.

Під час виробництва цементу в атмосферу може попадати кількість пилу, що становить до 10-15 відсотків загального об'єму продукції, що випускає завод. Найбільшим джерелом пилу є пічки випалення, у ряді випадків вони можуть викидати у повітря більше 80 відсотків всього пилу, що знаходиться в газах, що виходить з технологічного обладнання в процесі роботи [2, 4].

Одним зі шляхів зниження запиленості атмосферного повітря є впровадження раціональної організації технологічного процесу на етапі проектування - випалення, сушіння та помелу сировини.

Використання сучасних установок очищення технологічних газів від пилу дозволяє значно знизити його концентрацію в повітрі [2].

Інтенсифікація технологічних процесів, яка досягається у ряді випадків за рахунок збільшення швидкості газів і температури випалення клінкера, а також більш тонкого подрібнення сировинної суміші і цементу, без встановлення додаткового обладнання для очищення від пилу, призводить до збільшення його викиду в навколишнє середовище.

Однак не приділяється особливої уваги зовнішньому контролю забрудненості атмосферного повітря. Більшість підприємств по виробництву цементу в Україні були побудовані десятки років тому. За цей час змінилася інфраструктура населених пунктів, змінилась кількість населення, побудовано нові автомагістралі. Втратили чинність державні стандарти та нормативні документи щодо забрудненості атмосферного повітря шкідливими речовинами. У зв'язку з перспективою будівництва цементобетонних дорожніх покриттів виникає необхідність в будівництві нових, сучасних цементних заводів, що працюють на альтернативних видах палива.

Постановка завдання. На етапі розробки проекту організації будівництва цементного заводу необхідно враховувати вимоги до розташування та будівництва підприємств даного типу та організацію подальшого контролю шкідливих речовин в атмосферне повітря в процесі експлуатації заводу органами Державної екологічної інспекції України та Держпродспоживслужби, які контролюють різноманітні аспекти забруднення атмосферного повітря населених пунктів підприємствами регіону, у тому числі цементними заводами за двома основними напрямками [3]:

- контроль ефективності роботи пиловловлюючих споруд за даними лабораторії промислового підприємства;
- організація нагляду за чистотою атмосферного повітря населених місць силами Державної екологічної інспекції України.

Виклад основного матеріалу. Внаслідок реорганізації Санітарно-епідеміологічної служби України та скасування дії частини нормативних документів, таких як ГОСТ 17.2.1.04-77 "Охрана природы. Атмосфера. Источники и метеорологические факторы загрязнения, промышленные выбросы. Термины и определения", частина функцій передана Держпродспоживслужбі: Наказ Міністерства охорони здоров'я України «Про затвердження списків і введення в дію гігієнічних регламентів шкідливих речовин у повітрі робочої зони і атмосферному повітрі населених місць» (Наказ № 30) та Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами) (ДСП-201-97).

Враховуючи те, що діючі на теперішній час цементні заводи проектувалися та будувалися за вимогами, що втратили чинність, виникає потреба розглянути питання організації контролю викиду шкідливих речовин в сучасних умовах.

Санітарний контроль стану зовнішнього середовища від забруднення цементним і клінкерним пилом у районі розташування цементних виробництв базується на лабораторному контролі, який передбачає систематичний лабораторний контроль за допомогою стаціонарних та маршрутних постів, контроль за максимальним зональним забрудненням атмосферного повітря, визначення ступеню небезпеки забруднення.

У відповідності до Державних санітарних правил охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами) контроль за станом атмосферного повітря здійснюється наступним чином.

Відбір проб здійснюється згідно карти місцевості радіусом не менш 50 максимальних висот труб джерела викиду. На цей план наносяться у відповідності з генеральним планом цементного заводу основні джерела викидів, а також у відповідності з генеральним планами планування та забудови населених пунктів райони перспективного житлового будівництва, лікарні, санаторії, місця відпочинку.

Стаціонарні пункти - постійно обладнані точки відбору проб для систематичного вивчення динаміки забруднення атмосферного повітря цементним і клінкерним пилом.

Маршрутні пости – тимчасові, але суворо визначені місця для відбору проб, куди обладнання доставляється за мірою необхідності вивчення ступеню забруднення атмосферного повітря.

Кількість стаціонарних пунктів залежить від чисельності населення.

Таблиця 1 – Визначення кількості стаціонарних пунктів

Чисельність населення	Число стаціонарних пунктів
До 50 тис. осіб	1
50 - 100 тис. осіб	2
100 - 200 тис. осіб	3
200 - 500 тис. осіб	5
500 - 1000 тис. осіб	7
На кожні наступні 500 тис. додатково	1

Джерело: розроблено автором

Розміщення стаціонарних пунктів (перші три точки обов'язково):

1. житловий район, найбільш схильний до впливу викидів;
2. район з найбільшим числом населення;
3. район перспективного житлового будівництва;
4. автотранспортні магістралі;
5. для великих міст - центр;
6. специфічний район (район розміщення цементного заводу);
7. пункт в чистій зоні.

Постійний контроль за ступенем забруднення повітря на стаціонарних постах виконується систематично, шляхом відбору разових проб у визначений час за повною програмою, зокрема включаються обов'язкові атмосферні забруднення - цементний і клінкерний пил, сірчаний газ, окис вуглецю, окис азоту та специфічні інгредієнти – трьох- і семивалентний хром.

Систематичний нагляд за повною програмою виконується щоденно за місцевим часом за графіком о 07:00, 10:00, 13:00 годин у вівторок, четвер, суботу та о 15:00, 18:00, 21:00 у понеділок, середу, п'ятницю.

У випадку постійно низьких концентрацій (нижче чутливості метода аналізу даної речовини) відбір проб проводять за скороченою програмою один раз на добу.

Первинним документом для реєстрації результатів нагляду є добова відомість по відбору проб атмосферного повітря.

Крім того, ведеться місячна відомість по нагляду за чистотою атмосферного повітря на кожний інгредієнт окремо.

З метою виявлення динаміки і тенденції ступеня забрудненості розраховують середньодобові, середньомісячні та середньорічні концентрації.

В місці розташування цементного заводу необхідно проводити вивчення зонального розповсюдження цементного пилу та пилу клінкера.

Точки відбору проб повинні розташовуватися підвітряно до джерела викиду на відстані 100, 300, 500, 1000, 2000, 3000 метрів в залежності від потужності заводу, технологічних режимів, умов викиду, рельєфу місцевості, метеорологічних особливостей району дослідження. Крім того, виділяється контрольна точка з навітряної сторони.

Відбір проб виконується за факелом: при зміні його напрямку відповідно зміщується точка аспірації. У протоколі відмічається вологість повітря, температура, напрям та сила вітру.

Одночасно з відбором проб безпосередньо на заводі перевіряється стан роботи очисних фільтрів, виробниче навантаження в момент відбору проб та ритмічність роботи підприємства.

Визначаються статистично достовірні концентрації (мг/м^3) запиленості атмосферного повітря на різних відстанях від джерела викидів, відсоток проб (в точках досліджень) що перевищують ГДК, вплив метеорологічних факторів на ступінь забрудненості повітря. Отриманий аналіз дозволяє визначити рівень впливу різних режимів роботи цементного заводу на ступінь забрудненості атмосферного повітря, а також залежності забрудненості атмосферного повітря від стану роботи газо- та пиловловлюючих установок.

Для розробки первинних матеріалів натурних досліджень використовується вибірковий метод визначення зональних максимальних разових концентрацій, який включає в себе наступні етапи:

- вибірка серій зональних досліджень за показниками максимального викиду цементного заводу;
- відбір серій вимірювань з урахуванням найгірших для розсіювання викидів метеорологічних умов;
- відбір максимальних концентрацій, що відповідають осьовим аспіраційним точкам по кожному дню досліджень у всіх зонах;
- умовне встановлення нижньої межі, що зараховується під час наступної обробки інформації про рівень забруднення повітря;
- складання вихідних для статистичної обробки варіаційних рядів по зонам, у яких варіантами є максимальні разові концентрації, які перевищують середню їх величину у щоденній серії вимірів;
- визначення найвищої екстремальної концентрації у кожному ряді;
- розрахунок середньої величини даного ряду (M) та його середньої похибки (m);
- визначення середнього максимуму.

Для оцінки ступеня забруднення атмосферного повітря розраховуються наступні параметри: максимальна з разових; максимальна середньодобова (середня з числа разових, виявлених протягом доби); середньомісячна концентрація (середня з числа середньомісячних, виявлених протягом року при відборі разових проб); визначається клас небезпеки речовини (цементного пилу, CO , SO_2 , NO_2); розраховується коефіцієнт перевищення фактичної концентрації середньодобової гранично допустимої концентрації (ГДК).

Отримані дані забрудненості повітря цементним пилом є вихідним матеріалом до аналізу стану забрудненості території та розробки плану заходів по зниженню забруднення атмосферного повітря внаслідок роботи цементного заводу.

Висновки. Інтенсифікація технологічних процесів на цементних заводах призводить до збільшення викидів шкідливих речовин в атмосферу, що вимагає постійного нагляду за забрудненням повітря. Внаслідок скасування дії частини нормативних документів та стандартів необхідно розглянути питання організації контролю викиду шкідливих речовин цементних заводів згідно діючих стандартів органів контролю. Також необхідно враховувати при розробці проекту організації будівництва цементного заводу систему зовнішнього контролю за викидами шкідливих речовин на стаціонарних та маршрутних постах.

Список лiтератури

1. Гамеляк I. П., Островерхий О. Г., Мороз В. С. Iсторiя та перспективи будiвництва цементобетонних покриттiв автомобiльних дорiг та аеродромiв в Украiнi . *Автомоб. дороги i дорожнє будi-во Нацiонального транспортного унiверситету*. 2019. Вип. 106. С. 60 – 76. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/106/60.pdf (дата звернення:)
2. Кривiльова С. П., Власенко В. В., Цвiркун Д. О. Боротьба з промисловим пилом при виробництвi цементу як фактор суттєвого зниження негативного впливу цементних заводiв на довкiлля . *Вiсник Нацiонального технiчного унiверситету "ХПІ"*. Сер. : Новi рiшення в сучасних технологiях: зб. наук. пр. 2019. № 5 (1330). С. 124-131. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/41515>
3. Керб Л. П. Основи охорони працi : навч. - метод. посiбн. К. : Вид-во КНЕУ, 2003. 215 с.
4. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов . Л. : Изд-во "Химия", 1987. 264 с.
5. Про Основнi напрямки державної полiтики Украiни у галузi охорони довкiлля, використання природних ресурсiв та забезпечення екологiчної безпеки . Вiдомостi Верховної Ради (ВВР), 1998. № 38-39. 248 с. URL: <http://www.ecopravo.org.ua/2006/06/29/pro-osnovn-naprjami-derzhavno-poltiki-ukrani-u-galuz-oxoroni-dovkllja-vikoristannja-prirodnix-resursv-ta-zabezpechennja-ekologchno-bezpeki>.

References

1. Gamelyak, I.P., Ostroverkhiy, O.G. & Moroz, V.S. (2019). Istoriya i perspektivy stroitel'stva tsementobetonnykh pokrytiy avtomobil'nykh i aerodromov v Ukraine [History and prospects of construction of cement-concrete coverings of highways and airfields in Ukraine] . *Avtomob. dorogi i dorozhnoye stroeniye Natsional'nogo transportnogo universiteta* – *Car roads and road construction of the National Transport University*, issue 106, 60 – 76 [in Ukrainian].
2. Krivileva, S.P., Vlasenko, V.V. & Tsvirkun, D.O. (2019). Borot'ba z promyslovym pylom pry vyrobnytstvi tsementu yak faktor suttyevoho znyzhennya nehatyvnoho vplyvu tsementnykh zavodiv na dovkillya [Control of industrial dust in cement production as a factor in significantly reducing the negative impact of cement plants on the environment] . *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta "KhPI" - Bulletin of the National Technical University "KhPI". New solutions in modern technology*, № 5 (1330), 124-131 [in Ukrainian].
3. Kerb, L.P. (2003). *Osnovy okhorony pratsi [Basics of labor protection]*. Kyiv: Izd-vo KNEU [in Ukrainian].
4. Kouzov, P.A. (1987). *Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pyley i izmel'chennykh materialov [Fundamentals of the analysis of the dispersed composition of industrial dusts and grinded materials]* . L. : Izd-vo "Khimiya" [in Russian].
5. Pro osnovni napryamy derzhavnoyi polityky Ukrayiny u haluzi okhorony dovkillya, vykorystannya pryrodnykh resursiv ta zabezpechennya ekolohichnoyi bezpeky [The main directions of the state policy of Ukraine in the field of environmental protection, use of natural resources and ensuring environmental safety] . (1998). *Rossiyskaya yustitsiya (VVR)*, № 38-39, 248. Retrieved from: <http://www.ecopravo.org.ua/2006/06/29/pro-osnovn-naprjami-derzhavno-poltiki-ukrani-u-galuz-oxoroni-dovkllja-vikoristannja-prirodnix-resursv-ta-zabezpechennja-ekologchno-bezpeki> [in Ukrainian].

Oleksandr Lizunkov, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Organization of Control of Emissions of Harmful Substances of a Cement Plant

The increase in cement production at the existing cement plants of Ukraine may lead to an increase in emissions of harmful substances into the atmosphere due to the intensification of technological processes. The second way to increase cement production is to design and build new cement plants. In this case, at the stage of project development, it is important to take into account the requirements for the control of air pollution during the operation of the cement plant. The issues of organization of control of air pollution by industrial dust of cement plant by creation of new and operation of the existing fixed points and route posts of control of concentration of industrial dust in atmospheric air are considered in the work. The number and location of the fixed checkpoints for the concentration of industrial dust depends on the number of people living close to the enterprise, and in the case of construction of new plants, it may be necessary to organize additional fixed points.

As a result of the reorganization of the Sanitary and Epidemiological Service of Ukraine, the abolition of some regulations, some functions of sanitary supervision were transferred to the State Food and Consumer Service of Ukraine and the State Environmental Service of Ukraine, so there is a need to consider the organization of project of organization of construction of new enterprises. The author considers the requirements

of the current State Sanitary Rules for Atmospheric Air Protection of Settlements (from chemical and biological pollution), the method of calculating concentrations in the air of harmful substances contained in emissions of enterprises, standards of Ukraine for air quality control.

Conclusions: intensification of technological processes at cement plants leads to an increase in emissions of harmful substances into the atmosphere, which requires constant monitoring of air pollution. Due to the abolition of some regulations and standards, it is necessary to consider the organization of control of emissions of harmful substances from cement plants in accordance with current standards of control bodies. To take into account the development of the project of organization of construction of the cement plant system of external control over emissions of harmful substances at stationary and route checkpoints.

cement, industrial dust, harmful substances, maximum permissible concentrations, labour protection, control of atmospheric air

Одержано (Received) 26.11.2021

Прорецензовано (Reviewed) 14.12.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

УДК 622.74: 621.928.235 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.188-196](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.188-196)

Вол. Вол. Яцун, доц., канд. техн. наук, **В. В. Яцун**, доц., канд. техн. наук, **В. Ю. Данілов**
Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна
e-mail: yvkr@i.ua

Експериментальне дослідження універсальної будівельної вібромашини широкого застосування

В роботі проведені експериментальні дослідження працездатності способу збудження резонансних вібрацій пасивними автобалансирами для одномасної вібромашини з поступальним прямолінійним рухом віброплатформи. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що у порівнянні зі звичайною інерційною вібромашиною нова машина має на 15-25% більшу продуктивність при меншому на 10-40% споживанні енергії. При цьому дебалансні маси у новому віброзбуднику менші у 4-6 разів дебалансних мас у звичайному інерційному віброзбуднику.

резонансний віброзбудник, вібростіл, вібросито, автобалансир, вібрація, будівельні машини

Постановка проблеми. Серед вібромашин типу вібросит, вібростолів найбільш енергоефективними є резонансні [1-7]. Такі машини дозволяють ефективно збуджувати значні вібрації платформ віброзбудниками малої маси й потужності. Тому відома загальна проблема по розробці нових резонансних вібраційних машин. Для збудження резонансних вібрацій можна використовувати пасивні автобалансири – кульові, роликові, маятникові. Працездатність цього способу для одномасових машин перевірялася в роботах [8-9]. В роботі [9] працездатність цього способу перевірена комп'ютерним 3D моделюванням.

Актуально з використанням результатів робіт [8-9] запроектувати й експериментально дослідити динаміку дослідного зразка будівельної резонансної машини широкого призначення, у якій вібрації збуджує кульовий автобалансир.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш прості по конструкції й надійні в роботі збудники резонансних вібрацій, що працюють на ефекті Зомерфельда. Розглянемо більш докладно способи збудження резонансних коливань вібромашин, засновані на ефекті Зомерфельда. В [5] описаний спосіб, у якому маятник насаджений на вал електродвигуна. Номінальна частота обертання ротора електродвигуна трохи менше резонансної частоти коливань платформи. Через ефект Зомерфельда маятник не

може розігнатися до номінальної швидкості обертання ротора й застряє на резонансній частоті коливань робочої платформи. Недолік методу полягає в тому, що електродвигун при цьому перевантажений. В [6] описаний спосіб, у якому замість електродвигуна використовується вітрове колесо, сполучене з дебалансом. На колесо подається потік стисненого повітря. Колесо поступове розганяється до резонансної частоти коливань платформи. Недолік методу полягає в низькому коефіцієнті корисної дії системи «стиснене повітря – вітрове колесо – платформа». В [7] описаний спосіб, у якому на вали малопотужних електродвигунів насаджені маятники. Згодом рух маятників синхронізується й вони застряють на резонансній частоті коливань робочої платформи. Недолік способу – перевантаження електродвигунів. В [8] запропоновано збуджувати двочастотні резонансні вібрації платформи віброзбудником у вигляді кульового, роликового чи маятникового автобалансира. Для цього використовується особливий режим руху маятників, куль або роликів, що виникає при малих силах опору руху вантажів щодо корпусу автобалансира. У цьому режимі вантажі збираються разом, не можуть наздогнати вал, на який насаджений автобалансир і застряють на резонансній частоті коливань робочої платформи. В [9] запропоновано за рахунок застрягання вантажів збуджувати повільні резонансні коливання платформи. Так само запропоновано на корпус автобалансира встановлювати дебаланс. Корпус із дебалансом обертаються синхронно з валом. Цим збуджуються швидкі коливання платформи. Параметри двочастотних вібрацій міняються в широких межах зміною швидкості обертання ротора, дебалансної маси на корпусі автобалансира, сумарної маси вантажів. Передбачається, що віброзбудник у вигляді пасивного автобалансира застосовний для одно-, дво-, тримасних вібромашин з різною кінематикою руху платформ. Новий спосіб заснований на тому ж ефекті Зомерфельда, що й способи в роботах [5-7]. Тільки замість малопотужного двигуна використовуються невеликі сили в'язкого опору відносному руху вантажів. У якості другого віброзбудника використовується дебалансна маса, сполучена з корпусом автобалансира. Проведений огляд показує, що актуально теоретично й експериментально досліджувати працездатність способу збудження двочастотних вібрацій пасивним автобалансиром.

Постановка завдання. Таким чином, метою даної роботи є експериментальне дослідження працездатності способу збудження резонансних вібрацій пасивними автобалансирами для одномасної вібромашини з поступальним прямолінійним рухом віброплатформи.

Виклад основного матеріалу. Запроектована вібромашина з розмірами платформи 1000x600мм у якій у якості віброзбудника використовується кульовий автобалансир.

Вібромашина може працювати в 2 двох режимах: перший – вібраційне сито; другий – вібраційний стіл. Відмінність режимів полягає в різних амплітудах і частотах руху робочої поверхні (табл.1).

Таблиця 1 – Режими роботи вібромашини

Тип машини	Режим роботи	
	Основний	Допоміжний
Вібростіл	Швидкі коливання із частотою 50 Гц, амплітуда рівна 0,2-0,7мм	Повільні резонансні коливання із частотою 6-10 Гц, обмежена амплітуда
Вібросито	Повільні резонансні коливання із частотою 10 Гц, амплітуда рівна 2-6 мм	Швидкі коливання із частотою 50 Гц, обмежена амплітуда

Джерело: розроблено автором

По технічних рекомендаціях у САПР Solidworks та із застосуванням додаткового модуля Cosmos Motion створено 3D модель одномасної вібраційної машини з віброзбудником у вигляді кульового автобалансира (рис. 1, а). Після перевірки працездатності створеної 3D моделі були підібрані оптимальні параметри й був створений промисловий зразок вібраційної машини (точна копія 3D моделі) (рис. 1, б). В таблиці 2 наведені основні параметри 3D моделі й промислового зразка.

Таблиця 2 – Основні параметри вібромашини

№	Параметр	3D модель	Промисловий зразок
1	Маса платформи й прикріплених до неї деталей, кг	35	35
2	Маса завантаженої платформи й прикріплених до неї деталей, кг	90	90
3	Резонансна частота коливань платформи, Гц	10	10
4	Коефіцієнт жорсткості опори, Н/м	$140 \cdot 10^3$	розраховується
5	Маса сталеві кулі, кг	0,325	0-3x0.24
6	Діаметр бігової доріжки кулі, м	0,19	0,19
7	Відстань від поздовжньої осі ротора до центру мас кулі, м	0,0735	розраховується
8	Дебалансна маса, кг	0,1	0-0,2
9	Відстань від поздовжньої осі ротора до дебалансної маси, м	0,105	0,105

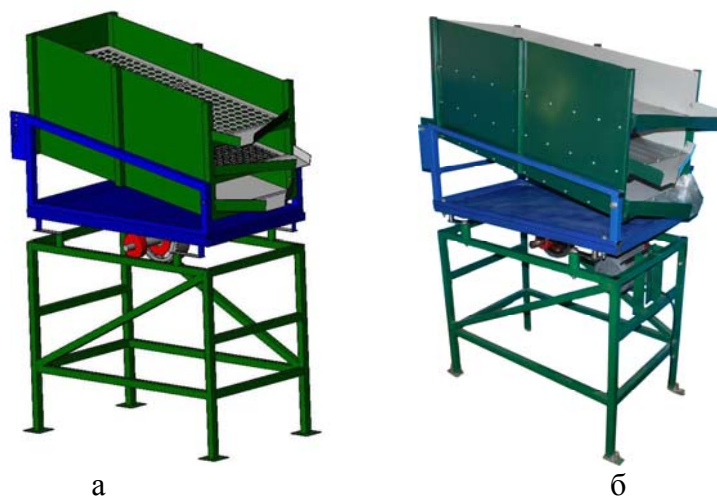
Джерело: розроблено автором

Коефіцієнт твердості опори, Н/м :

$$k = M_{\Sigma} \cdot \omega^2 = M_{\Sigma} \cdot (2\pi \cdot n)^2, \quad (1)$$

де M_{Σ} – маса платформи й прикріплених до неї деталей;

n – резонансна частота коливань платформи.



а – 3D модель; б – промисловий зразок

Рисунок 1 – Резонансна вібраційна машина

Джерело: розроблено автором

Відстань від поздовжньої осі ротора до центру мас кулі:

$$R = 0.5(D_r - D_b), \quad (2)$$

де D_r – діаметр бігової доріжки куль; D_b – діаметр кулі.

Конструкція вібростата дозволяє:

- змінювати частоту обертання вала;
- змінювати кількість куль в автобалансиру;
- змінювати масу головної платформи за допомогою додаткових вантажів;
- змінювати масу дебаланса шляхом поєднання декількох однакових дебалансів;
- змінювати твердість пружних опор;
- змінювати кут нахилу решет;
- встановлювати решета з різним діаметром просіювальних отворів
- спостерігати за відносним рухом куль.

Перед проведенням експериментів проводиться динамічне балансування валу з автобалансиром в зборі без куль у власних опорах (рис. 2).

Використовується пристрій "Балком 4". Балансування проводиться в двох площинах корекції. Перша площина розміщена в області корпусу автобалансиру, друга площина в області шківу. Датчики вібрації встановлені в місцях кріплення опор валу. Для визначення швидкості обертання вала використовується цифровий оптичний тахометр Venetech HS2234 (рис.2).



Рисунок 2 – Динамічне балансування валу Резонансна вібраційна машина

Джерело: розроблено автором

В основу виміру швидкості обертання покладений принцип підрахунку кількості оптичних імпульсів відбитих від сигнальної мітки за одиницю часу. Мітка наноситься на корпус автобалансиру.

Запускається програма приладу Балком 4, вибирається режим балансування у двох площинах корекції (рис. 22).

Проводиться запуск двигуна, виконуються виміри.

Установлюється пробний вантаж у першій площині корекції, проводиться запуск двигуна, виконуються виміри. Установлюється пробний вантаж у другій площині корекції, проводиться запуск двигуна, виконуються виміри. Після проведених вимірів визначається значення коректувальних мас і місце їх установки, проводиться контрольний вимір рівня вібрацій (рис. 3).

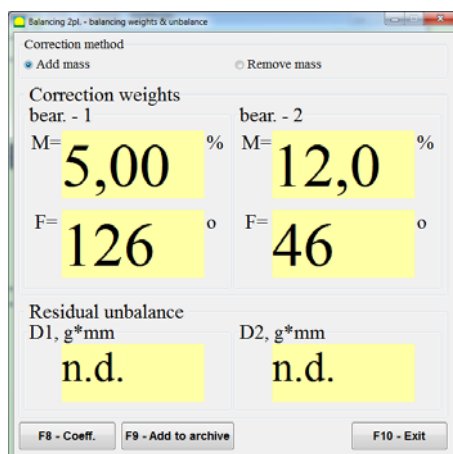


Рисунок 3 – Результати балансування

Джерело: розроблено автором

Після перевірки якості балансування проводилося перевірка прямолінійності руху платформи. Кулі в автобаланси́рі були вилучені. На робочу поверхню платформи були нанесено 4 контрольні точки (рис. 4). Запускався електродвигун із частотою обертання 25 Гц. Далі за допомогою приладу "Балком 4" в кожній точці одночасно проводились виміри значення віброшвидкостей.



Рисунок 4 – Схема розміщення контрольних точок

Джерело: розроблено автором

В результаті перевірки прямолінійності руху платформи встановлено, що різниця значень вимірів в різних точках не перевищує 25% (рис.5).

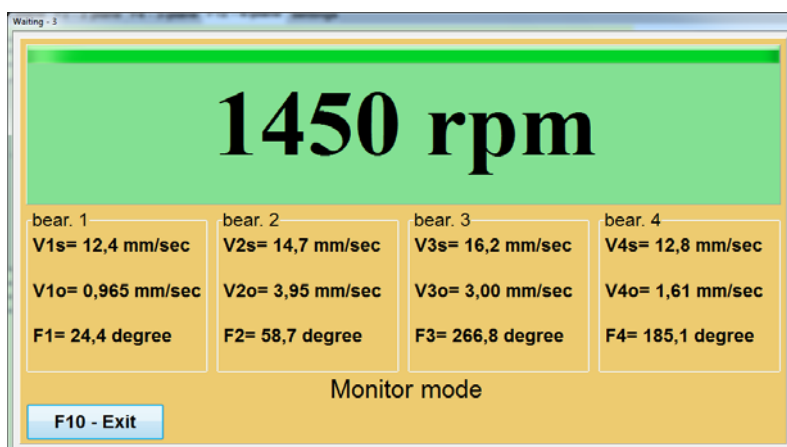


Рисунок 5 – Результати перевірки прямолінійності руху платформи

Джерело: розроблено автором

Це свідчить про прямолінійність руху всіх точок робочої поверхні платформи і відповідно решет.

Тестування стенда в режимі вібростолу. Кулі вилучені, змінюється дебалансна маса на корпусі автобалансира, платформа не завантажена. Запускався електродвигун із частотою обертання 50 Гц. За допомогою віброметра "Walcom" WM6360 проводилися виміри значення переміщення робочої поверхні стола. Після чого виконувався добір дебалансної маси при якій розмах коливань платформи відповідав стандартним значенням промислових вібростолів. Далі платформа завантажувалася вантажем масою 25 кг, 55 кг і експеримент повторювався. Результати вимірів наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Характеристики вібромашини в режимі "вібростіл"

Дебаланса маса на корпусі μ , кг	Маса платформи M , кг		
	35	60	90
	Розмах, мм		
0,10867	0,365	0,312	0,284
0,20756	0,765	0,741	0,689
0,30916	1,156	1,123	0,965

Джерело: розроблено автором

Так само був виконаний вимір рівня вібрацій з використанням датчиків акселерометрів ММА6231Q 2АХ 4. У режимі спектрального аналізатора на екран комп'ютера виводився графік спектра коливань. На частоті 50 Гц спостерігався яскраво виражений пік. Це свідчить про наявність єдиної складової вібрацій викликані дебалансною масою на корпусі автобалансира.

Тестування стенда в режимі вібростолу. Дебалансна маса вилучена, змінюється кількість і маса куль в автобалансирі, платформа не завантажена. Запускався електродвигун із частотою обертання 25 Гц. Виміри значення переміщень проводилися за допомогою кулькової ручки закріпленої на платформі. Під час роботи стенда, до ручки підводився аркуш паперу на якому фіксувалася рівна лінія. Далі штангенциркулем проводився вимір лінії, яка відповідає значенню зсуву платформи. Після чого виконувався добір маси й кількості куль при яких розмах коливань платформи відповідав стандартним значенням промислових вібростолів. Далі платформа завантажувалася вантажем масою 25 кг, 55 кг і експеримент повторювався. Результати вимірів наведено в таблиці 4.

Таблиця 4 – Характеристики вібромашини в режимі "вібростол"

Дебаланса маса від куль N , кг	Маса платформи M , кг		
	35	60	90
	Розмах, мм		
1·0,0448	2,6	1,7	1,5
1·0,11145	3,2	2,0	1,9
1·0,289	4	2,7	2,5

Джерело: розроблено автором

Так само був виконаний вимір рівня вібрацій з використанням датчиків акселерометрів ММА6231Q 2АХ 4. У режимі спектрального аналізатора на екран комп'ютера виводився графік спектра коливань. На частоті 10 Гц спостерігався яскраво

виражений пік. Це свідчить про наявність єдиної складової вібрацій викликані дебалансною масою на корпусі автобалансира.

Далі проводилась перевірка енергоефективності запропонованої конструкції віброзбудника (табл.5). Проводились заміри витрати електричної енергії на різних частотах обертання і з різними віброзбудниками.

Таблиця 5 – Показники витрати електричної енергії

№	Частота обертання валу, об/с	Витрата електричної енергії, Вт		
		Збалансований вал	Сталева куля масою 240 г	Дебаланс на корпусі автобалансиру масою 100 г
1	25	128	135	149
2	35	172	180	205
3	50	255	260	433

Джерело: розроблено автором

В результаті досліджень встановлено, що запропонований спосіб збудження вібрацій дійсно значно енергоефективніший ніж відомий класичний. Так в залежності від значення робочої частоти, економія електричної енергії може становити в межах 9,4 – 40% в порівнянні з класичною конструкцією віброзбудника. Також встановлено, що підвищення маси кулі неістотно впливає на витрату електричної енергії, в той час як збільшення значення дебалансу на корпусі викликає значне підвищення витрати електричної енергії, особливо під час пуску електродвигуна.

На практиці можлива робота машини одразу на двох частотах. Це сприятиме підвищенню продуктивності за рахунок інтенсифікації технологічних процесів (утворення киплячого шару) та самоочищенню решета.

Висновки. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що у порівнянні зі звичайною інерційною вібромашиною нова машина має на 15-25% більшу продуктивність при меншому на 10-40% споживанні енергії. При цьому дебалансні маси у новому віброзбуднику менші у 4-6 разів дебалансних мас у звичайному інерційному віброзбуднику. В подальшому планується проведення модернізації конструкції машини на двомасову, що сприятиме зменшенню негативного впливу вібрацій на оператора.

Список літератури

1. Интенсификация технологических процессов вибромашин путем реализации бигармонических режимов работы / С. Л. Букин, С. Г. Маслов, А. П. Лютый, Г. Л. Резниченко . *Обогащение полезных ископаемых: наук.-техн. сб.* 2009. Вип. 36(77)-37(78). С. 81–89.
2. Ланець О. С. Високоєфективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення): монографія. Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2008. 324 с.
3. Artyunin A. I. "Effect of "Crawling" and Peculiarities of Motion of a Rotor with Pendular Self-Balancers". *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 373-375, pp. 38-42, 2013. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.373-375.38
4. Реалізація ефекту Зоммерфельда у вібраційному майданчику з інерційним приводом / О. В. Ланець, Я. В. Шпак, В. І. Лозинський, П. Ю. Леонович . *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2013. Вип. 47. С. 12 – 28. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Avtomatyzac_2013_47_4 (дата звернення: 17.01.2022)
5. Sommerfeld, A. Beitrage zum dynamischen Ausbay der Festigkeislehre . *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*. 1904. Bd. 48 (18). P. 631–636.

6. Кузьо І. В., Ланець О. В., Гурський В. М. Синтез низькочастотних резонансних вібраційних машин з аероінерційним збуренням, *Науковий вісник Національного гірничого університету*, 2013. № 2, С. 60–67. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2013_2_11
7. Jung, D., DeSmidt, H. Nonsynchronous Vibration of Planar Autobalancer/Rotor System With Asymmetric Bearing Support. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2017. Vol. 139, Issue 3, 031010 (24 p.). doi: <https://doi.org/10.1115/1.4035814>
8. Филимоных Г. Б., Яцун В. В. Способ возбуждения двухчастотных вибраций пассивными автобалансирами. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. № 4/7 (76). С. 9–14. doi: 10.15587/1729-4061.2015.47116.
9. Experimental study into rotational-oscillatory vibrations of a vibration machine platform excited by the ball auto-balancer / V. Yatsun, G. Filimonikhin, A. Nevdkha, V. Pirogov. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 4, N 7(94). P. 34–42. doi: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140006>

Referencis

1. Bukin, S.L., Maslov, S.G., Ljutyj, A.P. & Reznichenko, G.L. (2009). Intensification of technological processes through the implementation of vibrators biharmonic modes. *Obogashhenie poleznykh iskopaemykh: nauk.-tehn. zb. – Enrichment of minerals: Scientific and technical journal*, 36–37 (77-78), 81–89. [in Russian]
2. Lanets, O.S. (2008). *Vysokoeffektivni mizhrezonansni vibratsiini mashyny z elektromagnitnym pryvodom (teoretychni osnovy ta praktyka stvorennia) [High-Efficiency Inter-Resonances Vibratory Machines with an Electromagnetic Vibration Exciter (Theoretical Bases and Practice of Creation)]*. Lviv: Publishing house of Lviv Polytechnic National University [in Ukrainian]
3. Artyunin, A.I. & Elisayev, S.V. (2013). "Effect of "Crawling" and Peculiarities of Motion of a Rotor with Pendular Self-Balancers". *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 373-375, pp. 38-42, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.373-375.38 [in English]
4. Lanets, O.V., Shpak, Ya. V., Lozynskyi, V.I. & Leonovych, P.Yu. (2013). Realizatsiya efektu Zommerfelda u vibratsiynomu maydanchyku z inertsiiym pryvodom [Realization of the Sommerfeld effect in a vibration platform with an inertia drive]. *Avtomatyzatsiia vyrobnychkykh protsesiv u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni – Avtomatyzatsiia vyrobnychkykh protsesiv u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni*, 47, 12–28 [in Ukrainian].
5. Sommerfeld, A. (1904). Beitrage zum dynamischen Ausbaur der Festigkeitslehre. *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, 48 (18), 631–636 [in German].
6. Kuzo, I.V., Lanets, O.V., Gurskyi, V.M. (2013). Synthesis of low-frequency resonance vibratory machines with an aeroinertia drive. *Syntezyz nyz'kochastotnykh rezonansnykh vibratsiynykh mashyn z aeriinertsiiym zburenniam – Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 60–67. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2013_2_11 [in Ukrainian].
7. Jung, D., DeSmidt, H. (2017). Nonsynchronous Vibration of Planar Autobalancer/Rotor System With Asymmetric Bearing Support. *Journal of Vibration and Acoustics*, 139 (3), 031010, 24. doi: <https://doi.org/10.1115/1.4035814> [in English].
8. Filimonikhin, G.B. & Yatsun, V.V. (2015). Method of excitation of dual frequency vibrations by passive autobalancers. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*, 4(7(76)), 9–14. doi: 10.15587/1729-4061.2015.47116 [in Russian].
9. Yatsun, V., Filimonikhin, G., Nevdkha, A., & Pirogov, V. (2018). Experimental study into rotational-oscillatory vibrations of a vibration machine platform excited by the ball auto-balancer. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*, 4(7 (94)), 34-42. doi: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140006> [in English].

Volodymyr Yatsun, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Yatsun**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,

Vladislav Danilov, student

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Experimental Study of a Universal Construction Vibrating Machine of Wide Application

Experimental studies of the efficiency of the method of excitation of resonant vibrations by passive autobalancers for a single-mass vibrating machine with translational rectilinear motion of the vibrating platform have been carried out.

A vibrating machine with a platform size of 1000x600 mm has been designed, in which a ball balancer is used as a vibrating exciter. The vibrating machine can work in 2 two modes: the first - a vibrating sieve; the second is a vibrating table. The difference between the modes is the different amplitudes and frequencies of the

working surface. According to the technical recommendations, Solidworks CAD created a 3D model of a single-mass vibrating machine with a vibrating exciter in the form of a ball autobalancer using the Cosmos Motion module. After checking the performance of the created 3D model, the optimal parameters were selected and an industrial design of the vibrating machine (an exact copy of the 3D model) was created. Before the experiments, a dynamic balancing of the shaft with the autobalancer assembly without balls in their own supports was performed. After checking the quality of balancing, the straightness of the platform was checked. Balls in the autobalancer were removed. 4 checkpoints were applied to the working surface of the platform. An electric motor with a speed of 25 Hz was started. Then with the help of the device "Beam 4" at each point simultaneously measured the value of vibration velocities. As a result of checking the straightness of the platform, it was found that the difference between the values of measurements at different points does not exceed 25%. This indicates the straightness of the movement of all points of the working surface of the platform and, accordingly, the sieve. An electric motor with a speed of 50 Hz was started. Using a vibrometer "Walcom" WM6360 were measured values of movement of the working surface of the table. Then the selection of the unbalanced mass was performed at which the oscillation range of the platform corresponded to the standard values of industrial vibrating machines. Then the platform was loaded with a load of 25 kg, 55 kg and the experiment was repeated. A series of experiments to determine the main characteristics of the developed design of the vibrating machine in the mode of vibrating table and vibrating screen. The energy efficiency of the proposed design of the vibrator was also tested. Measurements of electric energy consumption at different speeds and with different vibrators are performed.

As a result of experimental studies, it was found that compared to a conventional inertial vibrating machine, the new machine has 15-25% higher productivity with 10-40% lower energy consumption. The unbalanced masses in the new vibrator are 4-6 times less than the unbalanced masses in the conventional inertial vibrator.

resonant vibrator, vibrating table, vibrating screen, car balancer, vibration, construction machinery

Одержано (Received) 13.02.2022

Прорецензовано (Reviewed) 02.03.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

АГРОІНЖЕНЕРІЯ

УДК 624.664

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)

Ю. В. Кулешков, проф., д-р техн. наук, **М. В. Красота**, доц., канд. техн. наук,
Т. В. Руденко, доц., канд. техн. наук, **О.Л. Пузирьов**, канд. техн. наук, **К.В. Зворигін**
Центральнотраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна
e-mail: r-t-v@mail.ua

Підвищення подачі шестеренних насосів засобів транспорту та сільськогосподарської техніки

Одним з напрямів подальшого вдосконалення конструкції шестеренних насосів гідроприводу сільськогосподарських машин та засобів транспорту є підвищення його питомих показників подачі. Математична модель подачі шестеренного насоса, що пропонується дозволяє визначити параметри зубчастого зачеплення, які мають найбільший вплив на питому подачу шестеренного насоса.

шестеренний насос, зубчате зачеплення, подача насоса, робочий об'єм насоса, коефіцієнт використання об'єму вінців шестерен

Постановка проблеми. Шестеренні насоси знайшли широке розповсюдження в гідросистемах тракторів, автомобілів, збиральних комбайнів, навантажувачів, косарок, сівалок і інших сільськогосподарських машин. Шестеренні насоси відрізняються надзвичайною простотою конструкції, мінімальною кількістю рухомих деталей, відсутністю зворотно-поступального руху, що викликає негативний вплив сил інерції; низькою собівартістю і простотою виготовлення; невибагливістю в експлуатації; високою надійністю і досить високими питомими технічними характеристиками. Шестеренному насосу властива найнижча чутливість до забруднення робочої рідини [1, 2, 4], що часто, є одним з визначальних чинників вибору типу насоса для експлуатації в умовах підвищеної запиленості, що характерно для сільськогосподарського виробництва [3].

Одним із перспективних напрямків подальшого розвитку шестеренного насоса є підвищення його подачі (продуктивності). І якщо проектування насоса з підвищеною подачею вирішується шляхом збільшення його габаритних розмірів - представляє собою інженерну задачу, то підвищення подачі при збереженні його габаритних розмірів, тобто підвищення питомої подачі і питомої потужності насоса є доволі складною науковою проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах Т.М. Башти [5, 10] представлені результати теоретично-емпіричного дослідження залежності габаритних розмірів НШ від параметрів зубчастого зачеплення (ЗЗ) його шестерень. У цьому Т.М. Баштою [5, 9] встановлено, що для зменшення габаритів НШ число зубів шестерень – z бажано вибирати якнайменше. З рис. 1 бачимо, що із зменшенням числа зубів із $z_3 = 18$ до $z_1 = 7$ габаритні розміри НШ зменшуються більш ніж удвічі за збереження робочого об'єму насоса (РОН).

Отже Т.М. Башта [5] встановив, що при проектуванні НШ для збільшення питомих показників з подачі рекомендується число зубів шестерень вибирати, якнайменшим, за інших рівних умов. При цьому швидкість зростання подачі НШ перевищує швидкість зростання її габаритних розмірів.

Сутність запропонованої Юдіним Є.М. [10] методики підвищення подачі НШ зводиться до одночасного впливу на РОН двох вихідних параметрів - КПС - ξ та коефіцієнта висоти головки зуба шестерень - χ . Обидва вказані коефіцієнти спрямовані на збільшення зовнішнього діаметра шестерень - D_e , що сприяє збільшенню РОН. Діяльність Козерода Ю.В. досліджувався вплив числа зубів шестерень - z та коефіцієнт профільного зміщення (КПЗ) - ξ на подачу НШ [3]

В роботі [11] визначено, що швидкості обертання шестерень і радіуси, що сполучають осі шестерень в точці зачеплення не рівні між собою. Це пояснюється відносним ковзанням евольвентних профілів шестерень під час їх обертання. Це явище є передумовою для подальшого розвитку та створення математичних моделей у контексті підвищення подачі шестеренних гідромашин.

Окрім цього найбільший вплив на підвищення подання НШ робить КПЗ на ЗЗ з мінімальним числом зубів [5]. Робота Лурье З.Я [8] присвячена багатокритерійній оптимізації параметрів ЗЗ НШ. У якості критеріїв оптимізації були вибрані параметри, визначальні якість роботи ЗЗ. До цих параметрів автори відносять: коефіцієнт перекриття зубчастого зачеплення (КПЗЗ) - ϵ , питомий коефіцієнт ковзання - λ , товщину зуба у вершини зуба - Se , а також відсутність інтерференції зубів шестерень. Робота присвячена дослідженню ММ ЗЗ, яка описує основні залежності розрахунку ЗЗ, з відповідними обмеженнями на область існування ЗЗ, а також взаємозв'язок параметрів ЗЗ з функціональними параметрами НШ. Але оскільки автори роботи [8] ставили завдання знайти оптимальні параметри, які б одночасно задовольняли багатьом критеріям працездатності ЗЗ усередині існуючої системи розрахунку, то природно, знайти відповідь, як підвищити питома подача НШ не вдалося.

Постановка завдання. Метою даної публікації є розробка математичної моделі подачі шестеренного насоса, яка дозволить розробити методику розрахунку зубчастого зачеплення насоса з підвищеною питомою подачею.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі досліджень:

1. Дослідити існуючі методи підвищення подачі шестеренного насоса.
2. Запропонувати критерій оптимізації параметрів зубчастого зачеплення шестеренного насоса в напрямку підвищення його питомої подачі.
3. Запропонувати методику розрахунку параметрів зубчастого зачеплення шестеренного насоса в напрямку підвищення його питомої подачі.

Викладення основного матеріалу. Подачу шестеренного насоса визначають у відповідно до залежності [6]:

$$Q = q n = 0,5 \pi b (D_e^2 - d^2 - 0,333 t_0^2) n, \quad (1)$$

де q – робочий об'єм шестеренного насоса, мм³;

b – ширина шестерні, мм;

D_e – зовнішній діаметр шестерень насоса, мм;

d – діаметр початкового кола, мм;

t_0 – крок зачеплення по основному колу, мм;

n – частота обертання приводу насоса об/с.

Із залежності (1) бачимо, що підвищити подачу шестеренного насоса можливо, як за рахунок збільшення робочого об'єму насоса (РОН), так і за рахунок підвищення частоти обертання, так і

Підвищення частоти обертання приводу насоса є перспективним методом, але вирішувати його необхідно на рівні надсистеми - шляхом збільшення частоти обертання приводу насоса.

У цій публікації наведені шляхи підвищення подачі через збільшення РОН.

Складові залежності (1) можна представити у вигляді:

– зовнішній діаметр шестерень:

$$D_e = \frac{d_0}{\cos \gamma_e}; \quad (2)$$

– діаметр початкового кола:

$$d = \frac{d_0}{\cos \alpha}; \quad (3)$$

– крок зачеплення по основному колу:

$$t_0 = \frac{d_0 \pi}{z}; \quad (4)$$

– діаметр основного кола:

$$d_0 = m z \cos \alpha_0, \quad (5)$$

де γ_e – кут верхівки евольвенти зубця шестерні, град;

α – кут зачеплення, град.

З математичної моделі подачі (1) - (5) бачимо, що РОН насоса залежить від наступних параметрів: ширини вінців шестерень – b , зовнішнього діаметру шестерень – D_e , від числа зубців шестерень – z , модулю зачеплення – m , коефіцієнту профільного зміщення – ξ і коефіцієнту висоти головки зубця – χ .

Звичайно підвищення подачі шестеренного насоса пов'язані із зростанням габаритних розмірів робочих елементів насоса – шестерень, що викликає також зростання габаритних розмірів і маси, як всього качаючого вузла, так і насоса в цілому. Такі методи підвищення подачі звичайно відносяться до екстенсивних шляхів розвитку. Ці методи вичерпали свої можливості і не сприяють підвищенню технічного рівня шестеренного насоса за питомими показниками.

Підставивши залежності (2) - (5) в (1), після перетворень отримаємо формулу для визначення РОН у вигляді:

$$V_0 = 0,5 \pi b m^2 z^2 \cos^2 \alpha_0 \cdot \left[\left(\frac{1}{\cos \gamma_e} \right)^2 - \left(\frac{1}{\cos \alpha} \right)^2 - 0,333 \left(\frac{\pi}{z} \right)^2 \right]. \quad (6)$$

Із залежності (6) можна побачити які параметри впливають на РОН.

Досконалість зубчатого зачеплення насоса по подачі нами пропонується визначати за допомогою коефіцієнта використання об'єму вінців шестерень (КВОВШ). Цей безрозмірний коефіцієнт визначається, як відношенням робочого об'єму насоса до об'єму, що займається вінцями шестерень насоса:

$$K_V = \frac{V_0}{D_e b (0,25 \pi D_e + d)}. \quad (7)$$

Підставивши в залежність (7) значення робочого об'єму з (1), отримаємо:

$$K_V = 0,5 \pi \frac{(D_e^2 - d^2 - 0,333 t_0^2)}{(0,25 \pi D_e^2 + d D_e)}. \quad (8)$$

Після підстановки в залежність (8) значення складових з (2), (3), (4) і (5), отримаємо:

$$K_V = 0,5 \pi \frac{\left(1 - \frac{\cos^2 \gamma_e}{\cos^2 \alpha} - \frac{\pi^2 \cos^2 \gamma_e}{3 z^2} \right)}{\left(0,25 \cdot \pi + \frac{\cos \gamma_e}{\cos \alpha} \right)}. \quad (9)$$

Використовуючи безрозмірний КВОВШ - K_v можна легко оцінити переваги зубчатого зачеплення будь-яких двох пар шестерень по подачі.

Із залежностей (8) і (9), бачимо, що КВОВШ не залежить від модуля зачеплення - m , що є несподіваним результатом, адже відомо, що модуль грає велику роль в підвищенні подачі насоса. Відомо, що модуль зубчатого зачеплення грає роль масштабного коефіцієнта, тобто із зростанням модуля зростає РОН, але при цьому ростуть габаритні розміри і маса насоса. Тому підвищення РОН за рахунок збільшення модуля зубчатого зачеплення має свої обмеження, більш того така методика збільшення подачі не в змозі забезпечити підвищити питому подачу, а значить і не підвищує технічний рівень насоса по цьому параметру.

В процесі дослідження залежностей (8) і (9) нами були виявлені параметри зубчатого зачеплення, які мають найбільш істотний вплив на КВОВШ:

- зміна зовнішнього діаметру шестерень - ΔD_e , мм;
- зміна початкового діаметру - Δd , мм;
- профільне зміщення шестерень - ξm , мм;
- висота головки зуба - χm , мм.

На рис. 1, в порівнянні, представлені графічні залежності КВОВШ від вказаних параметрів зубчатого зачеплення.

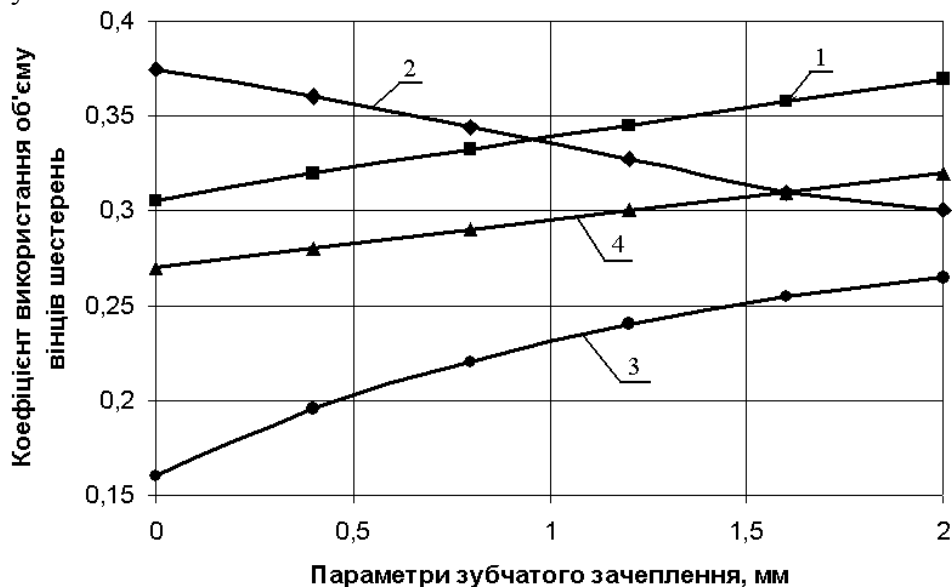


Рисунок 1 – Графіки залежності КВОВШ - K_v від різних параметрів зубчатого зачеплення:

- 1 – від зміни зовнішнього діаметру шестерень - ΔD_e , 2 – від зміни діаметру початкового кола - Δd ,
3 – від профільного зміщення - ξm і 4 – від висоти головки зуба - χm

Джерело: розроблено авторами

Аналізуючи графічні залежності, представлені на рис. 1, бачимо, що найбільший вплив на КВОВШ - K_v має профільне зміщення - ξm , далі зміна зовнішнього діаметру шестерень - ΔD_e і висота головки зуба - χm . Залежність КВОВШ - K_v від діаметру початкового кола - Δd носить спадаючий характер.

Крім цього, дослідженнями було встановлено, що визначальну роль на величину КВОВШ - K_v насоса грає число зубців шестерень. Для визначення цієї залежності використовували метод чисельного експерименту. При цьому задавалися наступними початковими даними:

- числом зубців - $z = 5...25$;
- модулем зачеплення - $m = 5 \text{ мм}$;
- кутом початкового профілю - $\alpha_0 = 20^\circ$;
- коефіцієнтом профільного зміщення, який приймаємо $\xi = 0,6$ (для насосів типу НШ-32 УК).

Знайшовши першу похідну від функції залежності КВОВШ - K_v (9) по числу зубців отримаємо залежність для розрахунку швидкості зміни КВОВШ.

На рис. 2 представлені результати досліджень – графіки залежності КВОВШ - K_v і швидкості зміни КВОВШ - V_{K_v} від числа зубців шестерень.

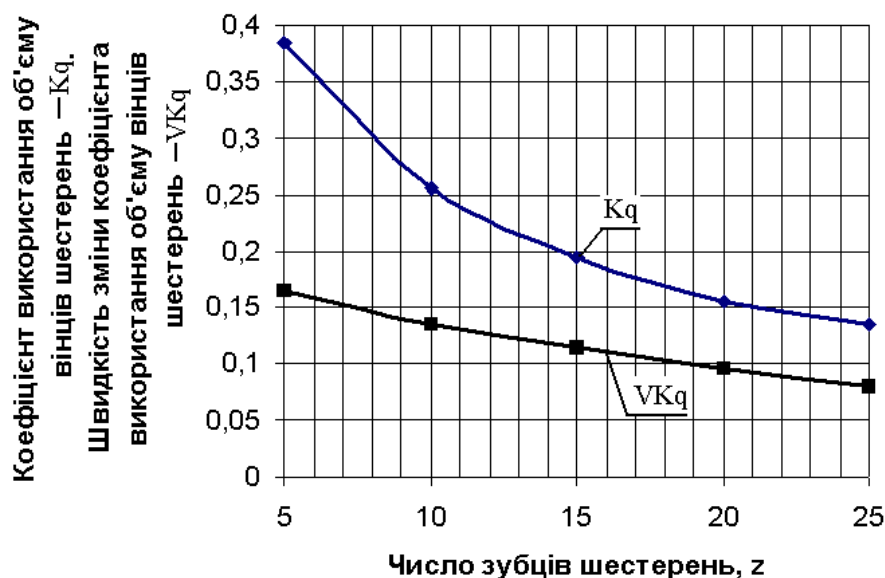


Рисунок 2 – Характер залежності КВОВШ - K_v і швидкості зміни КВОВШ - V_{K_v} , при зміні числа зубців – на інтервалі $z = 5...25$

Джерело: розроблено авторами

Проведеними дослідженнями виявлений впливу параметрів зубчатого зачеплення на КВОВШ - K_v , що дозволяє намітити шляхи вдосконалення зубчатого зачеплення шестеренного насоса у напрямі підвищення його КВОВШ- K_v .

Отримана математична модель дозволяє розробити методику розрахунку зубчатого зачеплення шестеренного насоса із збільшеним КВОВШ - K_v . А підвищення КВОВШ - K_v безпосереднім чином пов'язано з підвищенням РОН і подачі шестеренного насоса:

$$V_0 = K_v \cdot D_e \cdot b \cdot (0,25 \pi D_e + d). \quad (10)$$

Подальші дослідження передбачається провести шляхом досліджень експериментальних зразків насосів з підвищеною питомою подачею.

Із залежності (10), бачимо, що КВОВШ - K_v визначає яку частину об'єму, займаного вінцями шестерень складає РОН і тим самим характеризує переваги зубчатого зачеплення по питомій подачі.

Висновки

1. Отримана математична модель робочого об'єму шестеренного насоса дозволяє використовувати її для оптимізації зубчатого зачеплення у напрямі підвищення питомої подачі шестеренного насоса.

2. Результати вищенаведених дослідження, а також виробничий досвід свідчить про те, що найбільш істотний вплив на КВОВШ - K_v надає число зубців шестерень насоса - z . При цьому зменшення числа зубців сприяє збільшенню КВОВШ. Мінімальне число зубців працездатного зубчатого зачеплення, яке зараз використовується в промисловості складає $z = 8$ зубців, що є класичним числом зубців шестерень насосів з середнім значенням РОН - $q = 32 \dots 50 \text{ см}^3$

3. Після вибору певного числа зубців і початкового діаметру - конкуруючими параметрами, що найбільш істотно впливають на збільшення КВОВШ, - K_v є профільне зміщення - ξ_m , зміна зовнішнього діаметру шестерень - ΔD_e і висота головки зубця - χ_m .

Список літератури

1. Аврунин Г. А., Кабаненко И. В., Хавиль В. В. Анализ современного технического уровня гидрообъемных передач. *Вибрации в технике и технологиях*. 2003. № 4 (30). С. 3 - 6.
2. Барышев В.И. Повышение технического уровня и надежности гидропривода тракторов и сельхозмашин в эксплуатации: автореф. дисс. на соискание учен. степени докт. техн. наук. Челябинск, 1989. 26 с.
3. Козерод Ю.В. Исследование влияния геометрических параметров зацепления на качественные показатели шестеренного насоса: автореферат дисс. на соискание учен. степени канд. техн. наук. Москва, 1977. 17 с.
4. Башта Т.М. Расчеты и конструкция самолетных гидравлических устройств. Изд. 3-у перераб. и доп. Гос. научно-технич. издат. Оборонгиз. М.: Машиностроение, 1961. 475 с.
5. Башта Т.М. Объемные насосы и гидравлические двигатели гидросистем: учебник для ВУЗов. М.: Машиностроение, 1974. 606 с.
6. Кулешков Ю.В. Оценка методов определения объемной подачи шестеренных насос НШ. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2004. Вип. 34. С. 178-186.
7. Лурье З.Я., Коваленко И.В. Математическая модель качающего узла шестеренного насоса, как объекта многокритериальной оптимизации. *Вибрации в технике и технологиях*. 2003. Вип. 3(29). С.9-13
8. Основы теории и конструирования объемных гидропередач / Кулагин Л.В. и др; под ред. д.т.н., проф. В.Н. Прокофьева. М.: Высшая школа, 1968. 399 с.
9. ГСТУ 3-25-180-97. Насоси шестеренні об'ємного гідроприводу. Технічні умови. Мінпром політики України. Київ, 1998. 48 с.
10. Юдин Е.М. Шестеренные насосы. Основные параметры и их расчет. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1964. 236 с.
11. Yuri V. KULESHKOV, Timofey V. RUDENKO, Mikhailo V. KRASOTA, Miroslav BOŠANSKÝ, František TÓTH . Performance features of tooth gearing in gear hydraulic machines. *Acta Technologica Agriculturae 2 Nitra, Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae*, 2021, pp. 84–91

References

1. Avrunin, G., Kabanenko, I. & Havi, V (2003). Analiz sovremennogo tehničeskogo urovny gidroobemnyh peredach [Analysis of the current technical level of hydrostatic transmissions] . *Vibracii v tehnike s tehnologiyh – Vibrations in engineering and technology*, 4 (30), 3 - 6 [in Ukrainian].
2. Baryshev, V. (1989). Povyshenie tehničeskogo urovny i nadygnosti gidroprivoda traktorov i selhozmashin v ekspluo-tacii [Improving the technical level and reliability of the hydraulic drive of tractors and agricultural machines in operation] . *Extended abstract of doctor's thesis*. Chelybinsk [in Russian].
3. Kozerod, Y. (1977). Issledovanie vliyaniya geometricheskikh parametrov zacepleniya na kachestvennue pokazateli shesterennogo nasosa [Study of the influence of the geometrical parameters of the gearing on the quality indicators of the gear pump] . *Extended abstract of candidate's thesis*. Moscow [in Russian].
4. Bashta, T.M. (1961). *Rascheti i konstruktsiya samoletnykh gidravlicheskih ustroystv* [Calculations and design of aircraft hydraulic devices]. (3d ed.). Gos. nauch-tehn. izdat. Oborongiz. Moscow [in Russian].

5. Bashta, T.M. (1974). *Ob'emnye nasosy i gidravlicheskie dvigateli gidrosistem* [Positive displacement pumps and hydraulic motors for hydraulic systems]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
6. Kuleshkov, Yu.V. (2004). Otsenka metodov opredeleniya ob'yemnoy podachi shesterennykh nasos NSH [Assessment of methods for determining the volumetric flow of gear pump NSH]. *Konstruiuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil's'kohospodars'kykh mashyn: zahal'noderzh.mizhvid.nauk.-tekhn. zb. – Design, manufacture and operation of agricultural machinery, Vol. 34*. 178-186 [in Ukrainian].
7. Lur'ye, Z.Ya. & Kovalenko, I.V. (2003). Matematicheskaya model' kachayushchego uzla shesterennogo nasosa, kak ob'yekta mnogokriterial'noy optimizatsii [Mathematical model of the pumping unit of a gear pump as an object of multi-criteria optimization]. *Vibratsii v tekhnike i tekhnologiyakh – Vibrations in engineering and technology*, 3 (29), 9-13 [in Ukrainian].
8. Kulagin, L. Demidov, Y., Prokofiev, V. & Kondakov, A. (1968). *Osnovy teorii i konstruirovaniya ob'emnykh gidroperedach* [Fundamentals of the theory and design of volumetric hydraulic transmissions]. Moscow: Vysshaya shkola [in Russian].
9. Nasosy shesterenni obemnogo gidropuvodu [Gear pump of volumetric hydraulic drive]. (1998). *Tekhnichni umovu GSTU 3-25-180-97*. Kyiv: Minprompolituka Ukrainy [in Ukrainian].
10. Ydin, E. (1964). Shesterennue nasosy [Gear pumps]. *Basic parameters and their calculation*. (2d ed.). Moscow Mashinostroenie [in Russian].
11. Yuri V. Kuleshkov, Timofey V. Rudenko, Mikhaïlo V. Krasota, Mirosław Bosansky & František Toth (2021). Performance features of tooth gearing in gear hydraulic machines. *Acta Technologica Agriculturae* 2 Nitra, Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae, pp. 84–91

Yuriy Kuleshkov, Prof., Dsc., **Mykhailo Krasota**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Timofey Rudenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olexandr Puzyrov**, PhD tech. sci., **Kyrylo Zvoryhin**, master
 Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Increasing the Supply of Gear Pumps for Vehicles and Agricultural Machinery

The purpose of this publication is to develop a mathematical model of the gear pump, which will develop a method for calculating the gearing of the pump with increased specific feed. One of the promising areas for further development of the gear pump is to increase its supply. And if the design of the pump with high flow is solved by increasing its dimensions - is an engineering problem, then increase the flow while maintaining its dimensions, ie increase the specific flow and specific power of the pump is a rather difficult scientific problem.

Using the dimensionless GCUR - it is possible to estimate easily advantages of gearing of any two pairs of gear wheels on giving. From the dependences we see that the GCUR does not depend on the gearing module, which is an unexpected result, because it is known that the module plays a major role in increasing the supply of the pump. It is known that the gearing module plays the role of a scale factor, that is, with the growth of the module increases the RON, but the overall dimensions and weight of the pump increase. Therefore, increasing the RON by increasing the gearing module has its limitations, moreover, this method of increasing the feed is not able to increase the specific feed, and therefore does not increase the technical level of the pump on this parameter

The results of the above studies, as well as production experience, show that the most significant effect on the volume utilization of the gear rings has the number of teeth of the pump gears. At the same time, reducing the number of teeth helps to increase the utilization rate of the gear rings. The minimum number of gear teeth $z = 8$ currently in use in the industry is teeth, which is the classic number of teeth of pump gears with an average value of working volume $-q = 32 \dots 50 \text{ cm}^3$.

gear pump, gearing, pump feed, pump displacement, gear crown utilization ratio

Одержано (Received) 09.03.2022

Прорецензовано (Reviewed) 18.03.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

УДК 633.521

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.204-215](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.204-215)**А.С. Лімонт**, доц., канд. техн. наук*Житомирський агротехнічний коледж, м. Житомир, Україна**e-mail: andrespartak@ukr.net***З.А. Лімонт***Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна*

Коренева система рослин і характеристики стебел льону-довгунця

В статті досліджені характеристики стебел льону-довгунця залежно від маси коріння однієї рослини та її частки в загальній масі рослин. В якості характеристик стебел прийняті висота рослин, маса насіння з однієї рослини, зігнутість стебел, кількість рослин з рівним стеблом (%), вміст деревини в 10-сантиметровому відрізку стебла на відстані від сім'ядольних листочків до 10 см, 10–20 і 20–30 см, а також вихід волокна з технічної частини стебла.

На підставі кореляційно-регресійного аналізу експериментальних даних про масу коріння однієї рослини льону-довгунця, а також частку маси коріння в загальній масі рослин і досліджуваних характеристик стебел, які наведені в літературних джерелах, з'ясовано, що зміна висоти рослин, маси насіння з однієї рослини, кількості рослин з рівним стеблом (%) та вмісту деревини в 10-сантиметровому відрізку стебла на відстані до 10 см від сім'ядольних листочків залежно від частки маси коріння в загальній масі рослин описується рівняннями прямолінійної регресії з додатними кутовими коефіцієнтами. Залежно від цієї ж факторіальної ознаки зміна зігнутості стебел описується рівнянням спадної степеневих функції.

льон-довгунець, рослина, коріння, надземна частина, стебло, маса, характеристики стебла, зв'язок

Постановка проблеми. В Україні крім інших дослідників вивченням технології вирощування льону-довгунця займалися Л.Д. Фоменко [1], Н.Г. Городній [2] та його учні і послідовники. Серед низки досліджуваних питань науковці вивчали масу коріння рослин льону-довгунця та її вплив на урожай льону-довгунця. В якості показників урожаю льону-довгунця крім урожайності льонопродукції досліджували стеблостій культури перед збиранням і розмірні характеристики стебел. Про вплив маси кореневої системи рослин на родючість ґрунтів вказано і в праці [3], а в статті [4] наведено результати досліджень кореневої системи рослин льону-довгунця і деяких показників надземної частини рослин культури. Проте в проблемі наукового забезпечення технології вирощування льону-довгунця і оцінювання кореневої системи рослини цієї культури поки що залишалася ще нез'ясованою низка питань. Про деякі з таких питань і буде йти мова в цьому повідомленні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В дослідженнях [1, 2] визначення маси кореневої системи рослин льону-довгунця здійснювали при оцінюванні різних знарядь та способів і прийомів основного обробітку ґрунту.

За даними Л.Д. Фоменка [1] маса повітряно-сухого коріння льону-довгунця з одного квадратного метра орного шару (0–20 см) льонища у фазі цвітіння залежно від досліджуваних прийомів (способів) основного обробітку ґрунту коливалася в межах від 413 до 583 г/м². При цьому мінімальне значення маси коріння 413 г/м² спостерігалось за зяблевої безполицевої оранки на глибину 20–22 см. Максимальне значення маси коріння 583 г/м² відмічено за зяблевої оранки на 20–22 см з розпушуванням дна борозни на глибину 5–7 см ґрунтопоглиблювачами. Усереднено за всіма

досліджуваними прийомами обробітку ґрунту значення маси коріння (середнє арифметичне значення) становило 490 г/м^2 за середнього квадратичного відхилення $51,0 \text{ г/м}^2$. Коефіцієнт варіації такого емпіричного розподілу маси коріння дорівнював 10,4%.

Серед оцінних показників способів основного обробітку ґрунту, а, отже, і маси кореневої системи рослин льону-довгунця Л.Д. Фоменко [1] поряд з іншими параметрами урожаю (урожайністю насіння і волокна та густотою стеблостою перед збиранням) визначав і деякі морфологічні ознаки рослин, зокрема висоту і товщину (діаметр) стебел. Дослідженнями Н.А. Дьяконова [5], який працював на Псковській сільськогосподарській дослідній станції, встановлено, що між загальною висотою рослин льону-довгунця і вмістом в ній волокна існує додатний кореляційний зв'язок з коефіцієнтом кореляції 0,190. Між товщиною рослин і вмістом в них волокна за висловлюванням Н.А. Дьяконова існує досить різка від'ємна кореляція з коефіцієнтом кореляції мінус 0,400. Проте кількісного зв'язку між досліджуваними ознаками Н.А. Дьяконов не з'ясував.

За дослідженнями [2] коренева маса рослин льону-довгунця в повітряно-сухому стані у фазі ранньої жовтої стиглості на повній глибині проникнення в ґрунт залежно від використовуваних знарядь для основного обробітку ґрунту на гектарній площі коливалася від 11,9 до 13,4 ц/га. При цьому коріння проникало в ґрунт на 110–120 см, але основна маса його розміщувалась в шарі ґрунту глибиною від 0 до 20 см. В дослідженні М.Г. Городнього [2] і його співавторів за оранки плугом з передплужником, лемішного і дискового луцення та одержання кореневої маси рослин льону-довгунця відповідно 13,4 ц/га, 12,8 і 11,9 ц/га урожайність носіння в тій же послідовності становила 4,55 ц/га та 4,24 і 3,80 ц/га при урожайності соломи відповідно 40,3 ц/га та 35,8 і 31,2 ц/га. Отже, із збільшенням кореневої маси рослин урожайність льонопродукції зростала.

За розрахунками з використанням даних [2] частка маси коріння в загальній масі коріння і надземної частини рослин коливалася від 20,1 до 22,1%. В праці [6] В.В. Лиховора і В.Ф. Петриченка вказано, що маса кореневої системи льону-довгунця не перевищує 8–10% маси всієї рослини і основна частина (80%) маси коріння розташовується в орному шарі ґрунту.

З наведених даних випливає, що в літературних джерелах відсутня інформація про масу кореневої системи однієї рослини льону-довгунця та її зв'язок з характеристиками надземної частини рослин. Таку інформацію можна отримати з використанням експериментальних даних К. Бачяліса [4], який на Упітській дослідній станції Литовського науково-дослідного інституту землеробства вивчав стійкість різних сортів льону-довгунця проти (до) вилягання. Рослини вирощували в вегетаційному будиночку в посудинах Мітчерліха, що вміщали 7 кг ґрунту. У фазі ранньої жовтої стиглості в рослинах відмивали кореневу систему і визначали масу коріння рослин і надземної частини рослин.

Постановка завдання. Таким чином, мета статті полягала в дослідженні характеристик стебел льону-довгунця залежно від маси коріння однієї рослини та її частки в загальній масі рослин. В якості характеристик стебел з урахуванням досліджень К. Бачяліса [4] прийняті висота рослин, маса насіння з однієї рослини, зігнутість стебел, кількість рослин з рівним стеблом (%), вміст деревини в 10-сантиметровому відрізку стебла на відстані від сім'ядольних листочків до 10 см, 10–20 і 20–30 см та вихід волокна з технічної частини стебла. *Завдання дослідження:* 1) з використанням експериментальних даних К. Бачяліса розрахувати масу коріння рослин

досліджуваних сортів льону-довгунця; 2) визначити основні статистичні показники варіаційних рядів і емпіричних розподілів маси коріння однієї рослини льону-довгунця, частки маси коріння в загальній масі рослин, висоти рослин, маси насіння з однієї рослини, зігнутої стебел, кількості рослин з рівним стеблом (%), вмісту деревини в 10-сантиметровому відрізку стебла на відстані до 10 см, 10–20 і 20–30 см від сім'ядольних листочків та виходу волокна із технічної частини стебла; 3) визначитися з результативними і факторіальними ознаками в дослідженні та опрацювати відповідні двомірні варіаційні рядки; 4) з використанням опрацьованих двомірних варіаційних рядів здійснити кореляційний аналіз результативних і факторіальних ознак з визначенням коефіцієнтів кореляції між результативними і факторіальними ознаками та кореляційних відношень результативних ознак на факторіальні; 5) з використанням результатів кореляційного аналізу висловити припущення щодо можливості форми зв'язку між результативними і факторіальними ознаками; 6) для остаточного з'ясування форми зв'язку між досліджуваними ознаками з використанням стандартних комп'ютерних програм здійснити вирівнювання експериментальних значень результативних ознак залежно від факторіальних рівняннями прямих та низкою криволінійних функцій з розрахунком для кожної з них R^2 -коефіцієнта; 7) за значеннями R^2 -коефіцієнтів вибрати прогностичну функцію, рівняння регресії якої забезпечує найбільшу вірогідність наближення експериментальних значень результативної ознаки до вирівняних за відповідною апроксимуючою залежністю; 8) розрахувати помилки опрацьованих модельних рівнянь регресії результативних ознак на факторіальні та коефіцієнти детермінації відповідних кореляційних зв'язків і рівнянь регресії; 9) дати графічну інтерпретацію виявлених зв'язків та зробити відповідні висновки і висловити можливий напрям практичної реалізації результатів дослідження.

Об'єкт і методика дослідження. Об'єкт дослідження – експериментальні дані К. Бачяліса [4] щодо вивчення стійкості проти (до) вилягання 22 сортів льону-довгунця колишньої радянської і зарубіжної селекції. Дослідження, що спрямовані на пошук і з'ясування якісних і кількісних зв'язків між масою кореневої системи рослин і характеристиками стебел льону-довгунця, виконані з використанням основних засад математичної статистики і зокрема кореляційно-регресійного аналізу [7–10].

Виклад основного матеріалу. Масу коріння однієї рослини льону-довгунця визначали як частку від ділення маси абсолютно сухого коріння в посудині Мітчерліха (дані К. Бачяліса) на кількість рослин в посудині (45 рослин за тими ж даними). Залежно від сорту льону-довгунця маса абсолютно сухого коріння в посудині коливалася від 3,99 до 8,64 г. Решта експериментальних даних, що визначені нами в якості характеристик стебел льону-довгунця, запозичені із праці [4]. Назви визначених нами характеристик повністю збігаються з назвою показників надземної частини рослин льону-довгунця, що визначав К. Бачяліс.

В табл. 1 наведені основні статистичні показники досліджуваних емпіричних розподілів, що характеризують масу коріння з однієї рослини та визначені характеристики стебел.

Таблиця 1 – Основні статистичні показники досліджуваних емпіричних розподілів

№ з/п	Досліджувана ознака	Розмах варіювання	Середнє арифметичне значення	Середнє квадратичне відхилення	Коефіцієнт варіації, %
1	Маса абсолютно сухого коріння однієї рослини $m_{кр}$, мг	89–192	138	29,3	21,2
2	Частка маси коріння в загальній масі рослин λ_k , %	19,5–32,9	25,8	3,72	14,4
3	Висота рослин h_p , %	77,2–132,6	113,1	10,12	8,9
4	Маса насіння з однієї рослини m_n , %	93,2–144,7	112,3	12,44	11,1
5	Зігнутість стебел $З_{ст}$, %	22,7–104,0	54,5	25,05	45,9
6	Кількість рослин з рівним стеблом $Ч_{рс}$, %	2,0–37,0	21	11,0	52,4
7	Вміст деревини в 10-сантиметровому відрізку стебла на відстані до 10 см від сім'ядольних листочків $B_{д1}$, %	16,9–19,4	18,0	0,74	4,1
8	Те ж на відстані 10–20 см від сім'ядольних листочків $B_{д2}$, %	13,2–14,9	14,1	0,46	3,3
9	Вміст деревини в 10-сантиметровому відрізку стебла на відстані 20–30 см від сім'ядольних листочків $B_{д3}$, %	11,6–13,2	12,2	0,35	2,9
10	Вихід волокна з технічної частини стебла $B_{вс}$, %	23,3–33,9	27,4	2,90	10,6

Джерело: розроблено авторами

З табл. 1 видно, що в досліджуваних сортах льону-довгунця маса абсолютно сухого коріння однієї рослини коливалася від 89 до 192 мг за середнього арифметичного значення і середнього квадратичного відхилення відповідно 138 і 29,3 мг та коефіцієнта варіації розподілу 21,2%. Розподіл частки маси коріння в загальній масі рослин за розмаху варіювання 19,5–32,9% мав середнє арифметичне значення і середнє квадратичне відхилення відповідно 25,8 і 3,72% за коефіцієнта варіації 14,4%. Мінливість висоти рослин і маси насіння з однієї рослини характеризувалася коефіцієнтами варіації відповідно 8,9 і 11,1%. Мінливість зігнутості стебел і кількості рослин з рівним стеблом характеризувалася значно більшими коефіцієнтами варіації, що мали значення відповідно 45,9 і 52,4%. Вміст деревини в 10-сантиметровому відрізку стебла із зміщенням його від сім'ядольних листочків ближче до верхівкової частини стебла за дослідженнями зменшувався від 18,0 до 12,2% з одночасним зменшенням коефіцієнта варіації цієї ознаки в досліджуваних сортах льону-довгунця від 4,1 до 2,9%. Вихід волокна з технічної частини стебла в досліджуваних сортах льону-довгунця коливався в межах від 23,3 до 33,9% за коефіцієнта варіації 10,6%.

В дослідженні в якості результативних ознак прийняті визначені характеристики стебел, а в якості факторіальних – частка маси коріння в загальній масі рослин, маса коріння однієї рослини і маса насіння з однієї рослини та висота рослин. Результати кореляційно-регресійного аналізу результативних і факторіальних ознак в дослідженні кореневої системи і характеристик стебел льону-довгунця, прогностичні функції і опрацьовані модельні рівняння регресії результативних ознак на факторіальні наведені в табл. 2. В цій же таблиці наведені значення R^2 -коефіцієнтів, що характеризують міру наближення експериментальних значень досліджуваних результативних ознак до їх вирівняних величин за прогностичною апроксимуючою функцією. Тут же наведені розраховані помилки рівнянь регресії та визначені коефіцієнти детермінації.

Таблиця 2 – Результати кореляційно-регресійного аналізу результативних і факторіальних ознак в дослідженні кореневої системи і характеристик стебел льону-довгунця

Результативна ознака	Коефіцієнт кореляції r	Кореляційне відношення η	Прогностична функція (чисельник) і рівняння регресії (знаменник)	R^2 -коефіцієнт	Помилка рівняння регресії S_y	Коефіцієнт детермінації k_d
1	2	3	4	5	6	7
Факторіальна ознака – частка маси коріння в загальній масі рослин λ_k , %						
Висота рослин h_p , %	0,061	0,069	Прямолінійна з додатним кутовим коефіцієнтом $h_p = 109,32 + 0,162 \lambda_k$	0,0037	10,1	0,0035
Маса насіння з однієї рослини m_n , %	0,114	0,141	Прямолінійна з додатним кутовим коефіцієнтом $m_n = 102,2 + 0,39 \lambda_k$	0,013	12,4	0,020
Зігнутість стебел $3_{ст}$, %	-0,713	0,722	Спадна степенева $3_{ст} = 85663,86 \lambda_k^{-2,304}$	0,521	17,6	0,521
Кількість рослин з рівним стеблом $Ч_{рс}$, %	0,759	0,765	Прямолінійна з додатним кутовим коефіцієнтом $Ч_{рс} = 2,24 \lambda_k - 36,83$	0,576	7,2	0,585
Вміст деревини в 10-сантиметровому відрізку стебла на відстані до 10 см від сім'ядольних листочків $B_{дл}$, %	0,444	0,435	Прямолінійна з додатним кутовим коефіцієнтом $B_{дл} = 15,91 + 0,082 \lambda_k$	0,197	0,7	0,189
Маса коріння однієї рослини $m_{кр}$, мг						
Зігнутість стебел $3_{ст}$, %	-0,706	0,720	Спадна степенева $3_{ст} = 2,2176 m_{кр}^{-1,543}$	0,518	17,4	0,518
Кількість рослин з рівним стеблом $Ч_{рс}$, %	0,779	0,787	Сповільнено зростаюча гіпербола $Ч_{рс} = 57,82 - 4781,91 / m_{кр}$	0,620	6,8	0,619
Маса насіння з однієї рослини m_n , %						
Зігнутість стебел $3_{ст}$, %	0,013	0,051	Прямолінійна з додатним кутовим коефіцієнтом $3_{ст} = 51,55 + 0,026 m_n$	0,00017	25,0	0,0026
Кількість рослин з рівним стеблом $Ч_{рс}$, %	-0,071	0,060	Прямолінійна з від'ємним кутовим коефіцієнтом $Ч_{рс} = 28,03 - 0,0626 m_n$	0,005	11,0	0,0036
Висота рослин h_p , %						
Зігнутість стебел $3_{ст}$, %	0,102	0,071	Прямолінійна з додатним кутовим коефіцієнтом $3_{ст} = 33,1 + 0,187 h_p$	0,0104	25,0	0,005
Кількість рослин з рівним стеблом $Ч_{рс}$, %	$-0,264 \cdot 10^{-3}$	$0,264 \cdot 10^{-3}$	Прямолінійна з від'ємним кутовим коефіцієнтом $Ч_{рс} = 21,00 - 0,000197 h_p$	$0,7 \cdot 10^{-7}$	11,7	$0,7 \cdot 10^{-7}$

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5	6	7
Маса насіння з однієї рослини m_n , %	-0,336	0,330	Прямолінійна з від'ємним кутовим коефіцієнтом $m_n = 159,14 - 0,413 h_p$	0,113	11,7	0,109
Вміст деревини в 10-сантиметровому відрізку стебла на відстані від сім'ядольних листочків:						
до 10 см $B_{д1}$, %	-0,077	0,077	Прямолінійна з від'ємним кутовим коефіцієнтом $B_{д1} = 18,62 - 0,0052 h_p$	$0,590 \cdot 10^{-2}$	0,7	$0,590 \cdot 10^{-2}$
10–20 см $B_{д2}$, %	0,018	0,002	Прямолінійна з додатним кутовим коефіцієнтом $B_{д2} = 14,09 + 0,000092 h_p$	$0,324 \cdot 10^{-3}$	0,5	$0,4 \cdot 10^{-5}$
20–30 см $B_{д3}$, %	-0,046	0,046	Прямолінійна з додатним кутовим коефіцієнтом $B_{д3} = 11,84 + 0,00316 h_p$	$0,212 \cdot 10^{-2}$	0,3	$0,212 \cdot 10^{-2}$
Вихід волокна з технічної частини стебла $B_{вс}$, %	0,327	0,321	Прямолінійна з додатним кутовим коефіцієнтом $B_{вс} = 16,74 + 0,094 h_p$	0,107	2,7	0,103

Джерело: розроблено авторами

З табл. 2 простежується, що зміна висоти рослин, маси насіння з однієї рослини, кількості рослин з рівним стеблом (%), вмісту деревини в 10-сантиметровому відрізку стебла на відстані до 10 см від сім'ядольних листочків залежно від частки маси коріння в загальній масі рослин, зігнутості стебел залежно від маси насіння з однієї рослини та зігнутості стебел, вмісту деревини в 10-сантиметровому відрізку стебла на відстані від сім'ядольних листочків 10–20 і 20–30 см, виходу волокна з технічної частини стебла залежно від висоти рослин описується рівняннями прямолінійної регресії з додатними кутовими коефіцієнтами. Зміна кількості рослин з рівним стеблом (%) залежно від маси насіння з однієї рослини і висоти рослин, а також кількості рослин з рівним стеблом (%) і вмісту деревини в 10-сантиметровому відрізку стебла на відстані до 10 см від сім'ядольних листочків залежно від висоти рослин описується рівняннями прямолінійної регресії з від'ємними кутовими коефіцієнтами. Зміна зігнутості стебел залежно від маси коріння однієї рослини і частки цієї маси в загальній масі рослин описується рівняннями спадних степеневих функцій. Зміна кількості рослин з рівним стеблом (%) залежно від маси коріння однієї рослини описується рівнянням сповільнено зростаючої гіперболи.

Найбільш тісний кореляційний зв'язок за дослідженнями виявлено між зігнутістю стебел і масою коріння однієї рослини (від'ємна кореляція) з коефіцієнтом кореляції мінус 0,706, між зігнутістю стебел і часткою маси коріння в загальній масі рослин (від'ємна кореляція) з коефіцієнтом кореляції мінус 0,713, між кількістю рослин з рівним стеблом (%) і часткою маси коріння в загальній масі рослин та масою коріння однієї рослини (в обох випадках додатна кореляція) з коефіцієнтами кореляції відповідно 0,759 і 0,779. В досліджуваних зв'язках кореляційні відношення дещо перевищували значення коефіцієнтів кореляції. Менш тісний додатний кореляційний зв'язок виявлено між вмістом деревини в 10-сантиметровому відрізку стебла на відстані 10 см від сім'ядольних листочків і часткою маси коріння в загальній масі рослин (коефіцієнт кореляції 0,444) та між виходом волокна з технічної частини стебла і висотою рослин (коефіцієнта кореляції 0,327). Від'ємну кореляцію з коефіцієнтом

кореляції мінус 0,336 виявлено між масою насіння з однієї рослини і висотою рослин. В цих досліджуваних зв'язках коефіцієнти кореляції незначно перевищували значення кореляційних відношень результативних ознак по факторіальних. Між масою насіння з однієї рослини і часткою маси коріння в загальній масі рослин виявлений додатний кореляційний зв'язок з коефіцієнтом кореляції 0,114 за кореляційного відношення 0,141. В решті досліджуваних кореляційних зв'язках коефіцієнти кореляції коливалися в межах 0,013–0,102 і мали ще менші значення.

Із з'ясованих модельних рівнянь регресії, що апроксимують зміну результативних ознак від факторіальних, за R^2 -коефіцієнтом, який дорівнює 0,620, найкраще вирівнювання забезпечила апроксимація зміни експериментальних значень кількості рослин з рівним стеблом залежно від маси коріння однієї рослини рівнянням сповільнено зростаючої гіперболи (табл. 2). Помилка цього рівняння становила 6,8%, що значно менше середнього арифметичного значення цієї характеристики стебел, яке становило 54,5% (табл. 1). За значенням коефіцієнта детермінації, що дорівнює 0,619 (табл. 2), варіація зігнутості стебел на 62% причинно зумовлена варіацією маси коріння однієї рослини. За асимптотою гіперболи, яка дорівнює 57,82 (табл. 2), можна дійти висновку, що за рахунок відповідного збільшення кореневої маси рослин можна забезпечити формування стеблостою льону-довгунця перед збиранням, в якому кількість рослин з рівним стеблом сягатиме майже 60%. За такого стеблостою можливе механізоване брання льону-довгунця з наступним використанням засобів механізації на готуванні і збиранні рошенцевої льонотрести.

Апроксимація зміни кількості рослин з рівним стеблом залежно від частки маси коріння в загальній масі рослин рівнянням прямолінійної регресії з додатним кутовим коефіцієнтом забезпечила вирівнювання експериментальних значень кількості рослин з рівним стеблом, за якого $R^2 = 0,576$. При цьому помилка рівняння регресії дорівнювала 7,2%, а коефіцієнт детермінації становив 0,585 (табл. 2). За кутовим коефіцієнтом рівняння прямої (табл. 2) із збільшенням частки маси коріння в загальній масі рослин на 1% кількість рослин з рівним стеблом зростає дещо більше, ніж на 2%.

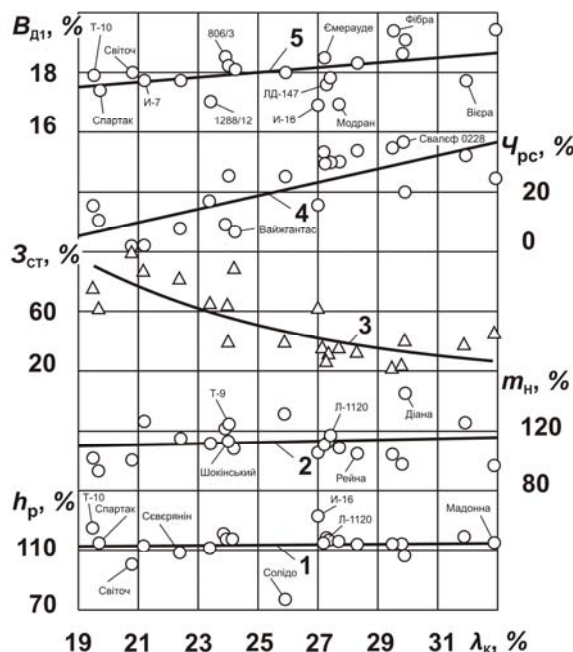
Апроксимація зміни зігнутості стебел залежно від маси коріння однієї рослини і її частки в загальній масі рослин рівняннями спадних степеневих функцій забезпечила вирівнювання експериментальних значень зігнутості стебел з R^2 -коефіцієнтами, що дорівнювали відповідно 0,518 і 0,521 (табл. 2). При цьому помилки апроксимуючих функцій дорівнювали відповідно 17,4 і 17,6% за коефіцієнтів детермінації 0,518 і 0,521.

Для спадної степеневі функції характерна властивість, за якою із збільшенням аргумента (незалежної змінної) функція (залежна змінна) сягає відповідних найменших граничних значень. Граничне значення зігнутості стебел $Z_{\text{ст}}$ можна відшукати з рівняння спадної гіперболи, яку вважають частковим випадком степеневі функції. У разі апроксимації зміни $Z_{\text{ст}}$ залежно від маси коріння однієї рослини $m_{\text{кр}}$ рівнянням гіперболи R^2 -коефіцієнт дорівнює 0,492. Асимптота рівняння гіперболи, яка дорівнює 24,08%, і являє граничне зменшення зігнутості стебел у разі збільшення $m_{\text{кр}}$. Зігнутість стебел сягає асимптотичного значення за маси коріння однієї рослини, що орієнтовно може перевищувати 160 мг. За такої зігнутості стебел стеблостій льону-довгунця може уможливити використання засобів механізації на очісуванні стебел, їх розстиланні в стрічку та виконанні наступних операцій з виробництва льонотрести.

Якщо зміну зігнутості стебел залежно від частки маси коріння в загальній масі рослин $\lambda_{\text{к}}$ подати рівнянням прямолінійної регресії з від'ємним кутовим коефіцієнтом вигляд $Z_{\text{ст}} = 178,37 - 4,80 \lambda_{\text{к}}$ ($R^2 = 0,508$), то за значенням кутового коефіцієнта рівняння регресії із збільшенням $\lambda_{\text{к}}$ на одиницю зігнутість стебел зменшується на 4,8%.

Графічно зміни досліджуваних характеристик стебел льону-довгунця залежно

від частки маси коріння в загальній масі рослин λ_k наведені на рис. 1. Модельні лінії регресії характеристик стебел на факторіальну ознаку побудовані за рівняннями, що представлені в табл. 2. Модельна лінія 1 регресії висоти рослин h_p на λ_k , що оцінюється коефіцієнтом кореляції 0,061, розташовується майже паралельно осі абсцис. За значенням коефіцієнта детермінації вплив λ_k на h_p серед решти впливаючих факторів становить лише 0,35%.



- 1 – висота рослин h_p (%); 2 – маса насіння з однієї рослини m_n (%); 3 – зігнутість стебел $3_{ст}$ (%);
4 – кількість рослин з рівним стеблом $Ч_{рс}$ (%); 5 – вміст деревини в 10-сантиметровому
відрізку стебла на відстані до 10 см від сім'ядольних листочків $B_{п1}$ (%)

Рисунок 1 – Зміна характеристик стебел льону-довгунця залежно від частки маси коріння в загальній масі рослин $\lambda_{\text{кз}}$, % (характеристики h_p , m_n і $z_{\text{ст}}$ наведені у відсотках до сорту Світоч, для якого вказані характеристики прийняті за 100%)

Джерело: розроблено авторами

Моделна лінія 2 прямолінійної регресії маси насіння з однієї рослини m_n на факторіальну ознаку оцінюється коефіцієнтом кореляції 0,114 і побудована за рівнянням, що наведене в табл. 2. Серед інших недосліджуваних факторів вплив λ_k на m_n оцінюється всього на 2,0%.

Графіки зміни зігнутої стебел $Z_{\text{ст}}$ і кількості рослин з рівним стеблом $Ч_{\text{рс}}$ залежно від λ_k представлені на рис. 1 модельними лініями регресії відповідно 3 і 4. Коротка характеристика цих ліній наведена вище.

Модельна лінія 5 прямолінійної регресії з додатним кутовим коефіцієнтом характеризує кількісну зміну вмісту деревини в 10-сантиметровому відрізьку стебла на відстані до 10 см від сім'ядольних листочків $B_{д1}$ залежно від частки маси коріння в загальній масі рослин λ_k і побудована за рівнянням, що наведені в табл. 2. Вірогідність апроксимації $B_{д1}$ залежно від λ_k наведеним в табл. 2 рівнянням оцінюється R^2 -коефіцієнтом, що дорівнює 0,197. За розрахованим коефіцієнтом детермінації варіація $B_{д1}$ на 19% причинно зумовлена варіацією λ_k . Решта не поясненої варіації зумовлена впливом інших факторів, що не розглядали в цьому дослідженні.

В графічному поданні зміна зігнутої стебел $Z_{ст}$ і кількості рослин з рівним стеблом $Ч_{рс}$ залежно від маси коріння однієї рослини $m_{кр}$ і маси насіння з однієї рослини $m_{н}$ наведена на рис. 2.

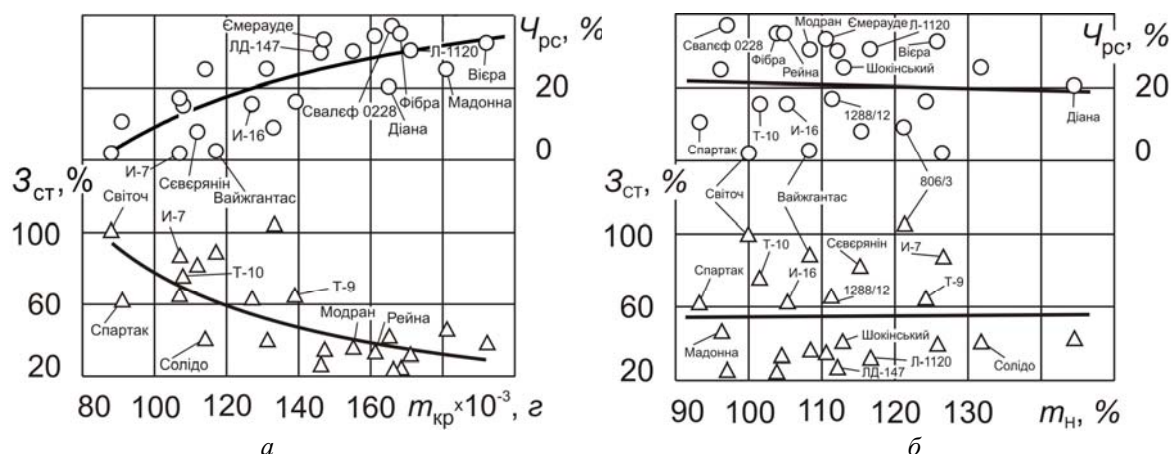


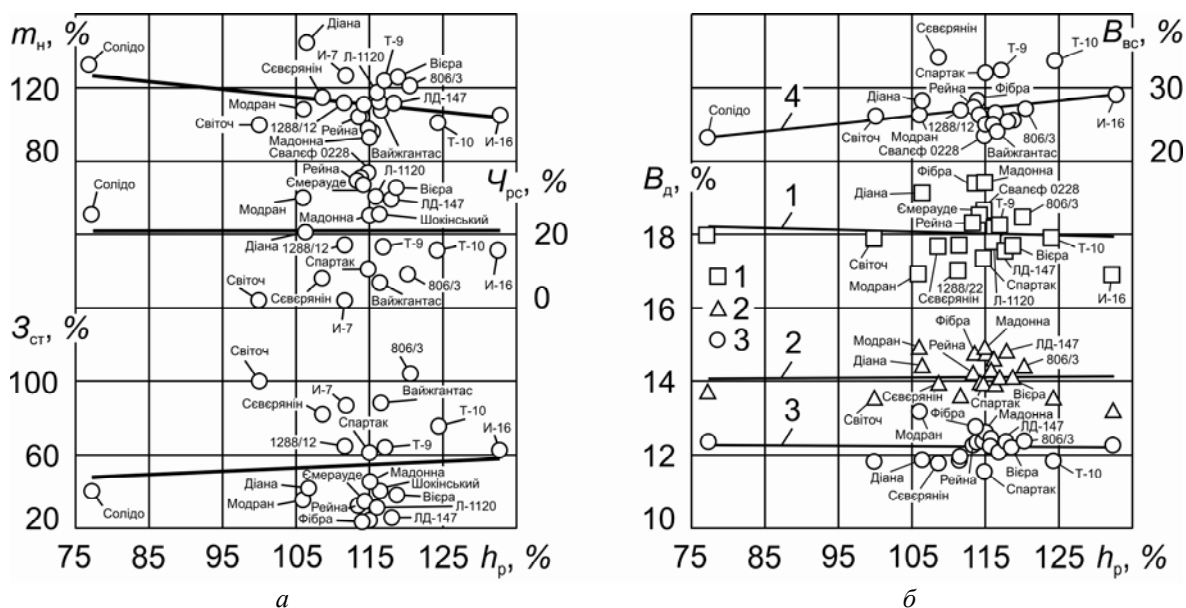
Рисунок 2 – Зміна (а) зігнутості стебел $Z_{ст}$ (%) і кількості рослин з рівним стеблом $Ch_{рс}$ (%) залежно від маси абсолютно сухого коріння $m_{кр}$ (г) однієї рослини льону-довгунця та вплив (б) маси насіння m_n (%) з однієї рослини на зігнутість стебел $Z_{ст}$ (%) і кількість рослин з рівним стеблом $Ch_{рс}$ (%)

Джерело: розроблено авторами

Зміну $Z_{ст}$ і $Ch_{рс}$ залежно від $m_{кр}$ (рис. 2, а) охарактеризовано вище. Тепер що стосується зміни $Z_{ст}$ і $Ch_{рс}$ залежно від маси насіння з однієї рослини m_n . Кореляційні поля досліджуваних результативних і факторіальної ознак та модельні лінії прямолінійної регресії $Z_{ст}$ і $Ch_{рс}$ на m_n наведені на рис. 2, б. Вказані модельні лінії побудовані за опрацьованими рівняннями регресії, що наведені в табл. 2. Модельна лінія прямолінійної регресії $Z_{ст}$ на m_n описує рівняння прямої з додатним кутовим коефіцієнтом. За незначного коефіцієнта кореляції між $Z_{ст}$ і m_n , що дорівнює 0,013, аналізована модельна лінія розташовується майже паралельно осі абсцис. Про таке розташування модельної лінії регресії свідчать і значення кутового коефіцієнта рівняння прямої, який дорівнює 0,026. Та і значення R^2 -коефіцієнта надто-надто мале, що дорівнює 0,00017, а за значенням коефіцієнта детермінації вплив m_n на $Z_{ст}$ оцінюється всього на 0,26%.

Модельну лінію $Ch_{рс}$ на m_n (рис. 2, б) описує рівняння прямолінійної регресії з від'ємним кутовим коефіцієнтом 0,0626, за значенням якого із збільшенням маси насіння з однієї рослини на 10% кількість рослин з рівним стеблом зменшується на 0,6%. За значенням коефіцієнта кореляції між $Ch_{рс}$ і m_n , що дорівнює мінус 0,071, варіація маси насіння з однієї рослини лише на 0,36% причинно зумовлює варіацію кількості рослин з рівним стеблом.

Модельні лінії прямолінійної регресії зігнутості стебел $Z_{ст}$, кількості рослин з рівним стеблом $Ch_{рс}$ і маси насіння з однієї рослини m_n та вмісту деревини B_d в 10-сантиметровому відрізку стебла на різній відстані від сім'ядольних листочків і виходу волокна $B_{вс}$ з технічної частини стебла на висоту рослин h_p показані на рис. 3. Модельні лінії регресії побудовані за рівняннями, що наведені в табл. 2. Із збільшенням висоти рослин h_p (рис. 3, а) зігнутість стебел $Z_{ст}$ дещо зростає, кількість рослин з рівним стеблом $Ch_{рс}$ має тенденцію за незначним від'ємним коефіцієнтом кореляції ($-0,264 \cdot 10^{-3}$) до зменшення, а маса насіння з однієї рослини m_n зменшується. Модельна лінія регресії $Ch_{рс}$ на h_p розташовується майже паралельно осі абсцис.



1 – вміст деревини в 10-сантиметровому відрізку стебла на відстані від сім'ядольних листочків до 10 см $B_{д1}$; 2 – те ж на відстані 10–20 см $B_{д2}$; 3 – те ж на відстані 20–30 см $B_{д3}$; 4 – вихід волокна з технічної частини стебла $B_{вс}$ (%)

Рисунок 3 – Зміна (а) зігнутості стебел $Z_{ст}$ (%), кількості рослин з рівним стеблом $Ch_{рс}$ (%) і маси насіння m_n (%) з однієї рослини залежно від висоти рослин h_p (%) та її вплив (б) на вміст деревини B_d (%) в стеблі і вихід волокна $B_{вс}$ (%) [11]

Джерело: розроблено авторами

Вміст деревини B_d , який визначали в 10-сантиметровому відрізку стебла, взятому на різних відстанях від сім'ядольних листочків, слабо корелює з висотою рослин (табл. 2). Модельні лінії прямої лінійної регресії B_d на h_p розташовуються майже паралельно осі абсцис і за вмістом деревини, що орієнтовно зростає від 12 до 18%, зрушуються ближче до прикореневої частини рослин. R^2 -коефіцієнт і коефіцієнти детермінації, що властиві рівнянням зміни B_d залежно від h_p , мають надто низькі значення, за яких не доведено вплив h_p на B_d .

Модельна лінія прямої лінійної регресії з додатним кутовим коефіцієнтом $B_{вс}$ на h_p (рис. 3, б) побудована за рівнянням, що наведене в табл. 2. З графіка і рівняння зміни $B_{вс}$ залежно від h_p видно, що із збільшенням висоти рослин на 10% вихід волокна з технічної частини стебла зростає майже на 1% (0,94%). За коефіцієнтом детермінації варіація зміни $B_{вс}$ на 10% причинно зумовлена варіацією висоти рослин h_p .

Висновки. Проаналізована маса коріння однієї рослини льону-довгунця. З'ясований емпіричний розподіл цієї ознаки рослин з визначенням середнього арифметичного значення і середнього квадратичного відхилення та коефіцієнта варіації. Досліджено розподіл частки маси коріння в загальній масі рослин льону-довгунця. Знайдені модельні рівняння і лінії регресії характеристик надземної частини рослин на масу їх коріння. Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні технологічного процесу вирощування льону-довгунця, виборі знарядь для основного обробітку ґрунту та опрацюванні технологічного і експлуатаційного регламентів використання засобів механізації на готуванні і збиранні рошенцевої льонотрести.

Напрямок подальших розвідок варто спрямувати на дослідження елементів архітектури рослин льону-довгунця та з'ясування стійкості їх до вилягання.

Список літератури

1. Фоменко Л.Д. Вирівняний льон. Київ: Урожай, 1967. 128 с.
2. Городний Н.Г., Устименко А.С., Шевчук А.Я., Гаврилов Г.Г. Формирование корневой системы льна-долгунца при различных способах обработки почвы. *Повышение урожайности и качества льна*. Житомирский сельскохозяйственный институт: науч. труды. Киев, 1969. Т. 19. С. 49–52.
3. Чиков В.И. Восстановление плодородия почв должно начинаться с увеличения массы корневой системы растений. *Приемы повышения плодородия почв и эффективности удобрения*. Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной памяти ученых: Анны Ивановны Горбыленой, Юрия Павловича Сиротина и Вадима Ивановича Тюльпанова / редкол.: Т.Ф. Персикова (отв. ред.) [и др.]. Горки. 18–20 декабря 2018 г. Горки: БГ СХА, 2019. Ч. 1. С. 188–190.
4. Бачялис К. Устойчивость сортов льна против полегания. *Лен и конопля*. 1974. № 9. С. 24–25.
5. Дьяконов Н.А. К вопросу определения относительного содержания волокна во льне по его наружным морфологическим признакам. *Журнал опытной агрономии им. П.С. Коссовича. Государственный институт опытной агрономии*. Ленинград : Изд. Государственного института опытной агрономии, 1928. Т. 24. Кн. 1. С. 5–25.
6. Лихочвор В.В., Петриченко В.Ф. Рослинництво. Сучасні інтенсивні технології вирощування основних польових культур. Львів: НВФ «Українські технології», 2006. 730 с.
7. Методика статистической обработки эмпирических данных. РТМ 44–62. Москва : Изд-во стандартов, 1966. 100 с.
8. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении: учеб. пособ. Москва : Изд-во Московского университета, 1972. 292 с.
9. Рыжов П.А. Математическая статистика в горном деле: учеб. пособ. для студ. вузов по спец. «Маркшейдерское дело». Москва : Высшая школа, 1973. 287 с.
10. Уланова Е.С., Забелин В.Н. Методы корреляционного и регрессионного анализа в агрометеорологии: монография. Ленинград : Гидрометеиздат, 1990. 208 с.
11. Limont A., Sheichenko V., Tolstushko M., Tolstushko N. The technologies of fiber flax harvesting their production efficiency and the prerequisites of their technological substantiation. *American Journal of Science and Technologies*. Princeton Univesity Press, 2016. № 1 (21). Vol. III. January – June. P. 878–895.

References

1. Fomenko, L.D. (1967). *Vyrvnaniy l'on [Aligned linen]*. Kyiv: Urozhaj [in Ukrainian].
2. Gorodnij, N.G., Ustimenko, A.S., Shevchuk, A.Ja. & Gavrilov, G.G. (1969). Formirovanie kornevoj sistemy l'na-dolgunca pri razlichnyh sposobah obrabotki pochvy [Formation of the root system of fiber flax with various methods of tillage.]. *Povyshenie urozhajnosti i kachestva l'na – Increasing the yield and quality of flax*, Vol. 19, 49–52 [in Russian].
3. Chikov, V.I. (2019). Vosstanovlenie plodorodija pochv dolzhno nachinat'sja s uvelichenija massy kornevoj sistemy rastenij. Methods for improving soil fertility and fertilizer efficiency: *Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvjashhennoj pamjati uchenyh: Anny Ivanovny Gorbylenoj, Jurija Pavlovicha Sirochina i Vadima Ivanovicha Tjul'panova (18–20 dekabrja 2018 g.) – International Scientific and Practical Conference, dedicated to the memory of scientists: Anna Ivanovna Gorbylena, Yuri Pavlovich Sirochin and Vadim Ivanovich Tyulpanov (pp. 188–190)*. T.F. Persikova (Ed.) . Gorki : BG SHA.
4. Bachjalis, K. (1974). Ustojchivost' sortov l'na protiv poleganiya [Resistance of flax varieties against lodging]. *Len i konoplja – Linen and hemp*, 9, 24–25 [in Russian].
5. D'jakonov, N.A. (1928). K voprosu opredelenija otnositel'nogo sodержaniya volokna vo l'ne po ego naruzhnym morfologicheskim priznakam [On the issue of determining the relative content of fiber in flax by its external morphological features]. *Zhurnal opytnoj agronomii im. P.S. Kossovicha – Journal of Experimental Agronomy. P.S. Kossovich*, Vol. 24, in 1, 5–25 [in Russian].
6. Lykhochvor, V.V. & Petrychenko, V.F. (2006). *Roslynnytstvo. Suchasni intensyvni tekhnolohii vyroschuvannia osnovnykh pol'ovykh kul'tur [Plant growing. Modern intensive technologies of cultivation of the main field crops]*. L'viv: NVF «Ukrains'ki tekhnolohii» [in Ukrainian].
7. Metodika statisticheskoj obrabotki jempiricheskikh dannyh [Method of statistical processing of empirical data]. (1966). *RTM 44–62*. Moskva : Izd-vo standartov [in Russian].
8. Dmitriev, E.A. (1972). *Matematicheskaja statistika v pochvovedenii [Mathematical statistics in soil science]*. Moskva : Izd-vo Moskovskogo universiteta [in Russian].
9. Ryzhov, P.A. (1973). *Matematicheskaja statistika v gornom dele [Mathematical statistics in mining]*. Moskva : Vysshaja shkola [in Russian].

10. Ulanova, E.S. & Zabeli, V.N. (1990). *Metody korrelyacionnogo i regressionnogo analiza v agro-meteorologii* [Methods of correlation and regression analysis in agro-meteorology]. Leningrad : Gidrometeoizdat [in Russian].
11. Limont, A., Sheichenko, V., Tolstushko, M. & Tolstushko, N. (2016). The technologies of fiber flax harvesting their production efficiency and the prerequisites of their technological substantiation. *American Journal of Science and Technologies*. Princeton Univesity Press, № 1 (21). Vol. III. January – June. P. 878–895 [in English].

Anatoliy Limont, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Zhytomyr Agrotechnical Colledge, Zhytomyr, Ukraine

Zlata Limont, student

Dnipro National University named after Oles Honchar, the city of Dnipro, Ukraine

Root System of Plants and Characteristics of Stalks of Flax

The aim of the article was to study the characteristics of long flax stalks depending on the mass of roots of one plant and its share in the total mass of plants. The characteristics of the stems are the height of plants, seed weight per plant, curvature of stems, number of plants with flat stems (%), wood content in a 10-centimeter segment of the stem at a distance of cotyledons up to 10 cm, 10-20 and 20 -30 cm, as well as the output of the fiber from the technical part of the stem.

The range of variation of the mass of absolutely dry roots of one plant ranged from 89 to 192 mg for arithmetic mean and standard deviation of 138 and 29.3 mg, respectively, and the coefficient of variation of the empirical distribution of root mass of one plant of the analyzed long flax varieties 21.2%. The share of root mass in the total mass of plants ranged from 19.5 to 32.9%. The main statistical indicators of empirical distributions of the found out characteristics of stalks of flax plants have been determined.

Based on correlation-regression analysis of experimental data on the mass of roots of one long flax plant and the studied characteristics of stems, which are given in the literature, it was found that the change in plant height, seed weight per plant, number of plants with flat stems (%) , wood content in a 10-cm segment of the stem at a distance of 10 cm from the cotyledons depending on the proportion of root mass in the total mass of plants, stem curvature depending on the weight of seeds from one plant and stem curvature, wood content in a 10-cm stem segment at a distance of 10–20 and 20–30 cm from the cotyledons, the fiber output from the technical part of the stem, depending on the height of the plants, is described by rectilinear regression equations with positive angular coefficients. Change in the number of plants with flat stems (%) depending on the weight of seeds per plant and plant height, as well as the number of plants with flat stems (%) and wood content in a 10-cm section of stem at a distance of 10 cm from cotyledons depending on from the height of plants is described by the equations of rectilinear regression with negative angular coefficients. The change in the curvature of stems depending on the mass of the roots of one plant and the share of this mass in the total mass of plants is described by the equations of decreasing power functions. The change in the number of plants with a flat stem (%) depending on the root mass of one plant is described by the equation of slow-growing hyperbola.

The closest correlation between studies was found between stem curvature and root mass of one plant (negative correlation) with a correlation coefficient of minus 0.706, between stem curvature and the share of root mass in total plant mass (negative correlation) with a correlation coefficient of minus 0.713, between the number of plants with a flat stem (%) and the share of root mass in the total mass of plants and the mass of roots of one plant (in both cases a positive correlation) with correlation coefficients of 0.759 and 0.779, respectively. In the studied relationships, the correlation ratios slightly exceeded the values of the correlation coefficients. A less close positive correlation was found between the wood content in a 10 cm section of the stem at a distance of 10 cm from the cotyledons and the share of root mass in the total mass of plants (correlation coefficient 0.444) and between fiber yield from the technical part of the stem and plant height (correlation coefficient 0.327). A negative correlation with a correlation coefficient of minus 0.336 was found between seed weight per plant and plant height. In these studied relationships, the correlation coefficients slightly exceeded the values of the correlation relations of the performance factors by factorial ones. A positive correlation with a correlation coefficient of 0.114 with a correlation ratio of 0.141 was found between the mass of seeds from one plant and the share of root mass in the total mass of plants. In the rest of the correlations studied, the correlation coefficients ranged from 0.013 to 0.102 and were even smaller.

The results of the research can be used in designing the technological process of growing flax, choosing tools for basic tillage and elaboration of technological and operational regulations for the use of mechanization in the preparation and harvesting of Roshen flaxseed.

flax, plant, roots, aboveground part, stem, mass, characteristics of stems, connection

Одержано (Received) 26.01.2022

Прорецензовано (Reviewed) 09.02.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

УДК 631.348.4

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.216-226](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.216-226)

А.В. Бабій, доц., д-р техн. наук, **В.О.Дзюра**, доц., д-р техн. наук, **І.В. Головецький**, асп.

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

e-mail: ababiy@ukr.net

Дослідження впливу вертикальних коливань штанги обприскувача на рівномірність обприскування

На сучасному етапі розвитку технологій вирощування сільськогосподарських культур технологічна операція обприскування залишається актуальною. Цим методом виконують хімічний захист рослин, а також їх підживлення. Основними машинами залишаються штангові обприскувачі. Від технічної ефективності обприскування залежить кінцевий результат – урожайність культури. Серед інших чинників, які потрібно витримати при хімічному захисті, є дотримання норми виливу на одиницю цільової площі.

Виходячи з цього, в роботі виконано аналіз чинників, які впливають на технічну ефективність обприскування. Серед них виділено вплив положення штанги на дотримання норми виливу робочого препарату на одиницю площі. Для реалізації мети роботи, яка полягає у віднаходженні допустимої амплітуди коливання штанги, виконано аналіз ряду літературних джерел, звідки встановлено взаємозв'язок між висотою розміщення штанги над об'єктом обробки та нормою виливу. На основі отриманих критеріїв побудовано графоаналітичну модель, яка пов'язує висоту встановлення штанги над оброблюваною площею та кількісну витрату через розпилюючий пристрій на одиницю площі обробки. Реалізацією моделі є числовий експеримент, який дозволив отримати відсоткові числові значення нерівномірності покриття площі обробки. Такі результати отримано для моделей, які імітують обприскування площ при суцільному внесенні робочого препарату та обробку просапних культур.

вертикальні коливання, штанга, обприскувач, ширина міжрядь, розпилювачі, робочий препарат

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку технологій вирощування сільськогосподарської продукції широко застосовують різного роду обробки рослин. Актуальним залишається хімічний захист, підживлення рідкими комплексними добривами, що виконують штанговими обприскувачами. Від своєчасності та ефективності виконання даної технологічної операції напряду залежить кінцевий результат – урожайність культури.

Виконавши аналіз чинників ефективності технологічної операції внесення робочого препарату на оброблювану площу, приходимо до висновку, що саме технічна ефективність обприскування полягатиме у здатності робочих та допоміжних органів машини для хімічного захисту забезпечити необхідну ефективну кількість осаджених краплин на одиницю цільової поверхні [1].

Виходячи з цього, виділено основні чинники, які мають значний вплив щодо розподілу робочого препарату на поверхні оброблюваного об'єкту, що наносяться штанговими обприскувачами як найбільш ефективними машинами для здійснення цієї технологічної операції, рис. 1 [2, 3].

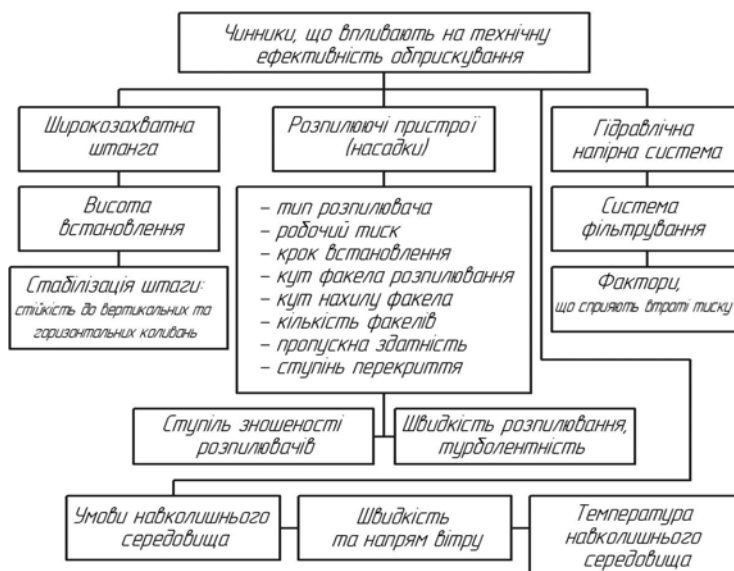


Рисунок 1 – Структурно-логічна схема чинників, що впливають на технічну ефективність обприскування

Джерело: розроблено авторами

Розглядаючи роботу технічно справного обприскувача та у відповідних погоднокліматичних умовах бачимо, що на технічну ефективність обприскування значний вплив має положення штанги в даний момент часу по відношенню до оброблюваної поверхні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання впливу коливання штанги є актуальними і сьогодні. Цій тематиці присвячено багато праць вчених, зокрема [2, 4–7]. Автори вказують, що коливання штанги в значній мірі впливає на рівномірність нанесення робочого препарату на поверхню рослин, але в переважній більшості не наводять кількісне співвідношення між параметрами коливання штанги та нормою внесення на одиницю ефективної площі.

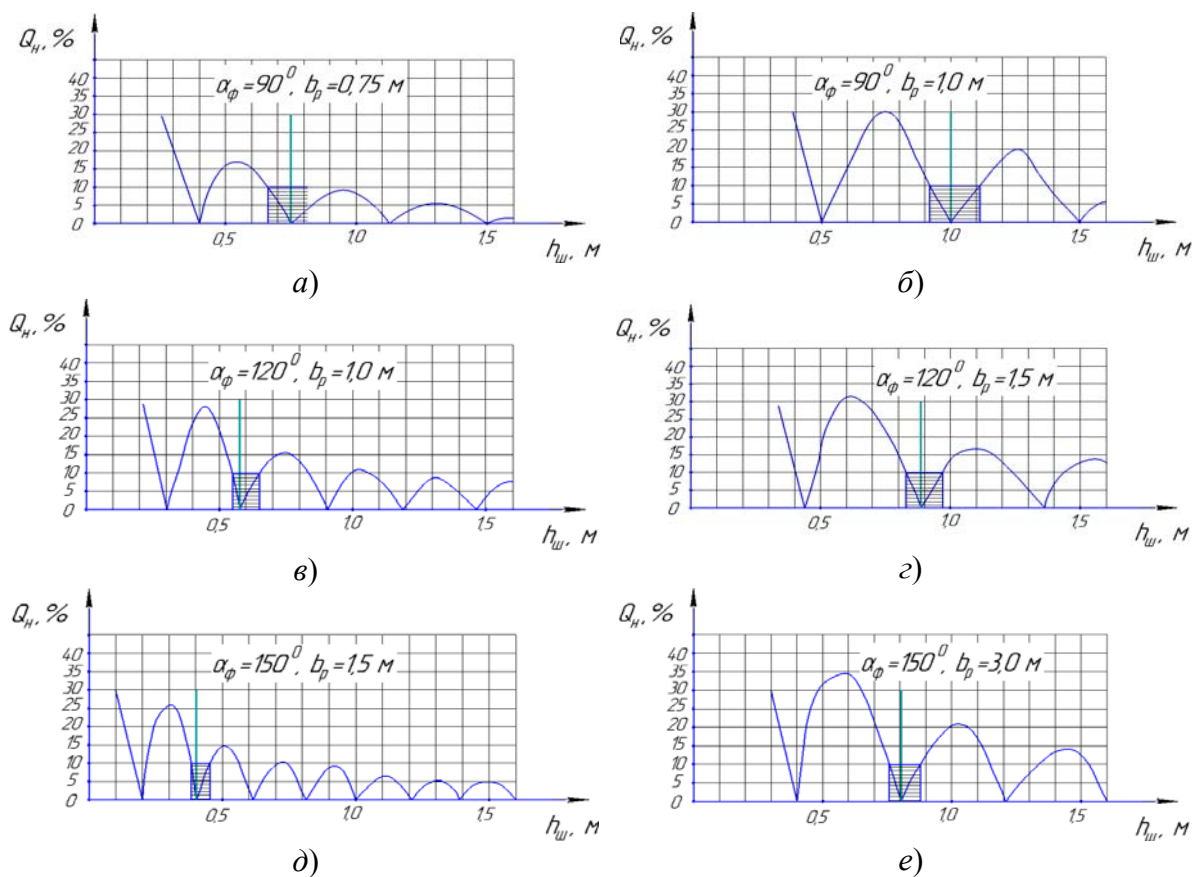
Автори доводять, що крім вертикальних коливань штанги, які в значній мірі впливають на рівномірність розподілу робочого препарату по ширині захвату штанги, суттєвий вплив мають ще й горизонтальні коливання вздовж руху обприскувача [8–10]. Локальні дослідження щодо впливу вертикальних переміщень штанги на рівномірність нанесення робочого препарату за робочою шириною у кількісному вираженні виконано у роботах [7, 11, 12]. Для отримання кількісного результату зроблено такі припущення: всі розпилювачі справні та мають однакову продуктивність, що забезпечує рівномірний розподіл розпилю робочого препарату по всій ширині захвату штанги; всі розпилювачі мають факел розпилю трикутної форми та виключений взаємний вплив при накладанні струменів; коливаючись, штанга здійснює плоскопаралельні рухи відносно об'єкту обробки. Методика визначення нерівномірності нанесення робочої рідини виконана згідно ОСТ 70.7.3-82. Тут було поставлено умову, що нерівномірність нанесення робочої рідини на об'єкт обробки не повинна перевищувати 10%. Отримано наступні результати, табл. 1 [13].

Таблиця 1 – Результати допустимих відхилень штанги по висоті

№ з/п	Кут факела розпилу розпилювача, град	Відстань між розпилювачами на штанзі, м	Висота встановлення штанги, м	Допустима величина відхилення штанги, м	Відхилення, м: вверх «+», вниз «-»
1.	90	1,0	1,0	0,20	+11; -9
2.	120	1,5	0,866	0,14	+8; -6
3.	150	3,0	0,804	0,12	+7; -5

Джерело: [13]

Автор [13] зазначає, що необхідно, щоб факели стикувалися над поверхнею обробки, бо нижче утворюються полоси, яким властиві певної кратності перекриття, які змінюють норму внесення за шириною захвату штанги. Про що свідчать криві нерівномірності на рис. 2. Натомість реальна робота штанги при її вертикальних коливаннях значно відрізняється від наведених в табл. 1 допустимих відхилень.



а – $\alpha_\phi = 90^\circ, b_p = 0,75 \text{ м}$; б – $\alpha_\phi = 90^\circ, b_p = 1,0 \text{ м}$; в – $\alpha_\phi = 120^\circ, b_p = 0,75 \text{ м}$; г – $\alpha_\phi = 120^\circ, b_p = 1,5 \text{ м}$; д – $\alpha_\phi = 150^\circ, b_p = 1,5 \text{ м}$; е – $\alpha_\phi = 150^\circ, b_p = 3,0 \text{ м}$

Рисунок 2 – Кількісний аналіз нерівномірності розподілу робочої рідини за шириною захвату штанги в залежності від кута розпилу розпилювача α_ϕ та відстані між розпилювачами b_p

Джерело: [13]

Таким чином, авторами отримано ряд числових значень відхилень по висоті встановлення штанги, при якому буде порушена норма виливу робочого препарату на одиницю площі обробки. Дослідження виконано для конкретних конструкцій штанг та відстаней розміщення розпилювачів.

Тенденції сьогодення вказують на дещо відмінні відстані розміщення розпилювачів на штанзі (в межах 0,5 м), для яких відсутні рекомендації щодо допустимих амплітуд коливання штанги при забезпеченні норми виливу робочого препарату з допустимим відхиленням, наприклад 10%.

Постановка завдання. Виконати з допомогою графоаналітичної моделі числовий експеримент для визначення допустимої амплітуди коливання штанги обприскувача, при якій буде дотримано допустиму норму виливу згідно агротехнічних вимог.

Результати досліджень. Тому виникає необхідність проведення додаткового графоаналітичного дослідження кількісної зміни норми внесення робочого препарату від висоти її встановлення над об'єктом обробки.

Використовуючи аналогічні припущення, що наведено вище, введемо до моделі визначення нерівномірності внесення препарату від висоти штанги ще такі:

– ширина питомої площі обробки одним розпилювачем відповідає величині кроку їх встановлення на штанзі, що зумовлює рівномірність обробки площі по ширині захвату штанги;

– питома витрата робочого препарату в будь-якому перерізі факела розпилювача відповідає витраті, що призначається на питому площу шириною кроку встановлення розпилювачів.

Виходячи з даних міркувань, побудовано моделі та отримано наступні графічні залежності для окремих найбільш вживаних розпилювачів (за кутом розпилу) та для переважного кроку їх встановлення на штангах сучасних обприскувачів – 0,5 м.

Представимо графічні залежності для штанги з розпилювачами, які утворюють кут розпилу $\alpha_\phi = 80^\circ$ ($\alpha_\phi = 120^\circ$) та встановлені з кроком $b_p = 0,5$ м при суцільному внесенні робочого препарату, рис. 3.



■ – розпилювачі з кутом розпилу $\alpha_\phi = 120^\circ$; ◆ – $\alpha_\phi = 80^\circ$

Рисунок 3 – Графічні залежності нерівномірності покриття для розпилювачів

Джерело: розроблено авторами

Як видно з наведених графічних залежностей, що для розпилювачів з кутом розпилу $\alpha_\phi = 120^\circ$ нульова нерівномірність виникає вже при відстані штанги над об'єктом обробки – 0,15 м. Проте відстань 0,1 м дає нерівномірність розподілу -44 %, тобто перевищення заданої норми на даний відсоток.

Аналогічно отримано для розпилювачів з кутом розпилу $\alpha_\phi = 80^\circ$: норма настає

при відстані 0,3 м, але при 0,25 м нерівномірність складає -19,2 %.

Для розрахункових точок отримано, як усереднене значення, поліноміальні криві нерівномірності покриття $y_{(\alpha_\phi)}$ від положення штанги над об'єктом обробки x :

– для розпилювачів $\alpha_\phi = 120^\circ$

$$y_{(120)} = -3,0542 \cdot 10^{-7} x^6 + 7,0716 \cdot 10^{-5} x^5 - 0,0066 x^4 + 0,3161 x^3 - 8,1656 x^2 + 107,2459 x - 556,4692; \quad (1)$$

– для розпилювачів $\alpha_\phi = 80^\circ$

$$y_{(80)} = -7,4294 \cdot 10^{-7} x^6 + 0,0002 x^5 - 0,0139 x^4 + 0,6213 x^3 - 15,2180 x^2 + 201,0448 x - 1188,9479. \quad (2)$$

Подальше збільшення висоти, від вказаних критичних точок, сприяє рівномірному розподілу робочого препарату за шириною штанги, не враховуючи інших чинників, що впливають на рівномірність: знос вітром, випаровування тощо [14].

Гірша ситуація з рівномірністю розподілу робочого препарату спостерігається при виконанні обприскування просапних культур. Для прикладу використано культури з міжряддям 0,45 м, наприклад цукровий буряк (рис. 4, 5), та міжряддям 0,7 м – картопля, рис. 6, 7.

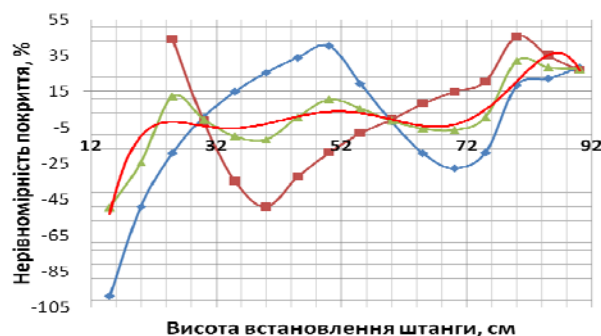


Рисунок 4 – Графічні залежності нерівномірності покриття при міжрядному обробітку з шириною міжрядь 0,45 м для розпилювачів $\alpha_\phi = 80^\circ$, які рухаються: $\blacklozenge$ – по осі рядка; $\blacksquare$ – рядок розміщений по центру між розпилювачами; $\blacktriangle$ – середнє значення; суцільна лінія – апроксимуюча крива

Джерело: розроблено авторами

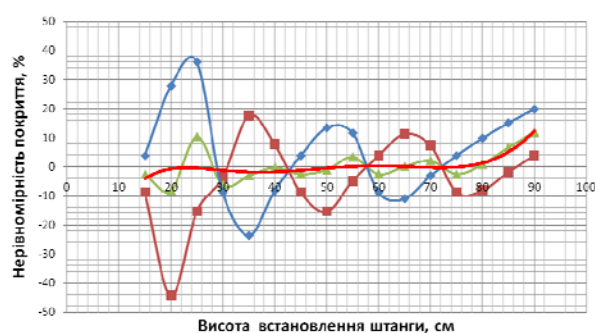


Рисунок 5 – Графічні залежності нерівномірності покриття при міжрядному обробітку з шириною міжрядь 0,45 м для розпилювачів $\alpha_\phi = 120^\circ$, які рухаються: $\blacklozenge$ – по осі рядка; $\blacksquare$ – рядок розміщений по центру між розпилювачами; $\blacktriangle$ – середнє значення; суцільна лінія – апроксимуюча крива

Джерело: розроблено авторами

Хімічний захист проводиться в різних фазах біологічного розвитку рослин. Тут прийнято, що нанесення робочого препарату виконується, коли ширина ефективної площі покриття становить 0,15 м. Результати отримано для розпилювачів з кутом розпилю $\alpha_\phi = 80^\circ$ та $\alpha_\phi = 120^\circ$.

Як видно з рис. 4, 5, що в залежності від того, де буде проходити розпилювач по відношенню до осі рядка, спостерігається значна нерівномірність покриття: від перевищення норми до значного недоливу. Але разом з тим є оптимальні значення висоти розміщення штанги, при якій спостерігається добре покриття ефективної площі рядка при будь-якому положенні розпилювача відносно осі рядка:

– для розпилювачів з кутом розпилу $\alpha_{\phi} = 80^{\circ}$ та кроком монтажу на штанзі $b_p = 0,5$ м такі висоти над об'єктом обробки будуть в околах значень 0,3 м; 0,6 м. Оптимальна розрахункова висота встановлення штанги для таких же умов, яка отримана автором у роботі [15], становить $h_{ш} = 0,596$ м, що має добру збіжність з даними результатами;

– для розпилювачів з кутом розпилу $\alpha_{\phi} = 120^{\circ}$ та кроком монтажу на штанзі $b_p = 0,5$ м відповідно матимемо в околах: 0,3 м; 0,43 м; 0,58 м; 0,72 м. Розрахункова висота встановлення розпилювачів – $h_{ш} = 0,289$ м.

Усереднені значення нерівномірності покриття робочим препаратом ефективної площі виражаються функціональними залежностями:

– для розпилювачів з кутом розпилу $\alpha_{\phi} = 80^{\circ}$

$$y_{(80_{-15})} = -9,6427 \cdot 10^{-8} x^6 + 3,0564 \cdot 10^{-5} x^5 - 0,0039 x^4 + 0,2475 x^3 - 8,4812 x^2 + 147,1334 x - 1014,0072; \quad (3)$$

– для розпилювачів з кутом розпилу $\alpha_{\phi} = 120^{\circ}$

$$y_{(120_{-15})} = -4,0920 \cdot 10^{-9} x^6 + 1,5749 \cdot 10^{-6} x^5 - 0,0002 x^4 + 0,0168 x^3 - 0,6312 x^2 + 11,5895 x - 82,2498. \quad (4)$$

Виконаємо такий самий аналіз нерівномірності покриття при обробці просапної культури з міжряддям 0,7 м та шириною ефективної площі нанесення 0,3 м на прикладі обробки картоплі, рис. 6, 7.

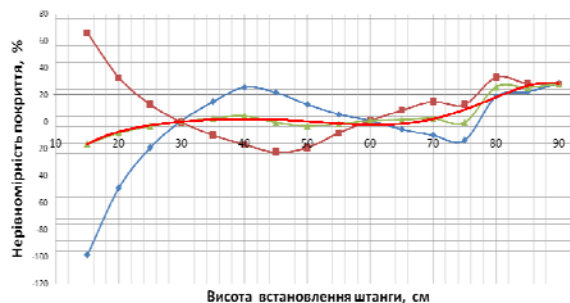


Рисунок 6 – Графічні залежності нерівномірності покриття при міжрядному обробітку з шириною міжрядь 0,7 м для розпилювачів $\alpha_{\phi} = 80^{\circ}$, які переміщуються: $\blacklozenge$ – по осі рядка; $\blacksquare$ – рядок розміщений по центру між розпилювачами; $\blacktriangle$ – середнє значення; суцільна лінія – апроксимуюча крива

Джерело: розроблено авторами



Рисунок 7 – Графічні залежності нерівномірності покриття при міжрядному обробітку з шириною міжрядь 0,7 м для розпилювачів $\alpha_{\phi} = 120^{\circ}$, які переміщуються: $\blacklozenge$ – по осі рядка; $\blacksquare$ – рядок розміщений по центру між розпилювачами; $\blacktriangle$ – середнє значення; суцільна лінія – апроксимуюча крива

Джерело: розроблено авторами

Також співставимо результати покриття ефективної площі розпилювачами з кутом розпилу $\alpha_{\phi} = 120^{\circ}$, рис. 7 [16].

Аналізуючи роботу розпилювачів з кутами розпилу $\alpha_{\phi} = 80^{\circ}$ на міжряддях 0,7 м та шириною ефективної площі обробки 0,3 м, бачимо, що для тих, які проходять по осі рядка та розпилювачів, між якими симетрично розміщений рядок (як найбільш критичні випадки) забезпечення норми виливу спостерігається при відстані 0,3 м від

поверхні оброблюваних рослин. Потім при віддаленні штанги від об'єкту обробки нерівномірність зростає, причому на відстані 0,4 м перші розпилювачі мають недолив 25 %, а другі – на відстані 0,45 м переливають на 22,5 %. В околі висоти 0,6 м вилив знову є в межах норми.

Розрахункова висота складає для даних типів розпилювачів (за кутом розпили) – 0,596 м. Отриманий результат добре королює з відповідною зоною на графічних зображеннях, рис. 6.

Залежності апроксимуючих кривих, що характеризують середнє значення нерівномірності нанесення робочого препарату при роботі розпилювачів, що розміщені вказаним чином мають вигляд:

– для розпилювачів $\alpha_{\phi} = 80^{\circ}$

$$y_{(80-70)} = -1,5607 \cdot 10^{-8} x^6 + 4,4848 \cdot 10^{-6} x^5 - 0,0005 x^4 + 0,0296 x^3 - 0,9605 x^2 + 17,2049 x - 136,0819; \quad (5)$$

– для розпилювачів $\alpha_{\phi} = 120^{\circ}$

$$y_{(120-70)} = -2,5158 \cdot 10^{-9} x^6 + 8,4382 \cdot 10^{-7} x^5 - 0,0001 x^4 + 0,0074 x^3 - 0,2510 x^2 + 4,0827 x - 23,1796. \quad (6)$$

При роботі розпилювачів з кутом розпили $\alpha_{\phi} = 120^{\circ}$ на міжряддях 0,7 м та корисною шириною ефективної площі обробки 0,3 м спостерігаємо наступне, рис. 7:

норма забезпечується при відстані 0,3 м; при збільшенні висоти до 0,35 м – нерівномірність зростає до 15,8 %; далі із збільшенням висоти штанги над об'єктом обробки – рівномірність нанесення робочого препарату розпилювачами підвищується і переходить в зону норми ± 10 %. Для розглядуваної комбінації рядок-розпилювач оптимальними є висоти: 0,3 м; 0,45 м; 0,6 м та вище. Розрахункова висота при двократному перекритті факелів становить $h_{\text{ш}} = 0,289$ м. Як бачимо і в цьому випадку розрахункова величина має добре співпадання з графоаналітичними дослідженнями.

Крім того, представлені залежності (рис. 3 – 7) в певній мірі мають подібний характер до графічних залежностей, що наведено автором [13] та представлені на рис. 2. Крок розстановки розпилювачів у дослідженні [13] на даний час не відповідає сучасним підходам розміщення розпилювачів на штангах універсальних обприскувачів, а також відсутня інформація про ширину ділянки спостереження та їх крок і тому не виконували порівняльний аналіз в аналогічних умовах.

Висновки. Підсумовуючи результати дослідження впливу вертикальних коливань штанги щодо рівномірності внесення робочого препарату на поверхню обробки, приходимо до наступних висновків:

– в залежності від виду виконуваної технологічної операції – суцільне внесення чи обробка просапних культур встановлюють штангу на оптимальну висоту, яка визначається з врахуванням можливої амплітуди коливань, і при цьому норма нерівномірності внесення не перевищуватиме $\pm 10\%$, наприклад:

для розпилювачів з кутом розпили $\alpha_{\phi} = 120^{\circ}$ нульова нерівномірність виникає при відстані штанги над об'єктом обробки – 0,15 м. Проте, якщо амплітуда коливання штанги буде більше 0,05 м, то при відстані 0,1 м нерівномірність розподілу зросте до -44 %, що значно перевищить задану норму. Подальше збільшення висоти встановлення штанги над об'єктом обробки ($\geq 0,15$ м) забезпечує задану норму внесення, не враховуючи інших негативних чинників;

для розпилювачів з кутом розпили $\alpha_{\phi} = 80^{\circ}$: норма внесення забезпечується при відстані 0,3 м, але при 0,25 м нерівномірність складає – 19,2 %, тому відстань над об'єктом обробки повинна складати $\geq 0,25$ м, при врахуванні амплітуди коливання штанги її збільшують на величину максимальної робочої амплітуди;

– при обробці робочим препаратом рядків просапних культур спостерігається складніша картина щодо рівномірності нанесення робочого препарату на поверхню рослин, тобто ефективну площу обробки. В залежності від того, де буде проходити розпилювач по відношенню до осі рядка, спостерігається значна нерівномірність покриття: від перевищення норми до значного недоливу. Але разом з тим є оптимальні значення висоти розміщення штанги, при яких спостерігається добре покриття ефективної площі рядка при будь-якому положенні розпилювача відносно осі рядка:

просапна культура з міжряддям 0,45 м, ширина ефективної площі обприскування 0,15 м:

для розпилювачів з кутом розпили $\alpha_{\phi} = 80^{\circ}$ та кроком монтажу на штанзі $b_p = 0,5$ м такі висоти над об'єктом обробки будуть в околах значень 0,3 м, допустима амплітуда коливання штанги $\pm 0,02$ м; 0,6 м – амплітуда $\pm 0,045$ м. Оптимальна розрахункова висота становить $h_{\text{ш}} = 0,596$ м;

– для розпилювачів з кутом розпили $\alpha_{\phi} = 120^{\circ}$ та кроком монтажу на штанзі $b_p = 0,5$ м відповідно матимемо в околах: 0,3 м $\pm 0,03$ м; 0,43 м $\pm 0,04$ м; 0,58 м; 0,72 м. Якщо допустити перевищення нерівномірності покриття ефективної площі в положенні штанги 0,61 м $\pm 0,01$ м до ± 12 %, то задовільне положення штанги лежить в межах від 0,55 м до 0,82 м над об'єктом обробки;

просапна культура з міжряддям 0,70 м, ширина ефективної площі обприскування 0,30 м:

для розпилювачів з кутами розпили $\alpha_{\phi} = 80^{\circ}$ тих, які проходять по осі рядка та розпилювачів, між якими симетрично розміщений рядок (як найбільш критичні випадки) забезпечення норми виливу спостерігається при відстані 0,3 м $\pm 0,04$ м від поверхні оброблюваних рослин. Потім при віддаленні штанги від об'єкту обробки нерівномірність зростає, причому на відстані 0,4 м перші розпилювачі мають недолив 25 %, а другі – на відстані 0,45 м переливають на 22,5 %. В околі висоти 0,6 м $\pm 0,08$ м вилив знову є в межах норми. Розрахункова висота складає для даних типів розпилювачів (за кутом розпили) – 0,596 м;

для розпилювачів з кутом розпили $\alpha_{\phi} = 120^{\circ}$ норма забезпечується при відстані 0,3 м; при зростанні висоти до 0,35 м – нерівномірність зростає до 15,8 %; далі від 0,38 м із збільшенням висоти штанги над об'єктом обробки, наприклад, 0,9 м – рівномірність нанесення робочого препарату розпилювачами підвищується і переходить в зону норми $\pm 10\%$. Для розглядуваної комбінації оптимальними є висоти: 0,3 м; 0,45 м; 0,6 м та вище.

Звідси випливає, що при суцільному внесенні робочого розчину на оброблювану площу слід виділяти мінімальну відстань до об'єкту обробки, де забезпечується допустима нерівномірність нанесення, оскільки подальше збільшення висоти підвищує рівномірність покриття, аж до моменту, коли почнуть діяти інші чинники, які цей показник знижуватимуть.

Що стосується обробітку просапних культур, то при звичайному штанговому обприскуванні рівномірності обробки ефективної площі, яку займає культурна рослина, досягнути важче, оскільки цей процес залежить від ширини такої площі, величини

міжрядь, в яких культура вирощується, а звідси і положення розпилювача відносно осі рядка. З даного локального дослідження випливає, що оптимальним є положення штанги на висоті 0,6 м над об'єктом обробки.

Результати представлених досліджень є актуальними в частині проведення такого хімічного обробітку рослин, при якому розрахункова норма препарату повинна бути нанесеною тільки на поверхню культурних рослин, тому, формуючи норму внесення, потрібно враховувати співвідношення ширини ефективної площі обробітку та ширини міжрядь. Це викликає збільшення об'ємів внесення робочого препарату на гектар, а також «зайве» покривання відкритих міжрядь, що знижує ефективність такого способу штангового обприскування. Альтернативою тут може бути стрічкове або дискретне обприскування.

Список літератури

1. Бабій А.В. Вибір критеріїв для досягнення оптимальних параметрів обприскувача. Матеріали XXI наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 2019 р. С. 8.
2. Вікович І.А. Конструкції і динаміка штангових обприскувачів: монографія. Львів : Видавництво «Львівської політехніки», 2003. 460 с.
3. Машины для хімічного захисту рослин: посіб.; за ред. Кравчука В.І., Войтюка Д.Г. Дослідницьке: УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, 2010. 184 с.
4. Schmidt-Ott M. Technische Mapnahmen zur Erhöhung der Verteilgenauigkeit von FeldSpritzgeräten. Landtechnik, 1976. Nr. 3. S. 112–115.
5. Кушель В.Ю., Чижевский А.Л. Влияние продольных колебаний штанги на распределение удобрений. В кн. : Пробл. компл. механиз. процессов хранения, подготовки и внесения органических, минеральных удобрений, известковых материалов и средств защиты растений. Тез. докл. науч.-произв. конф. Ч. I. Минск, 1979. С. 98–99.
6. Масло И.П., Терехов А.П. Статистический анализ равномерности распределения материалов. В кн. : Механиз. и электриф. сел. хоз-ва, 1981. С. 50–52.
7. Озолс Я.Г., Вартукапейнис К.Э., Карклиньш А.А. Применение и механизация внесения жидких комплексных минеральных удобрений. Рига : Лиесма, 1979. 162 с.
8. Irla E. Feldspritzgeräte – Ausrüstung, Arbeitsqualität und Kosten. Schweizer Landtechnik, 1980. Jg. 42. Nr.7. S. 436–443, 446–448.
9. Speelman L. Die gleichmäßige Verteilung von Spritz-brtihen auf unehehem Gelände ist mit den heutigen Spritzbalken-und Dusenkonstruktionen meistens unbefriedigend. Grundl. Landtechnik, 1973. Bd. 23. Nr. 1. S. 25–27.
10. Musillami S. La reduction des coöts des applications de produits agropharmaceutiques passe par la precision des materials et leur bonne mise en oeuvre. Tract. Mach. Agr, 1978. Vol. 54. Nr. 3. P. 169–176.
11. Norden J. Spritztechnik in Pflanzenschutz und Düngung. Münster - Hiltrup: Landwirtschaftsverlag GMBH, 1982. 156 s.
12. Ripke F.O. Die richtige Düse für ihre Pflanzenschutzspritze. Agrar Übersicht, 1981. Bd. 32. Nr 10. S. 30–32.
13. Вартукапейнис Л.Э. Обоснование параметров и элементов конструкции штанговых опрыскивателей. Дисертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 05.20.01. Елгава, 1984. 249 с.
14. Бабій А.В., Олійник В.Є., Михалків А.Й.. Дослідження впливу положення штанги обприскувача на відхилення норми внесення робочого препарату. Матеріали Всеукраїнської наукової конференції молодих учених і науково-педагогічних працівників, 20 травня 2021 р. / Редкол.: Непочатенко О. О. (відп. ред.) та ін. Умань: ВПЦ «Візаві», 2021. С. 155–157.
15. Бабій А.В. Аналіз параметрів штангового обприскувача з метою збільшення його продуктивності. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine, 2019. Vol. 10. No. 4. С. 51–55.
16. Бабій А.В. Дослідження впливу висоти встановлення штанги на рівномірність обприскування за шириною захвату. *Сучасні проблеми та перспективи розвитку машинобудування України*: зб. тез доповідей міжн. наук.-практ. онлайн конф., присвяченої 20-й річниці з дня створення факультету конструювання та дизайну Національного університету біоресурсів і природокористування України, 23-24 вересня 2021 року. С. 118–120.

References

1. Babii, A.V.(2019). Vybir kryteriyiv dlya dosyahnennya optimal'nykh parametriv obpryskuvacha [Selection of criteria for achieving optimal sprayer parameters]. *Materialy XXI naukovoï konferentsiyi Ternopil's'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu imeni Ivana Pulyuya – Proceedings of the XXI Scientific Conference of Ternopil Ivan Puluj National Technical University*, 8 [in Ukrainian].
2. Vikovych, I.A. (2003). *Konstruktivna i dynamika shtanhovykh obpryskuvachiv [Constructions and dynamics of rod sprayers: monograph]*. L'viv : Vydavnytstvo «L'vivs'koyi politekhniki» [in Ukrainian].
3. Kravchuk, V.I. & Voytyuk, D.H. (2010). *Mashyny dlya khimichnoho zakhystu roslyn [Machines for chemical protection of plants]*. Doslidnyts'ke: UkrNDIPVT im. L. Pohoriloho [in Ukrainian].
4. Schmidt-Ott, M. (1976). Technische Mapnahmen zur Erhöhung der Verteilgenauigkeit von FeldSpritzgeräten. *Landtechnik*, 3. 112–115 [in German].
5. Kushel, V.Yu. & Chijevskiy, A.L. (1979). Vliyanie prodolnykh kolebaniy shtangi na raspredelenie udobreniy [Influence of longitudinal vibrations of the boom on the distribution of fertilizers]. *Tez. dokl. nauch.-proizv. konf – Theses of the scientific-production conference. Part. I*. Minsk [in Russian].
6. Maslo, I.P. & Terehov, A.P. (1981). *Statisticheskii analiz ravnomernosti raspredeleniya materialov [Statistical analysis of the uniformity of the distribution of materials]*. V kn. : *Mehaniz. i elektrif. sel. hoz-va* [in Russian].
7. Ozols, Ya.G., Vartukapteinis, K.E. & Karklinsh, A.A. (1979). *Primenenie i mehanizatsiya vneseniya jidkih kompleksnykh mineralnykh udobreniy [The use and mechanization of the introduction of liquid complex mineral fertilizers]*. Riga : Liesma [in Russian].
8. Irla, E. (1980). Feldspritzgeräte – Ausrüstung, Arbeitsqualität und Kosten. *Schweizer Landtechnik*. Jg 42.7. 436–443, 446–448 [in German].
9. Speelman, L. (1973). Die gleichmäßige Verteilung von Spritz-brtihen auf unehehem Gelände ist mit den heutigen Spritzbalken-und Dusenkonstruktionen meistens unbefriedigend. *Grundl. Landtechnik*, Bd. 23. 1. 25–27 [in German].
10. Musillami, S. (1978). La reduction des coöts des applications de produits agropharmaceutiques passe par la precision des materials et leur bonne mise en oeuvre. *Tract. Mach.* Vol. 54. 3. 169–176 [in German].
11. Norden, J. (1982). *Spritztechnik in Pflanzenschutz und Düngung*. Münster – Hiltrup: Landwirtschaftsverlag GMBH. 156 [in German].
12. Ripke F.O. (1981). Die richtige Düse für ihre Pflanzenschutzspritze. *Agrar Übersicht*. Bd. 32. 10. 30–32 [in German].
13. Vartukapteinis, L.E. (1984). Obosnovanie parametrov i elementov konstruktssii shtangovykh opryskivately [Substantiation of parameters and design elements of boom sprayers]. *Candidate's thesis*. Elgava [in Russian].
14. Babii, A.V., Oliynyk, V.Ye. & Mykhalkiv, A.Y. (2021). Doslidzhennya vplyvu polozhennya shtanhy obpryskuvacha na vidkhylennya normy vnesennya robochoho preparatu [Investigation of the influence of the position of the sprayer boom on the deviation of the application rate of the working solution]. *Materialy Vseukrayins'koyi naukovoï konferentsiyi molodykh uchenykh i naukovo-pedahohichnykh pratsivnykiv – Proceedings of the All-Ukrainian scientific conference of young scientists and scientific-pedagogical workers*. Uman': VPTs «Vizavi», 155-157 [in Ukrainian].
15. Babiy, A.V. (2019). Analiz parametriv shtanhovoho obpryskuvacha z metoyu zbil'shennya yoho produktyvnosti [Analysis of the parameters of the boom sprayer in order to increase its productivity]. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research.*, Vol. 10, 4, 51–55 [in Ukrainian].
16. Babiy, A.V. (2021). Doslidzhennya vplyvu vysoty vstanovlennya shtanhy na rivnomirnist' obpryskuvannya za shyrynoyu zakhvatu [Investigation of the impact of the height of the bar installation on the uniformity of spraying over the width of the grip]. *Zbirnyk tez dopovidey mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi onlayn konferentsiyi «Suchasni problemy ta perspektyvy rozvytku mashynobuduvannya Ukrainy» – Collection of theses of the international scientific-practical online conference «Modern problems and prospects for the development of mechanical engineering in Ukraine»* (pp.118-120) [in Ukrainian].

Andrii Babii, Assos. Prof., DSc., **Volodymyr Dzyura**, Assos. Prof., DSc., **Ivan Holovetskyi**, post-graduate Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

Investigation of the Effect of Vertical Oscillations of the Sprayer Boom on the Uniformity of Spraying

At the present stage of development of technologies for growing agricultural crops, the technological operation of spraying remains relevant. This method performs chemical protection of plants and their nutrition as well. Bar sprayers are still the main machines. The final result - crop yield depends on the technical efficiency of

spraying. Other factors that need to be maintained in chemical protection include compliance with the rate of outflow per unit target area.

Based on this, the factors that affect the technical efficiency of spraying were analyzed. Among them, the influence of the position of the rod on compliance with the rate of outflow of the working solution per unit area is highlighted. To realize the purpose of the work, which is to find the allowable amplitude of oscillation of the rod, an analysis of a number of literature sources was done. From there, the link between the height of the rod above the treatment object and the pour rate is established. Based on the obtained criteria, a model is constructed, which connects the height of the bar installation above the cultivated area and the quantitative flow through the spraying device per unit of processing area. The implementation of the model is a numerical experiment, which allowed to obtain the percentage numerical values of the uneven coverage of the processing area. Such results were obtained for models that simulate spraying of areas with continuous application of the working solution and treatment of row crops.

According to calculations, the following results were obtained. When continuous application of the working solution and the use of sprays with a spray angle $\alpha_{\phi} = 120^{\circ}$, the minimum installation height of the bar above the workpiece must be $\geq 0,15$ m; for sprayers with $\alpha_{\phi} = 80^{\circ}$ – height $\geq 0,15$ m.

When processing row crops with rows of 0,45 m and the width of the effective area of spraying 0,15 m, we will have: for sprays $\alpha_{\phi} = 80^{\circ}$ the minimum optimum height of installation of a bar is 0,6 m – amplitude $\pm 0,045$ m; for sprayers with $\alpha_{\phi} = 120^{\circ}$ – 0,43 m $\pm 0,04$ m.

When processing row crops with rows of 0,7 m and an effective spraying area of 0,3 m, we will have: for sprays $\alpha_{\phi} = 80^{\circ}$ the minimum optimum height of installation of a bar is 0,6 m – amplitude $\pm 0,08$ m; for sprayers with $\alpha_{\phi} = 120^{\circ}$ – 0,6 m.

vertical oscillations, bar, spray, width of row spacing, working solution.

Одержано (Received) 26.02.2022

Прорецензовано (Reviewed) 14.03.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

УДК. 633.854.54: 338.43 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.226-235](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.226-235)

В.Ф. Дідух, проф., д-р техн. наук, **В.В. Буснюк**, асп., **М.В. Бодак**, асп.

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

e-mail: Didukh_V@ukr.net

Обґрунтування обладнання для збирання льону олійного зернозбиральним комбайном

В статті проводиться аналіз технологій збирання льону олійного з використанням зернозбирального комбайна. Тривалі дослідження у Луцькому НТУ вказують на можливість застосування брання стеблостою льону олійного. Запропонована конструкція широкозахватного бранального апарату для даного способу з врахуванням сучасної методології створення сільськогосподарської техніки. Визначено необхідні робочі органи, які забезпечують формування потоку групи стебел і передачу їх на жатку зернозбирального комбайна. Встановлена умова нерозривності потоку групи стебел для забезпечення рівномірної подачі у молотильний апарат для якісного відділення насіння.

льон олійний, брання, обладнання, комбайн, стеблостій, група стебел, потік, насіння, сили, вальці, опорна поверхня

Постановка проблеми. Льон олійний – сільськогосподарська культура, призначена для отримання олії з насінневої частини, врожайність якої сягає 20 ц/га і більше. Насіннєві коробочки розміщуються на розгалуженій частині стебла, яка у процесі збирання створює додаткові труднощі при формуванні потоку групи стебел при передачі їх на жатну частину зернозбирального комбайна для якісного обмолоту.

Поширення льону олійного по всій території України з різними кліматичними умовами вимагає пошуку нових технологій збирання для збереження всього вирощеного врожаю. Традиційна технологія для територій Півдня – пряме комбайнування не завжди підходить для застосування в інших кліматичних зонах через формування високого стеблостою з врожайністю соломи більше 40 ц/га та наявності у стеблах волокна. Експериментальні та польові дослідження вказують на можливості реалізації у технологіях збирання таких технічних засобів, як: очісувальну жатку, роторні косарки, підбирачі валків, бральні вальці різних конструкцій та ін..

Прийняття правильного конструктивного рішення, при розробці обладнання, залежить від врахування відомих критеріїв[1] для забезпечення головного «...підвищення продуктивності машин і агрегатів при виконанні відповідних технологічних процесів, або розширення універсальності сільськогосподарської машини» [1]. Тому, створення обладнання для збирання льону олійного зернозбиральним комбайном є важливим завданням і умовою відродження галуззі льонарства в особливих кліматичних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загалом всі відомі технології збирання льону олійного спрямовані на збереження тільки насіння, яке дає достатній економічний ефект. Значний потенціал є і у стеблах, але після подрібнення їх заорюють у ґрунт або спалюють, чим наносять значної шкоди навколишньому середовищу[2]. Закордонні дослідники приділяють значну увагу якості волокна не тільки у льону-довгунцю, але й у льоні олійному. Так, у роботі, Єржи Манковського та ін., [3] вказується, що технологія скошування льону-довгунця є проблемним для її застосування. Х. Моррисон, Д. Д. Арчибальд та ін. у [4] виявили вплив технологій природного та штучного мочіння на формування міцності волокна. Поява волокна у стеблах льону олійного ускладнює роботу сегментно – пальцевого різального апарату, що призвело до застосування технології роздільного збирання і очісування коробочок льону олійного на корені[5, 6]. Проведені значні дослідження з різання стеблових матеріалів як за кордоном, так і в Україні[7, 8, 9].

Значну увагу комплексному використанню врожаю льону олійного приділяють у Херсонському національному технічному університеті[10, 11]. При цьому виробляється особливий підхід до можливості використання волокна із стеблової частини врожаю, яка залишається після її зрізання сегментно-пальцевим різальним апаратом.

Нові конструктивні рішення у машинах для збирання льону полягають у створенні нових робочих органів, які одночасно паралельно виконують технологічний процес[12, 13] або їх модернізацію спрямовують на збільшення універсальності[14].

Постановка завдання. Таким чином, мета дослідження полягала у визначенні необхідних робочих органів для застосування широкозахватного обладнання при збиранні льону олійного і з'ясуванні умови нерозривності потоку групи стебел при його русі до жатної частини зернозбирального комбайна.

Виклад основного матеріалу. Розроблення обладнання для універсалізації зернозбирального комбайна збільшує його можливості використовувати при збиранні окремих сільськогосподарських культур з врахуванням умов вирощування та стану стеблостою. Висота стеблостою льону олійного, вирощеного в умовах Західного Полісся може сягати одного метра. При цьому, у стеблах формується коротке неорієнтоване волокно, яке перешкоджає якісному їх зрізуванню на корені у період збирання.

Пропозиції щодо створення бральних апаратів для льону олійного мають місце у багатьох дослідників. Найбільш перспективними конструкціями бральних апаратів є конструкції, які дозволяють їх монтувати на стандартні жатки зернозбиральних комбайнів[15, 16] з врахуванням ширини захвату. Якісна робота робочих органів у період збирання, в певній мірі, залежить від фізико-механічних властивостей стебел льону олійного та стану стеблостою загалом (грунтового середовища), погодних умов. Тому, проведені дослідження у польових умовах(рис.1) протягом останніх п'яти років на полях Волинської дослідної станції інституту картоплярства НААН з встановлення зусилля витягування стебел з ґрунту різняться за значеннями (табл.1..).

Досліди проводили на сорті Лірина для різної кількості стебел від одного до десяти, як з одного рядка, так і суміжних для встановлення середнього значення зусилля брання. При цьому посіви не вирізнялися рівномірністю дозрівання, що дозволило вибирати ділянки, які характеризували фази стиглості льону олійного. Початок досліджень: середина липня, кінець – до 01.09. Затискач фіксували на різній висоті від мінімальної відносно поверхні ґрунту та у місцях гілкування стебел. Окремими дослідями, були досліди з використанням циліндричної опорної поверхні різного діаметру, що дозволяло змінювати кут прикладання зусилля брання. Як показали досліди, запропонований принцип використання опорної поверхні для зміни зусилля брання не є ефективний, що призводило до значної кількості обривання стебел на різній висоті. Найкраще вибирались стебла за умови вертикального прикладеного зусилля.



а)



в)

Рисунок 1 – Дослідження зусилля брання льону олійного в польових умовах:

а) у вертикальній площині; в) з використанням опорної поверхні

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 1 – Значення зусилля брання льону олійного, Н

Рік проведення дослідів і фаза стиглості	Рання жовта	Жовта	Повна
2017	16,6 – 94,5	23,2 – 97,8	33,2 – 148,9
2018	32,4 – 140,1	32,0 – 122,3	52,1 – 188,9
2019	11,9 – 107,8	25,4 – 130,1	21,0 – 117,6
2020	37,8 – 133,5	31,2 – 135,6	46,5 – 169,7
2021	28,9 – 96,7	30,1 – 126,4	39,8 – 141,2

Джерело: розроблено авторами

Отримані значення зусилля брання коливаються у межах 15 – 190 Н. Дані значення вказують, що забезпечення якості витягування стебел з ґрунту, необхідне миттєве прикладання зусилля у вертикальній площині з одного рядка.

На основі проведених досліджень запропоновано структурно-логічну схему обладнання для зернозбирального комбайну (рис. 2) з використанням операції брання. Призначення вказаної операції – миттєве витягування стебел з ґрунту. Аналіз даної схеми дозволяє визначитись з необхідними робочими вузлами для забезпечення якісного збирання льону олійного будь якої фази стиглості, не змінюючи конструкції жатної частини.

У сільськогосподарському виробництві, процес брання застосовується переважно при збиранні льону – довгунця для отримання високоякісного волокна. Відповідно до цього, пропонуються нові бральні апарати з подальшим обґрунтуванням їх параметрів [18]. Основою процесу брання є затискання стебел, групи стебел рухомими поверхнями робочого органу. При незначній ширині захвату машини, такими поверхнями виступають безкінцеві паси, шків, тощо. Використання вказаних елементів не дозволяє збільшувати ширину захвату до необхідної величини. Тому, при створенні нового обладнання, необхідно розробити структурно – логічну схему.

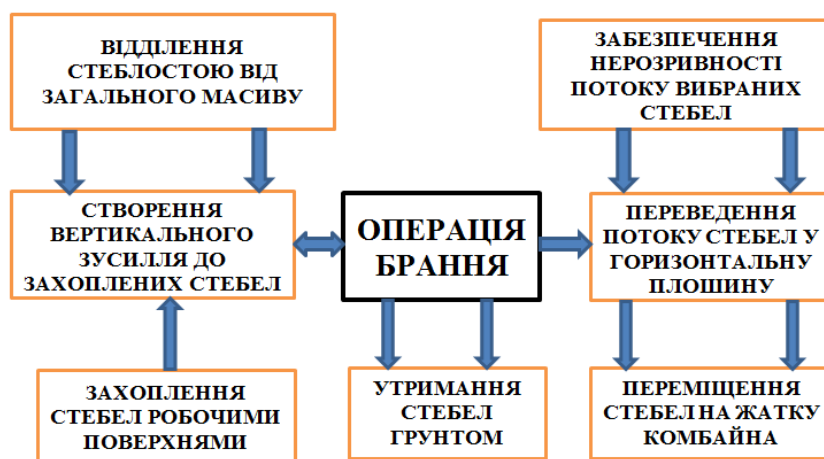


Рисунок 2 – Структурно – логічна схема обладнання зернозбирального комбайну для збирання льону олійного у фазі повної стиглості

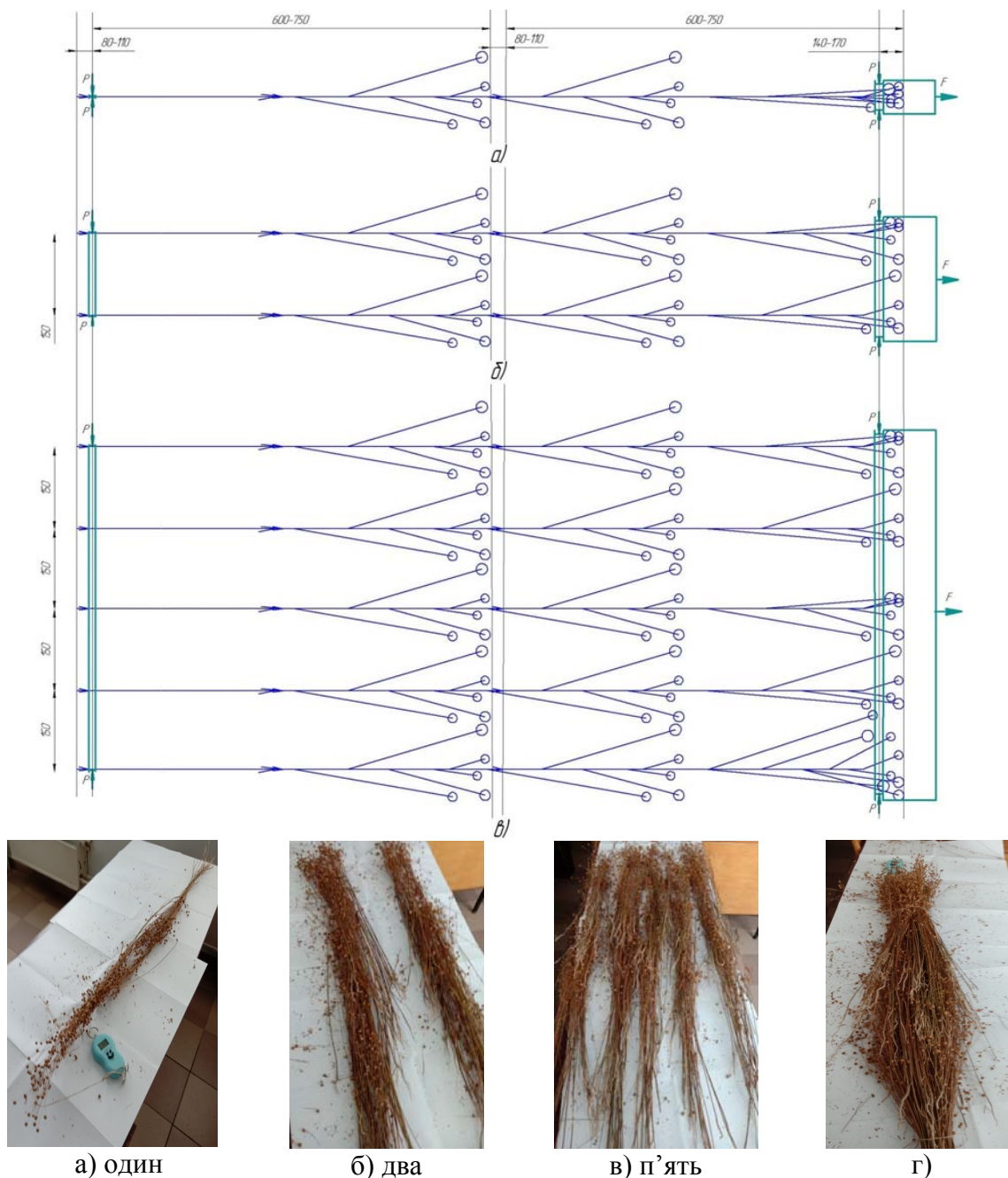
Джерело: розроблено авторами

Застосування широкозахватних жаток у зернозбиральних комбайнах забезпечує їм високу продуктивність при збиранні сільськогосподарських культур, що дає можливість забезпечити виконання технологічної операції у визначенні агротехнічні терміни. Складність процесу різання стебел льону олійного сегментно – пальцевим різальним апаратом доведена у виробничих умовах. Особливо у фазі повної стиглості, коли у стеблах сформовано волокно за всією їх довжиною.

Як відомо, на зернозбиральних комбайнах встановлюють сегментно-пальцеві різальні апарати нормального різання з відстанню між сегментами 76,2 мм. Таким чином, для захоплення стебел необхідні робочі поверхні з врахуванням даного параметру. Поширення ідеї щодо використання у якості робочих елементів обертових горизонтальних вальців [15, 16] вказує, що відстань між осями таких вальців має становити також 76,2 мм. Створення вертикального зусилля забезпечується попарне обертання вальців. Для якісного брання стеблостою передбачено робочий орган, який працює за принципом мотовила. Також, можливе попадання стебел у зону захоплення вальців з паралельних рядків. При цьому стебла будуть відхилятися від вертикалі. Польові дослідження вказують, що у такому випадку, виникають умови розриву стебла.

Тому, кут відхилення стебла є важливим чинником, особливо при дослідженні якості брання стебел запропонованим обладнанням. Вибірні стебла з ґрунту необхідно спрямувати нерозривним потоком на жатку зернозбирального комбайна.

Дослідження явища нерозривності потоку було проведено у лабораторних умовах. Для цього було проведено моделювання вибрання стебел від одного до п'яти суміжних рядків (рис. 3). Складність забезпечення нерозривності потоку групи стебел, при переміщенні їх на жатку зернозбирального комбайна, пов'язано з будовою самих стебел. Їх розгалуження проявляється від самого кореня і до верхівкової частини, що викликає між ними зачеплення вже на початковому етапі при захопленні лопатями. В свою чергу, нерозривність потоку необхідна для забезпечення якості відділення насіння, так як це забезпечує рівномірність подачі стеблостою у молотильний апарат комбайна.



а) один

б) два

в) п'ять

г)

Рисунок 3 – Моделювання кількості вибраних рядків у горизонтальному положення для визначення розтягуючого зусилля при об'єднанні потоків; (г) - з п'яти рядків

Джерело: розроблено авторами

Моделювання вибраних стебел проводили з врахуванням відстані між стеблами у рядку рівною 150 мм, накладаючи стебла одне на одне із зміщенням у 50 мм. Для випадків, коли встановлювали зусилля розтягу F_p більше одного рядка, об'єднували стебла в один потік, нівелюючи величину міжрядь. Після чого прикореневу частину зафіксували, а до верхівкової приєднували динамометр.

В результаті проведених досліджень встановлено, що для потоку групи стебел з одного рядка розтягуюче зусилля коливається у межах 11,6 – 12,2 Н, з двох – 31,0 – 39,1 Н, трьох – 65,3 – 71,2 Н. У випадку збільшення кількості рядків та об'єднання їх у суцільний потік, зусилля різко зростає і не представляє можливості його встановити. Дані результати вказують, що зчеплення у потоках з груп стебел викликають силу, яка здатна забезпечити переміщення вибраних стебел на жатку комбайна.

Результати проведених польових і лабораторних досліджень дозволили розробити компоновальну схему обладнання для збирання льону олійного способом брання (рис.4).

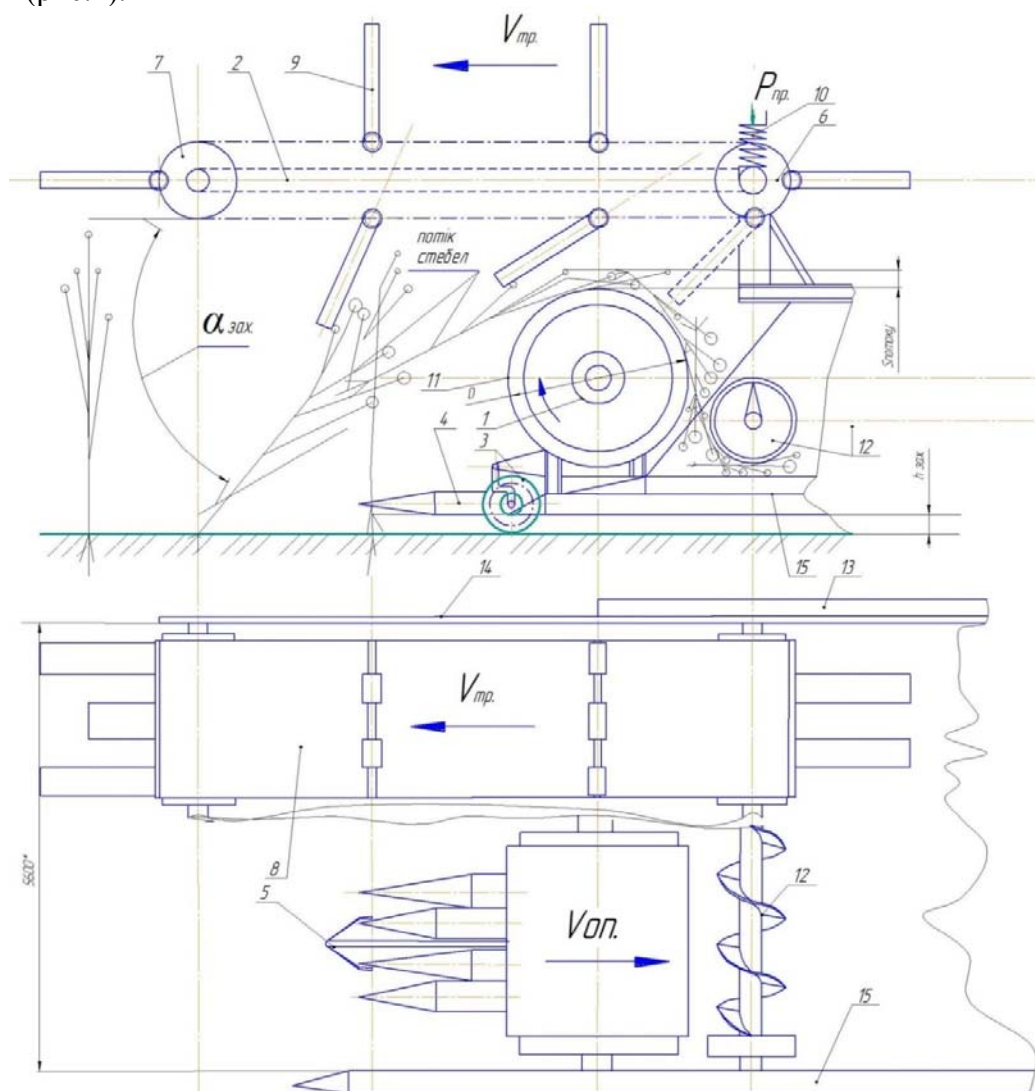


Рисунок 4 - Схема широкозахватного обладнання для збирання льону олійного способом брання:

- 1 – опорна поверхня; 2 – механізм захоплення стебел; 3 – опорні колеса; 4 – пальцевий бральний механізм; 5 – подільник; 6 – привідний барабан; 7 – натяжний барабан; 8 – тяговий ланцюг; 9 – притискні планки; 10 – пружини; 11 – шорстка поверхня; 12 – шнек жатки; 13 – рама;

14 – рама механізму захоплення стебел; 15 – корпус жатки

Джерело: розроблено авторами

Основною проблемою у виготовленні даного обладнання є ширина захвату. Це відноситься, в першу чергу, до механізмів для відділення стеблостою від загального масиву та брання стебел. Необхідність встановлення опорної поверхні між вказаними механізмами сприяє нерозривності подачі потоку стеблової маси на платформу жатної частини комбайна. При цьому опорна поверхня 1 циліндричної форми діаметром D з покритою шорсткою поверхнею 11 встановлена на двох опорах і вільно обертається у підшипникових вузлах.

Найбільш складним робочим органом даного обладнання є механізм захоплення стебел 2, на що вказують польові дослідження, адже в процесі вегетації рослин відбувається їх з'єднання між собою верхівковою частиною. Тому, застосування стандартного мотвила є проблемним для використання способу брання при збиранні льону олійного. Робочий орган у вигляді стиснутого мотвила забезпечує почергове захоплення стеблостою різними за довжиною планками 9, які шарнірно встановлені на тягових ланцюгах. Механізм захоплення стебел 2 встановлюється на окрему раму 13, яка з'єднується з жаткою комбайна а, зміна кута $\alpha_{\text{зах.}}$ дозволяє збирати різний за висотою стеблостій. Мінімальна висота захоплення ($h_{\text{зах.}}$) стебел вальцями 4 залежить від регулювання опорних коліс 3 брального механізму. Між двома парами вальців передбачені подільники 5.

Якісне брання стебел з ґрунту залежить від стану стеблостою та багатьох інших випадкових факторів, пов'язаних з природно-кліматичними умовами у період збирання. Лабораторна перевірка розробленого вальцевого механізму показала, що якість вибраних стебел коливається у межах 95 - 98% з врахуванням стебел, які розривались у зоні контакту з вальцями. Таким чином, поставлене завдання з бранням стебел робочим органом виконується і втрат насіння фактично на даному процесі не відбувається. Тому, для забезпечення нерозривності потоку стеблової маси необхідна циліндрична опорна шорстка поверхня 11, яка повинна забезпечити наступні умови: $P_{\text{оп.}} \leq P_{\text{р.п.}} \leq F_{\text{р.}}$. Тут $P_{\text{оп.}}$ – сила витягування стебел з ґрунту, Н; $P_{\text{р.п.}}$ – сила, яка забезпечує рух потоку групи стебел, Н; $F_{\text{р.}}$ – розтягуюче зусилля, Н, встановлюється експериментально. Якщо $P_{\text{р.п.}} \geq F_{\text{р.}}$, то переміщення потоку стебел опорною поверхнею 11 відбувається за умови: $V_{\text{поток.}} = V_{\text{т. л.}} = V_{\text{к.}}$, де: $V_{\text{поток.}}$ – швидкість потоку з групи стебел м/с; $V_{\text{т. л.}}$ – швидкість тягового ланцюга механізму відділення стеблостою від загального масиву, м/с; $V_{\text{к.}}$ – швидкість поступального руху комбайна, м/с, у напрямку у (рис. 5).

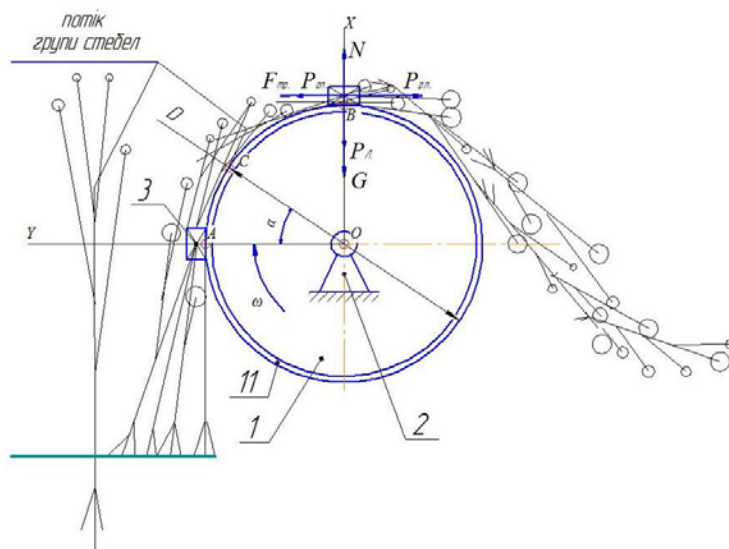


Рисунок 5 – Схема до визначення умов нерозривності потоку групи стебел
Джерело: розроблено авторами

Розглянемо формування та рух потоку групи стебел льону олійного, розміщених на опорній поверхні. Для цього необхідно зробити наступні допущення:

- стебла льону олійного однакової висоти;
- зусилля витягування стебел $P_{оп.}$ коливається у межах, встановлених експериментально та є максимальним для одночасного брання п'яти стебел;
- приведена маса потоку групи стебел $m_{п.}$ є сталою величиною;
- опорна поверхня обертається з постійною кутовою швидкістю ω .

Опорна поверхня 1 з шорсткою поверхнею 11, вільно обертається на двох опорах 2. З одного рядка у вертикальній площині формується потік з 4 - 5 стебел, одночасно вибраних бральним механізмом і не вибраних стебел, які створюють силу опору $P_{оп.}$. В результаті з'єднання насіннєвими головками у т. А, відбувається контакт потоку з шорсткою поверхнею, яка обертається під дією максимальних сил, вказаних у т. В. Таким чином, аналіз формування та переміщення потоку групи стебел під дією вказаних сил, необхідно розглядати у межах $0 \leq \alpha \leq 90^0$. Після проходження т. В, вірогідність розриву потоку стебел відсутня. Розглянемо дію сил на приведену масу $m_{п.}$ з потоку групи стебел, який формується у т. А та переміщається у т. В з використанням методів теоретичної механіки для переміщення твердих тіл шорсткими циліндричними поверхнями[19].

Серед вказаних сил, сила $P_{р.п.}$ та $P_{тр.}$ забезпечують нерозривність переміщення потоку стебел на жатну частину комбайна. Сила тертя $P_{тр.}$, що виникає у т. А, має додатній знак і сприяє обертанню опорної поверхні. Сила $P_{р.п.}$ на початковому етапі дорівнює розтягуючому зусиллю $F_{р.}$ з поступовим зростанням від дії притискних лопаток $P_{л.}$. Позитивний ефект для даного процесу має сила G . Проте, внаслідок малого її значення, в окремих випадках, можна нехтувати. Відповідно змінною буде нормальна реакція N , від т. А до т. В. Негативною силою, яка впливатиме на нерозривність потоку групи стебел, є сила опору $P_{оп.}$ від реакції ґрунту, яка постійно буде змінною у т. А, так як вона залежить від кількості стебел які попадають у формуючий потік, не залежно від того чи вони вибрані з ґрунту.

Висновки. Поєднання результатів польових і лабораторних досліджень з аналізом сил при переміщенні стебelloвої маси у вигляді потоку групи стебел з використанням опорної поверхні дозволило запропонувати конструктивну – компоновальну схему обладнання для збирання льону олійного у фазі повної стиглості. Дане обладнання передбачено встановлювати на жатну частину зернозбирального комбайна без зміни її конструкції. Глибокий аналіз сил, що проведений для циліндричної опорної поверхні, необхідний також для використання іншого обладнання при збиранні льону олійного роздільним способом – скошуванням стеблостою та вкладання його у валки. Після дозрівання стебelloвої маси у валках, використовують підбирач для збереження всього врожаю льону олійного.

Список літератури

1. Сисолін П.В., Сисоліна І.П. Сучасна методологія створення сільськогосподарської техніки (на прикладі висівного апарата): монографія. Кіровоград: Лисенко В.Ф., 2014. 120 с.
2. Optimization on efficient combustion process of small-sized fuel rolls made of oleaginous flax residues / V. Didukh, V. Busnyuk, G. Boyko, O. Shubalyi . *INMATEH – Agricultural engineering*. Vol. 62, No. 3/2020, Bucharest 2020, p. 361. URL: <https://doi.org/10.35633/inmateh-62-38>. (дата звернення: 04.01.2022)
3. Jerzy Mańkowski, Wojciech Maksymiuk, Grzegorz Sychalski, Jacek Kołodziej, Andrzej Kubacki, Damian Kupka & Krzysztof Pudelko . Research on New Technology of Fiber Flax Harvesting, *Journal of Natural Fibers*. 2018. 1. P. 53–61.
4. Morrison, W. H., Archibald, D. D., Sharma, H. S. S., Akin, D. E. Chemical and physical characterization of water-and dew-retted flax fibers. *Industrial Crops and Products*. 2000. 12. P. 39–46.
5. Шувар А.М., Войтович Р.М. Оцінка способів збирання льону олійного. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2012. № 17. С. 149-153.

6. Пахучий А.М. Аналіз та напрямки підвищення ефективності жниварок обчисувального типу. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2018. №13. С. 55-61.
7. Ягелюк С.В., Дідух В.Ф., Артюх Т.М., Голій О.В. Зусилля різання біомаси олійних луб'яних культур з врахуванням вологості. *Сільськогосподарські машини: зб. наук. ст.* 2021. Вип. №46. С. 124...132.
8. Munder, F. et al., Results of an Advanced Technology For Decortication of Hemp, Flax and Linseed, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2004. 418. P. 165-179.
9. Шеїна А.В., Заплетніков І.М. Гордієнко О.В. Експериментальні дослідження процесу різання рослинних матеріалів. *Актуальні питання сучасної науки*. 2014. №33. С. 52–61.
10. Наукові основи комплексної переробки стебел та насіння льону олійного : монографія / Л. А. Чурсіна, Г. А. Тихосова, О.О. Горач, Т.І. Янюк. Херсон: Олді-плюс, 2011. 356 с.
11. Головенко Т.М., Бойко Г.А., Іваненко О.О. Шовкомуд О.В. Загальна характеристика показників льону олійного з метою виготовлення інноваційних товарів. *Молодий вчений*. 2016. 5 (32). С. 218-222
12. Дударев І.М. Теоретичні основи модернізації машин для виробництва льону: монографія . Луцьк: Ред.-вид. відділ Луцького НТУ, 2015. 268 с.
13. Борисюк Д.В., Колеснік І.А. Тенденції розвитку техніки і технологій для збирання льону. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2015. №1(91). С. 13-17.
14. Дацюк Л.М., Юхимчук С.Ф., Вржеш М.В., Сай В.А. Обґрунтування параметрів універсальної льонозбиральної машини. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2019. Том 2, № 13. С. 63-67. URL: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i13>. (дата звернення: 12.01.2022)
15. Жатка для збирання льону олійного: пат. №118379 UA: МПК A01D45/06, A01D41/14, A01D63/02, A01D69/03(2006.01). Заявл. 18.11.2016; опуб.10.01.2019; Бюл.№1.
16. Пристрій для збирання льону олійного: пат. на КМ №148359 UA: МПК A01 D45/00, A01 D41/14. заявл. 05.04.2021; опубл. 28.07.2021; Бюл. № 30.
17. Буснюк В.В. Обґрунтування конструкції та параметрів вальцювального апарата для збирання льону олійного. *Сільськогосподарські машини : зб. наук. ст.* 2019. Вип. №43. С. 30...40.
18. Хайлис Г.А. Теория льноуборочных машин . М.: Росинформагротех, 2011. 322 с.
19. Заика П.М. Избранные задачи земледельческой механики: прак. пособ. Киев: Изд.- во УСХА, 1992. 512 с.

References

1. Sysolin, P.V. & Sysolina, I.P. (2014). *Suchasna metodologia stvorenia silskogospodarskoi techniky (na prykladi vysivnogo aparata)* [Modern methodology for the creation of agricultural machinery (on the example of a sowing device)]. Kirovograd : Lysenko V.F. [in Ukrainian].
2. Yaheliuk, S., Busnyuk, V., Boyko, G. & Shubalyi, O. (2020). Optimization on efficient combustion process of small-sized fuel rolls made of oleaginous flax residues . *INMATEH – Agricultural engineering. Vol. 62, No. 3/2020*, Bucharest 2020, p. 361. Retrieved from <https://doi.org/10.35633/inmateh-62-38> [in English].
3. Jerzy Mańkowski, Wojciech Maksymiuk, Grzegorz Szychalski, Jacek Kołodziej, Andrzej Kubacki, Damian Kupka & Krzysztof Pudełko (2018). Research on New Technology of Fiber Flax Harvesting, *Journal of Natural Fibers*, 1, p. 53–61 [in English].
4. Morrison, W. H., Archibald, D. D., Sharma, H. S. S., Akin, D. E. (2000). Chemical and physical characterization of water-and dew-retted flax fibers. *Industrial Crops and Products*, 12, 39–46 [in English].
5. Chyvar, A.M. & Voaitovych, R.M. (2012). Ocinka sposobiv zbyrania lionu olijnogo [Estimation of harvesting methods for oil flax]. *Naukovo-technichnyj bijleten olijnykh kuljtur NNAN – Scientific and Technical Bulletin of the Institute of Oilseed Crops NAAS*, 17, 149-153 [in Ukrainian].
6. Pachuchyj, A.M. (2018). Analiz ta napriamky pidvychnia efektyvnosti gnuvarok obchisuvaknogo typu [Analysis and directions of improving the effectiveness of the rectangular type]. *Technichnyj servis agropromyslovogo, lisovogo ta transpotnogo kompltksiv – Technical service of agriculture, forestry and transport systems*, 13, 55-61 [in Ukrainian].
7. Jgelijk, S.V., Didukh, V.F. Artijch, T.M. & Golij, O.V. (2021). Zusyllij rizannij biomasy olijnykh lubijnykh kuljtur z vrachuvannijm vologosti [Зусилля різання біомаси олійних луб'яних культур з врахуванням вологості]. *Siliskogospodarsi machyny – Agricultural machines*, Vol.46, 124...132 [in Ukrainian].
8. Munder, F. et al. (2004). Results of an Advanced Technology For Decortication of Hemp, Flax and Linseed, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 418, 165-179 [in English].
9. Cheijna, A.V., Zaplijnikov, I.M. & Gordienko, O.V. (2014). Eksperymentalijni doslidgennij procesu rizannij rosljnykh materialiv [Experimental studies of the process of cutting plant materials]. *Aktualijnij voprosy sovremennoj nauki – Current issues of modern science*, 33, 52–61 [in Ukrainian].
10. Chyrsina, L.A., Tichosova, G.A., Gorach, O.O. & Jinok, T.I. (2011). *Naukovi osnovy kompleksnoj pererobky stebel ta nasinnij lionu olijnogo* [Scientific basis of complex processing of linseed stems and seeds]. Cherson: Oldi-plijs [in Ukrainian].

11. Golovenko, T.M., Boijko, G.A., Ivanenko, O.O. & Chovkomud, O.V. (2016). Zagalna charakterystyka pokaznykiv lionu olijnogo z metoij vygotovlennij innovacijnych tovariv [The general description of oil flax characteristics aimed at manufacturing innovative products]. *Molodyj vchenyj – A young scientist.*, 5 (32), 218-222 [in Ukrainian].
12. Dudarev, I.M. (2015). *Teoretychni osnovy modernizacij machyn dla vyrobnyctva lionu [Theoretical foundations of modernization of machines for the production of flax]*. Luck: Red.-vyd. viddil Luckogo NTU [in Ukrainian].
13. Borysijk, D.V. & Kolisnyk, I.A. (2015). Tendencij rozvytku techniky i tehnologij dla zbyranna lionu [Trends in the development of machinery and technologies for harvesting flax]. *Technika, energetyka, transport APK – Engineering, Energy, Transport AIC*, 1(91), 13-17 [in Ukrainian].
14. Dacijk, L.M., Jchymchuk, S.F., Vrgech, M.V. & Saij, V.A. (2019). Obgruntuvanna parametriv universakijnoj lojnozbyralijnoj machyny [Justification of parameters of a universal flax harvester]. *Suchasni tehnologij v machynobuduvanni ta transporti – Advances in mechanical engineering and transport*, Vol. 2, 13, 63-67. Retrieved from <https://doi.org/10.36910/automash.v2i13> [in Ukrainian].
15. Pat. №118379 UA, MPK A01D45/06, A01D41/14, A01D63/02, A01D69/03(2006.01). Gatka dla zbyranna lionu [Reaper for harvesting oilseed flax]. Stated November 18, 2016; has been published October 10, 2019, Bul. No. 1.
16. Patent na KM №148359 UA, MPK A01 D45/00, A01 D41/14. Prystrij dla zbyranna lionu olijnogo [A device for collecting oilseed flax]. Stated April 05, 2021; has been published July 28, 2021, Bul. No. 30.
17. Busyijk, V.V. (2019). Obgruntuvanna konstrukcii ta parametriv vakijcojvogo bralijnogo aparata dla zbyranna lionu olijnogo [Substantiation of the structure and parameters of the drum roller for cleaning flax oily]. *Siljiskogospodarsi machyny: zb. nauk. st. – Agricultural machines*, Vol. 43, 30-40 [in Ukrainian].
18. Chajjlis, G.A. (2011). *Teorij lojnouborochnych machyn [Theory of flax harvesters]*. Moscow: «Rosinformagrotech» [in Russian].
19. Zaika, P.M. (1992). *Izbrannye zadachi zemledelcheskoj mechaniki [Selected tasks of agricultural mechanics]*. Kyjiv: Izd.- vo USCHA [in Russian].

Volodymyr Didukh, Prof. DSc., **Vitalij Busyijk**, mast., **Maksym Bodak**, post-graduate
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

Substantiation of Equipment for Harvesting Oil Flax with a Combine Harvester

Presentation of the results of experimental field research, laboratory to determine the conditions for harvesting oilseed flax stalks in the phase of full maturity. Outlining the conditions for the technological operation of harvesting oilseed flax by extracting stems from the soil. Presentation of the methodology for determining the necessary working elements of the equipment for extracting stems from the soil and forming the continuity of the flow of a group of stems on the harvesting part of the combine harvester.

The problem that arises in the process of harvesting flax oil in the phase of full maturity is due to the presence of fiber in the stems, which complicates the work of the segmental-finger cutter. Therefore, the collection of such stems is carried out by the method of taking (extraction from the soil). This phenomenon requires the development of equipment for the universalization of the combine harvester, which increases its ability to be used in the harvesting of crops, taking into account the growing conditions and the state of the stalk. The experiments were conducted in the field on the Lyrina variety to establish the average value of the collection effort. The crops were not characterized by uniform ripening, which allowed to choose areas that characterized the maturity phases of oilseed flax. Start of research: mid-July, end - until 01.09. Accordingly, the study of the continuity of flow was conducted in the laboratory by simulating the selection of stems from one to five adjacent rows. It was found that a cylindrical support rough surface is required to ensure the continuity of the flow in the equipment. Based on the proposed structural and logical scheme, the main working units of the equipment to ensure high-quality harvesting of oilseed flax of any phase of ripeness without changing the design of the harvesting part of the combine harvester. These include: the mechanism of separation of portions of the stem from the total array and the picking device, which consists of pairs of rollers with horizontal axes of rotation and a distance between them of 76.2 mm.

Combining the results of field and laboratory studies with the analysis of forces when moving the stem mass in the form of a flow of a group of stems on the supporting surface allowed to offer a constructive - layout scheme of equipment for harvesting oilseed flax. This equipment is intended to be installed on the harvesting part of the combine without changing its design. The analysis of forces performed for the flow of stems moving inseparably on a cylindrical support surface is important for the study of the selection of the stem mass of crops from rolls.

flax, equipment, combine, stalk, flow, seeds, surface

Одержано (Received) 14.02.2022

Прорецензовано (Reviewed) 21.03.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

УДК 631.333:631.172

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.236-243](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.236-243)**А.С. Лімонт**, доц., канд. техн. наук*Житомирський агротехнічний коледж, м. Житомир, Україна**e-mail: andrespartak@ukr.net***З.А. Лімонт***Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна*

Прогнозування параметрів кузовних машин для внесення твердих органічних добрив

Мета статті полягала в обґрунтуванні тенденції зміни основних масово-розмірних параметрів кузовних машин для внесення твердих органічних добрив залежно від їх вантажопідйомності. Здійснений аналіз конструкцій машин виробництва підприємствами на території колишнього Радянського Союзу та сучасної України. Методи дослідження базувалися на вивченні основних споживчих параметрів машин з використанням відомостей, що наведені в Каталогах сільськогосподарської техніки і рекламній інформації підприємств-виробників кузовних машин. Опрацювання і узагальнення зібраних даних здійснені на засадах кореляційно-регресійного аналізу та з використанням стандартних комп'ютерних програм. За факторіальну ознаку в дослідженні прийнята вантажопідйомність машин, а за результативні – їх маса та габаритні довжина, ширина і висота.

З'ясовано, що залежно від вантажопідйомності машин їхні габаритні довжини і висота зростають за прямолінійними залежностями з визначеними кутовими коефіцієнтами. Зміна габаритної ширини кузовних машин для внесення твердих органічних добрив залежно від вантажопідйомності машин описується рівнянням зростаючої гіперболи.

кузовні машини для внесення твердих органічних добрив, маса, габаритна довжина, ширина, висота, вантажопідйомність, кореляція, рівняння регресії

Постановка проблеми. Удобрення ґрунту органічними добривами є одним із важливих чинників, що сприяє підвищенню урожайності сільськогосподарських культур та поліпшенню якості їх продукції. Це стосується і льону-довгунця, безпосереднє внесення під який органічних добрив у поєднанні з мінеральними підвищує урожайність насіння і волокна, покращує його номерність, міцність, гнучкість, тонину та розрахункову добротність пряжі [1]. Такий агротехнічний прийом позитивно відображується і на формуванні елементарних волокон на поперечному зрізі стебел льону-довгунця, з якими пов'язують вихід і якість волокна [2]. Якість технологічного процесу удобрення ґрунту зумовлена ефективністю використовуваних засобів механізації і зокрема кузовних машин для внесення твердих органічних добрив (ТОД) та параметрами цих машин.

Основними параметрами кузовних машин для внесення ТОД є вантажопідйомність і маса машин та габаритні довжина, ширина і висота. Ці параметри визначають можливість агрегування машин з тракторами відповідних класів, їх тягове завантаження, що зумовлює економічність та екологічність функціонування машинно-тракторних агрегатів (МТА), організацію їх роботи в загінці і вибір навантажувальних засобів для завантажування кузовів машин органічними добривами. Важливим є з'ясування вказаних параметрів кузовних машин для внесення ТОД сучасного покоління та пошук можливих якісно-кількісних зв'язків між ними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До чверті і понад чверть століття тому були опубліковані праці Н.М. Марченка, Г.И. Лічмана і А.Е. Шебалкіна [3], М.К.

Лінника і його співавторів [4], О.Я. Переходька і В.А. Ярощука [5] та П.М. Заїки [6]. В праці [3] висвітлені елементи методики проектування технологічного процесу застосування ТОД, конструкція і технологічні основи проектування робочих органів машин для внесення ТОД та енергоємність процесу їх розподілу з визначенням потужності на подолання опору відривання порції добрив від загальної маси, витрати потужності на виліт часток добрив і подолання сил інерції розкидальних барабанів та ін. питання. В праці [4] крім іншого наведена методика розрахунку потужності на привод конвеєра та розкидальних барабанів. О.Я. Переходько і В.А. Ярошук [5] наводять значення потужності на привод живильного транспортера, її втрати в трансмісії та залежність для визначення потужності на привод розкидальних барабанів. П.М. Заїка [6] розглядав опір гною розриванню і міцність при стисканні, що істотно впливають на енергоємність розподілу добрив та потужність привода робочих органів в дію від вала відбору потужності трактора. За дослідженнями С.М. Герука і С.М. Хоменка [7] застосування чверть еліпсних робочих органів в подрібнювальних барабанах кузовної машини для внесення ТОД поліпшує якість і сприяє зниженню енергоємності внесення добрив.

В.І. Мельник і О.А. Ромашенко [8], аналізуючи технології і технічні засоби внесення органічних добрив, оцінку роботи відповідних комплексів здійснювали за енергетичними показниками шляхом визначення енергоємності досліджуваних процесів. Енергоємність процесів оцінювали за витратою енергії на транспортування і внесення добрив в розрахунку на тону внесення добрив (МДж/т) залежно від відстані їх перевезення.

С.І. Павленко [9] до кузовної машини ПРТ-10 опрацював двобарабанний навісний пристрій, що покращує якість функціонування гноєрозкидача, включаючи подрібнення, змішування та аерацію сировини. Визначена енергоємність використання удосконаленої машини.

З наведеного короткого аналізу проведених досліджень і наявних публікацій за напрямом проектування і розрахунку кузовних машин для внесення ТОД та їх функціонування в технологічних процесах вирощування сільськогосподарських культур впливає, що опрацювання елементів методики проектування і розрахунку таких машин та їх використання для удобрення ґрунту вимагає подальших досліджень.

Постановка завдання. Метою роботи є з'ясування якісно-кількісних зв'язків між масою машин та їх габаритними довжиною, шириною і висотою з одного боку, а з іншого – їх вантажопідйомністю. Завдання дослідження: 1) сформулювати статистичні вибірки маси машин, їх габаритної довжини та габаритних ширини і висоти та вантажопідйомності розкидачів добрив; 2) визначити основні статистичні показники сформованих розподілів досліджуваних параметрів кузовних машин для внесення ТОД; 3) з'ясувати якісні і кількісні зв'язки між масою машин та їхніми габаритними розмірами і вантажопідйомністю досліджуваних засобів механізації внесення ТОД; 4) опрацювати модельні рівняння регресії прийнятих результативних ознак на визначену факторіальну; 5) проаналізувати опрацьовані модельні рівняння регресії і дати їх графічну інтерпретацію та зробити відповідні висновки.

Об'єкт та методика дослідження. В якості об'єкта дослідження визначені кузовні машини для внесення ТОД виробництва підприємствами на території колишнього Радянського Союзу і сучасної України. Обсяг статистичної вибірки при вивченні і аналізі досліджуваних параметрів кузовних машин становив 21 марку розкидачів добрив. Вихідні дані про параметри кузовних машин вибирали з їх технічних характеристик, що наведені в Каталогах сільськогосподарської техніки та рекламній інформації підприємств-виробників кузовних машин. За результативні

ознаки в дослідженні прийняті маса $m_{\text{од}}$ (т) машин та її габаритні довжина $l_{\text{од}}$ (мм), ширина $b_{\text{од}}$ (мм) і висота $h_{\text{од}}$ (мм), а за факторіальну – вантажопідйомність q_n (т) розкидача добрив. Опрацювання вихідних даних здійснено на засадах математичної статистики і зокрема кореляційно-регресійного аналізу та з використанням стандартних комп'ютерних програм.

Перевірку лінійності зв'язку між результативною і факторіальною ознакою можна здійснити за t -критерієм Стюдента з використанням визначеного коефіцієнта кореляції між вказаними ознаками та шляхом дисперсійного аналізу за допомогою F -критерію Фішера [10]. Форму зв'язку між незалежною і залежною змінними можна також з'ясувати обчисленням різниці квадратів кореляційного відношення і коефіцієнта кореляції та з використанням інших критеріїв [11]. В цьому дослідженні характер зв'язку між результативними і факторіальною ознаками здійснено на підставі аналізу вирівнювання експериментальних значень $m_{\text{од}}$, $l_{\text{од}}$, $b_{\text{од}}$ і $h_{\text{од}}$ залежно від q_n рівняннями прямих і гіпербол та степеневих, логарифмічних і експоненціальних функцій з визначенням для кожної із апроксимуючих залежностей R^2 -коефіцієнта. За найбільшим R^2 -коефіцієнтом, що властивий тій чи іншій апроксимуючій залежності, її і вибирали за таку, що найкраще оцінює наближення вирівняних значень результативних ознак до одержаних експериментально.

Для з'ясування апроксимуючої залежності, тобто модельної лінії прямо- чи криволінійної регресії тієї чи іншої результативної ознаки на одну і ту ж факторіальну визначали помилку рівняння регресії S_y (з розмірністю результативної ознаки) та вели розрахунок коефіцієнта детермінації k_d , що визначав силу впливу факторіальної ознаки на ту чи іншу результативну.

Виклад основного матеріалу. Результати вивчення досліджуваних параметрів кузовних машин для внесення ТОД та емпіричних розподілів цих параметрів з визначенням основних статистичних показників наведені в табл. 1.

З аналізу зібраних статистичних даних визначено, що за мінімальної вантажопідйомності, що становила 2 т і була властива декільком машинам, серед яких був і розкидач РПТМ-2,0А, маса якого дорівнювала 1,18 т, а габаритні довжина, ширина і висота відповідно 4650 мм, 2060 і 1768 мм. За максимальної вантажопідйомності 24 т, що властива машині ММТ-23, маса розкидача становила 9,33 т, а його габаритні довжина, ширина і висота відповідно 9700 мм, 2500 і 3800 мм. Отже, із збільшенням вантажопідйомності машин визначені результативні ознаки зростають.

Таблиця 1 – Основні статистичні показники досліджуваних параметрів кузовних машин для внесення ТОД

Досліджуваний параметр	Розмах варіювання	Середнє арифметичне значення	Середнє квадратичне відхилення	Коефіцієнт варіації, %
Вантажопідйомність q_n , т	2–24	7,64	5,39	70,5
Маса $m_{\text{од}}$, т	1–9,33	3,17	2,09	65,9
Габаритні розміри, мм:				
довжина $l_{\text{од}}$	3500–10000	6136	1655	27,0
ширина $b_{\text{од}}$	1850–3500	2371	257	10,8
висота $h_{\text{од}}$	1650–3800	2342	522	22,3

Джерело: розроблено авторами

Між масою $m_{\text{од}}$ (т) кузовних машин, їхніми габаритними довжиною $l_{\text{од}}$ (мм), шириною $b_{\text{од}}$ (мм) та висотою $h_{\text{од}}$ (мм) і вантажопідйомністю q_n (т) машин виявлений додатний кореляційний зв'язок з коефіцієнтами кореляції r відповідно 0,959; 0,900; 0,721 та 0,864 за кореляційних відношень η результативних ознак на факторіальну в тій же послідовності 0,960; 0,862; 0,859 та 0,840. За визначеними показниками кореляційного зв'язку залежно від вантажопідйомності машин результативні ознаки мають зростати, причому $m_{\text{од}}$, $l_{\text{од}}$ і $h_{\text{од}}$ – прямолінійно, а $b_{\text{од}}$ – за криволінійною залежністю.

Для остаточного з'ясування характеру і форми зв'язку здійснено вирівнювання експериментальних значень результативних ознак залежно від вантажопідйомності машин рівняннями прямих і гіпербол та степеневих, логарифмічних і експоненціальних функцій. За розрахованими R^2 -коефіцієнтами найкраще наближення до експериментальних значень $m_{\text{од}}$, $l_{\text{од}}$ і $h_{\text{од}}$ забезпечила апроксимація їх зміни залежно від q_n рівняннями прямих з додатними кутовими коефіцієнтами, а до експериментальних значень $b_{\text{од}}$ – апроксимація їх зміни залежно від q_n – рівнянням зростаючої гіперболи.

Модельну лінію прямолінійної регресії маси $m_{\text{од}}$ (т) кузовних машин на їх вантажопідйомність q_n (т) описує рівняння прямої з додатним кутовим коефіцієнтом вигляду:

$$m_{\text{од}} = 0,332 + 0,372 q_n \quad (1)$$

$$\text{при } r = 0,959; \eta = 0,960; R^2 = 0,920; S_y = 0,59 \text{ т і } k_d = 0,920.$$

За кутовим коефіцієнтом рівняння (1) збільшення вантажопідйомності кузовних машин за її зміни в межах 2–24 т на 1 т супроводжується підвищенням маси розкидачів із заокругленням на 0,37 т. Маса переважної більшості кузовних машин за помилкою рівняння регресії незначно відхиляється від модельної лінії, що описує рівняння (1). За значенням коефіцієнта детермінації варіація маси кузовних машин на 92% причинно зумовлена варіацією їх вантажопідйомності і лише 8% непоясненої варіації зумовлено впливом інших неврахованих в дослідженні факторів.

Модельну лінію прямолінійної регресії габаритної довжини $l_{\text{од}}$ (мм) кузовних машин на їх вантажопідйомність q_n (т) за розрахунками описує рівняння прямої з додатним кутовим коефіцієнтом, що має вигляд:

$$l_{\text{од}} = 4077,0 + 276,0 q_n \quad (2)$$

$$\text{при } r = 0,900; \eta = 0,862; R^2 = 0,810; S_y = 721 \text{ мм і } k_d = 0,810.$$

Кутовий коефіцієнт рівняння (2) дорівнює 276,0 мм/т. Це означає, що з підвищенням вантажопідйомності гноєрозкидачів на 1 т, їхня габаритна довжина зростає на 276,0 мм. За рівнянням (2) при $q_n = 19$ т габаритна довжина розкидача добрив має становити $l_{\text{од}} = 9321$ мм. Вантажопідйомність 19 т мав розкидач добрив МТТ-Ф-19, габаритна довжина якого дорівнювала 10000 мм. Різниця між цією габаритною довжиною і визначеною за формулою (2) дорівнює 679 мм, а помилка рівняння (2) становить 721 мм. Отже, визначена різниця знаходиться в межах помилки рівняння (2), що опосередковано є підтвердженням доцільності використання цього рівняння в розрахунках з проектування розкидачів ТОД. За коефіцієнтом детермінації серед факторів впливу на габаритну довжину розкидачів добрив на частку впливу вантажопідйомності машин припадає 81%.

Модельну лінію криволінійної регресії габаритної ширини $b_{\text{од}}$ (мм) кузовних машин для внесення ТОД на їх вантажопідйомність q_n (т) описує рівняння зростаючої

гіперболи вигляду:

$$b_{\text{од}} = 2699,84 - 1540,44 / q_{\text{н}} \quad (3)$$

при $r = 0,721$; $\eta = 0,859$; $R^2 = 0,738$; $S_y = 142$ мм і $k_d = 0,738$.

Вільний член рівняння (3) зростаючої гіперболи являє її асимптоту і визначає гранично можливу найбільшу габаритну ширину кузовної машини для внесення ТОД, що становить 2700 мм. Таку габаритну висоту із аналізованих кузовних машин мають розкидачі РОУ-6М, МТТ-Ф-13 та МТО-12. Переважна більшість експериментальних значень $b_{\text{од}}$ зосереджена на модельній лінії, що описує рівняння (3) або обабіч неї в межах помилки цього рівняння. Проте є розкидачі добрих, значення габаритної ширини яких за певних значень $q_{\text{н}}$ розташовані дещо вище модельної лінії. Наприклад, гноєрозкидач МТО-4 за вантажопідйомності 4 т мав габаритну ширину 2500 мм, а за розрахунком за формулою (3) при вантажопідйомності 4 т габаритна ширина становить 2315 мм, що менше габаритної ширини гноєрозкидача МТО-4 на 185 мм, а це значення дещо перевищує помилку рівняння (3) яка дорівнює 142 мм. За значенням коефіцієнта детермінації серед факторів впливу на габаритну ширину кузовних машин для внесення ТОД на частку впливу вантажопідйомності припадає майже 74%.

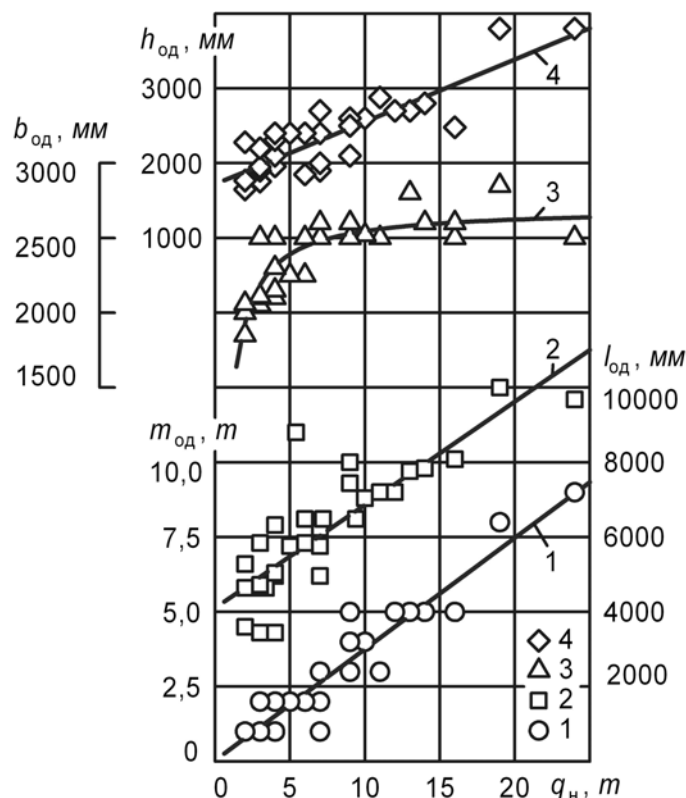
Модельну лінію прямолінійної регресії габаритної висоти $h_{\text{од}}$ (мм) кузовних машин для внесення ТОД на їх вантажопідйомність $q_{\text{н}}$ (т) описує рівняння прямої з додатним кутовим коефіцієнтом, що має вигляд:

$$h_{\text{од}} = 1719,40 + 83,40 q_{\text{н}} \quad (4)$$

при $r = 0,864$; $\eta = 0,840$; $R^2 = 0,746$; $S_y = 263$ мм і $k_d = 0,746$.

За значенням кутового коефіцієнта рівняння (4) прямої в межах зміни вантажопідйомності розкидачів ТОД від 2 до 24 т її збільшення на 1 т супроводжується збільшенням габаритної висоти кузовних машин на 83,4 мм. Вантажопідйомність і габаритна висота значної кількості кузовних машин розміщені на модельній лінії прямолінійної регресії, хоча відповідне число кузовних машин за їх досліджуваними параметрами розміщені обабіч модельної лінії. Наприклад, кузовна машина ПРТ-16М, що мала вантажопідйомність 16 т і габаритну висоту 2480 мм за значеннями цих параметрів розміщена дещо нижче модельної лінії. На модельній лінії значенню $q_{\text{н}} = 16$ т відповідає габаритна висота 3054 мм, що розміщена на 574 мм вище габаритної висоти гноєрозкидача ПРТ-16М. Вказана різниця дещо перевищує помилку рівняння (4). За чисельним значенням коефіцієнта детермінації доходимо висновку, що майже 75% дисперсії залежної змінної, тобто габаритної висоти розкидачів добрих, пояснюється впливом вантажопідйомності кузовних машин для внесення ТОД, а 25% дисперсії залежної змінної залишилися непоясненими.

На рисунку наведені кореляційні поля маси та габаритних розмірів кузовних машин для внесення ТОД як результативних ознак і вантажопідйомність розкидачів добрих як факторіальної ознаки та модельні лінії прямолінійних і криволінійної регресії результативних ознак на факторіальну.



$m_{од}$ – маса кузовних машин (КМ) для внесення твердих органічних добрив (ТОД);
 $l_{од}$, $b_{од}$, і $h_{од}$ – габаритні відповідно довжина, ширина і висота КМ для внесення ТОД;
 q_n – вантажопідйомність КМ для внесення ТОД

Рисунок 1 – Зміна масово-розмірних параметрів кузовних машин для внесення твердих органічних добрив (ТОД) залежно від вантажопідйомності q_n розкидачів: 1 – маси машини для внесення ТОД $m_{од}$; 2 – габаритної довжини $l_{од}$ машини для внесення ТОД; 3 і 4 – габаритних відповідно ширини $b_{од}$ і висоти $h_{од}$ машини для внесення ТОД

Джерело: розроблено авторами

З рисунка за поведінкою кривої 3, що інтерпретує зміну габаритної ширини $b_{од}$ (мм) розкидача добрив залежно від його вантажопідйомності q_n (т), видно, що габаритна ширина кузовних машин із підвищенням їх вантажопідйомності від 2 до 10 т інтенсивно зростає, але із поступовим сповільненням. Подальше підвищення вантажопідйомності машин понад 10 т і далі супроводжується занадто сповільненим зростанням їх габаритної ширини, зміна якої відбувається в межах помилки рівняння (4) криволінійної регресії.

Залежність, яку описує рівняння (4), може бути використана при визначенні кінематичної ширини агрегату за вантажопідйомністю машини для внесення ТОД. Чисельне значення асимптоти гіперболи, яку описує рівняння (4), можна використовувати при розрахунках організації використання МТА в полі і зокрема для визначення мінімальної ширини поворотної смуги у випадку її не удобрення.

Висновки. Отримані моделі зміни маси кузовних машин для внесення твердих органічних добрив, їх габаритних довжини, ширини і висоти залежно від вантажопідйомності розкидачів добрив можуть бути використані при проектуванні і розрахунках засобів механізації удобрення ґрунту та комплектуванні МТА для внесення твердих органічних добрив, організації їх руху при переїздах до загінки та проектування використання агрегатів в загінці.

Перспективи подальших розвідок на нашу думку мають бути спрямовані на

пошук і з'ясування якісно-кількісних зв'язків між масою кузовних машин для внесення твердих органічних добрив і їх габаритними довжиною, шириною та висотою.

Список літератури

1. Лесик Б.В. Влияние органических удобрений в сочетании с минеральными на урожай и качество льна. *Повышение урожайности и качества льна: науч. труды. Житомирский сельскохозяйственный институт* / под ред. Б.В. Лесика. 1969. Т. 19. С. 4–8.
2. Смаглий О.Ф., Лімонт А.С. Прогнозування продуктивності льону-довгунця з урахуванням елементарних волокон на поперечному зрізі стебла. *Вісник ДВНЗ «Держ. агроеколог. ун-т»*. 2007. № 2 (20). С. 36–47.
3. Марченко Н.М., Личман Г.И., Шебалкин А.Е. Механизация внесения органических удобрений (Технологические основы проектирования процессов и рабочих органов). Москва: Агропроиздат, 1990. 207 с.
4. Машины и оборудование для производства и внесения органических удобрений: конструирование и расчет / Линник Н.К. и др.; под ред. Л.В. Погорелого. Киев: Техника, 1992. 103 с.
5. Переходько О.Я., Ярошук В.А. Обґрунтування раціональної ширини внесення твердих органічних добрив кузовними розкидачами. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 1992. Вип. 75. С. 70–74.
6. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин: машини для приготування і внесення добрив. 2002. Т. 1. Ч. 3. 352 с.
7. Герук С.М., Хоменко С.М. Результати лабораторно-польових досліджень машини для внесення твердих органічних добрив. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2010. Вип. 93. Т. 2. С. 141–149.
8. Мельник В.І., Ромашенко О.А. Енергетична оцінка комплексів машин при внесенні добрив. *Інженерія природокористування: наук. журн.* / засн.: Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка. Харків. 2016. № 1 (5). С. 118–121.
9. Павленко С.І. Експериментальні дослідження показників роботи розкидача органічних добрив ПРТ-10 із двобарабаним навісним пристроєм. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів: наук. журн.* / засн.: Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка. Харків. 2018. Вип. 14. С. 156–164.
10. Герасимович А.И. Математическая статистика: учеб. пособ. [для инж.-техн. и эконом. спец. вузов]. Минск: Вышэйш. шк., 1983. 279 с.
11. Венецкий И.Г., Венецкая В.И. Основные математико-статистические понятия и формулы в экономическом анализе: справочник. Москва: Статистика, 1979. 448 с.

References

1. Lesik, B.V. (1969). Vliyanie organicheskikh udobreniy v sochetanii s mineral'nymi na urozhay i kachestvo l'na [Influence of organic fertilizers in combination with mineral fertilizers on the yield and quality of flax]. *Povyshenie urozhaynosti i kachestva l'na: nauch. trudy – Increasing the yield and quality of flax: scientific. works.*. B.V. Lesika (Eds.). Vol. 19, 4–8 [in Russian].
2. Smahlii, O.F. & Limont, A.S. (2007). Prohnozuvannia produktyvnosti lonu-dovhuntsia z urakhuvanniam elementarnykh volokon na poperechnomu zrizi stebila [Forecasting the productivity of long-stemmed flax taking into account the elementary fibers on the cross-section of the stem]. *Visnyk DVNZ «Derzh. ahroekoloh un-t» – Bulletin of the DVNZ "State agroecologist Univ"*, 2 (20), 36–47 [in Ukrainian].
3. Marchenko, N.M., Lichman, G.I. & Shebalkin, A.E. 1990. Mekhanizatsiya vneseniya organicheskikh udobreniy (Tekhnologicheskie osnovy proektirovaniya protsessov i rabochikh organov) [Mechanization of the application of organic fertilizers (Technological bases for the design of processes and working bodies)]. Moskva: Agroproizdat [in Russian].
4. Linnik, N.K. et al. (1992). *Machinery and equipment for the production and application of organic fertilizers: design and calculation*. L.V. Pogorelogo (Eds.). Kiev: Tekhnika [in Russian].
5. Perekhodko, O.Ya. & Yaroshchuk, V.A. (1992). Obgruntuvannia ratsionalnoi shyryny vnesennia tverdykh orhanichnykh dobryv kuzovnymy rozkydachamy [Justification of the rational width of application of solid organic fertilizers by body spreaders]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva – Mechanization and electrification of agriculture*, Vol. 75, 70–74 [in Ukrainian].
6. Zaika, P.M. (2002). *Teoriia silskohospodarskykh mashyn: mashyny dlia pryhotuvannia i vnesennia dobryv* [Theory of agricultural machines: machines for preparing and applying fertilizers]. Kharkiv:

- Oko, Vol. 1, part 3, 352 [in Ukrainian].
7. Heruk, S.M. & Khomenko, S.M. (2010). Rezultaty laboratorno-polovkykh doslidzhen mashyny dlia vnesennia tverdykh orhanichnykh dobryv [Results of laboratory and field studies of the machine for applying solid organic fertilizers]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva im. Petra Vasylenka – Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Peter Vasylenko. Mechanization of agricultural production, Issue 93, Vol. 2, 141–149.*
 8. Melnyk, V.I. & Romanashenko, O.A. (2016). Enerhetychna otsinka kompleksiv mashyn pry vnesenni dobryv [Energy assessment of machine complexes during fertilizer application]. *Inzheneriia pryrodokorystuvannia: nauk. zhurn. – Engineering of nature management: science. journal, № 1 (5), 118–121 [in Ukrainian].*
 9. Pavlenko, S.I. (2018). Eksperymentalni doslidzhennia pokaznykiv roboty rozkydacha orhanichnykh dobryv PRT-10 iz dvobarabannym navisnym prystroiem [Experimental studies of performance indicators of the spreader of organic fertilizers PRT-10 with a two-drum attachment device]. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv: nauk. zhurn – Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes: science. journal, Issue. 14, 156–164 [in Ukrainian].*
 10. Gerasimovich, A.I. (1983). *Matematicheskaya statistika [Math statistics]*. Minsk: Vysheysk. shk. [in Russian].
 11. Venetskiy, I.G. & Venetskaya, V.I. (1979). *Osnovnye matematiko-statisticheskie ponyatiya i formuly v ekonomicheskoy analize [Basic Mathematical and Statistical Concepts and Formulas in Economic Analysis]*. Moskva: Statistika [in Russian].

Anatoliy Limont, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Zhytomyr Agrotechnical College, Zhytomyr, Ukraine

Zlata Limont, student

Dnipro National University named after Oles Honchar, the city of Dnipro, Ukraine

Forecasting the Parameters of Body Machines for Solid Organic Fertilizers

The purpose of the article was to substantiate the trend of changing the basic mass and dimensional parameters of body machines for the application of solid organic fertilizers depending on their capacity. The analysis of constructions of machines of production by the enterprises in the territory of the former Soviet Union and modern Ukraine is carried out. The research methods were based on the study of the main consumer parameters of machines using the information provided in the Catalogs of agricultural machinery and advertising information of enterprises-manufacturers of body machines. Processing and generalization of the collected data is carried out on the basis of correlation-regression analysis and using standard computer programs. The load-bearing capacity of the machines was taken as a factorial feature in the study, and their weight and overall length, width and height were taken as effective.

The range of variation, arithmetic mean, standard deviation and coefficient of variation of factorial and performance characteristics are determined. There is a positive correlation between the mass of body machines, their overall length, width and height and load capacity of the machines with correlation coefficients of 0.959, respectively; 0.9000; 0.721 and 0.864 for correlation ratios of performance traits to factorial in the same sequence 0.960; 0.862; 0.859 and 0.840. According to certain correlation indicators, depending on the load capacity of the machines, the effective characteristics should increase. To finally clarify the nature and form of communication, the experimental values of the performance characteristics were aligned depending on the load capacity of the machines by the equations of direct power and logarithmic functions and exponents and hyperbolas. According to the calculated R²-coefficients, the best approximation to the experimental values of machine mass and overall length and height was provided by approximation of their change depending on load capacity by equations of lines with positive angular coefficients, and to experimental values of dimensional width by approximation of.

It was found that depending on the load capacity of machines, their overall lengths and heights increase in a straight line with certain angular coefficients. The change in the overall width of the body machines for the application of solid organic fertilizers depending on the load capacity of the machines is described by the equation of increasing hyperbola.

body machines for solid organic fertilizers, weight, overall length, width, height, load capacity, correlation, regression equations

Одержано (Received) 25.02.2022

Прорецензовано (Reviewed) 11.03.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.113

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.244-255](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.244-255)**В.П. Сахно**, проф., д-р техн. наук, **С.М. Шарай**, доц., канд. техн. наук*Національний транспортний університет, м. Київ, Україна***І.С. Мурований**, доц., канд. техн. наук, **В.П. Онищук**, доц., канд. техн. наук*Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна***І.В. Човча***Відокремлений структурний підрозділ “Київський транспортно-економічний фаховий коледж Національного транспортного університету”, м. Київ, Україна*

Вплив конструктивних і експлуатаційних факторів на стійкість руху автопоїзда з причепом категорії O1

Питання стійкості й керованості автомобілів і автопоїздів (АТЗ) у зв'язку з їх практичною важливістю вивчалися багатьма дослідниками. Якщо питання перевезення великогабаритних вантажів вивчені достатньо добре, то для перевезення малотонажних вантажів, для яких використовуються малотонажні автопоїзди з простими одно- або двовісними причепами, питання стійкості вивчені не в повній мірі. Рекомендації щодо зміни конструктивних параметрів для поліпшення того або іншого виду стійкості різні і часом знаходяться в суперечності з вимогами по забезпеченню інших експлуатаційних якостей автомобіля, зокрема, його плавності ходу і прохідності.

автопоїзд, стійкість руху автопоїзда, бічна та кутова швидкість, критична швидкість руху

Постановка проблеми. Розвиток малого і середнього бізнесу в Україні призвів до збільшення потреби в причепах, що використовуються в зчипці з легковими автомобілями. Це, перш за все, причепи категорій O1 і O2. Відповідно категорія причепів O1 – це, так звані, «легкі» причепи. Крім цього з автомобілями категорії M1 можуть використовуватися причепи категорії O2, які часто називають «важкими». Для цих причепів, що експлуатуються, як правило, приватними підприємцями і аматорами, дуже важливими є параметри щодо навантаження на тяговий автомобіль і причіп, зокрема розташування вантажу в причепі. Завантажувати причіп необхідно рівномірно по всій площі підлоги вантажного причепа або фургона, а поодинокі вантажі повинні бути розташовані і закріплені над віссю або спареними осями. Розташування центру мас над віссю причепа забезпечує нормальне навантаження на зчипну кулю [1]. Якщо питання перевезення великогабаритних вантажів вивчені достатньо добре, то для перевезення малотонажних вантажів, для яких використовуються малотонажні автопоїзди з простими одно- або двовісними причепами, питання стійкості вивчені не в повній мірі.

Для причепів категорії O₁, що експлуатуються, як правило, приватними підприємцями і аматорами, раціональні параметри щодо швидкісного режиму, навантаження на тяговий автомобіль і причіп, а також розміщення вантажу в кузові причепа не завжди виконуються. Цілком очевидно, що підвищення ефективності роботи автопоїздів шляхом збільшення швидкості руху не повинно завдавати шкоди безпеці руху. Тому дослідження стійкості руху автопоїздів з причепами категорії O1 є актуальною задачею.

Аналіз попередніх досліджень. Питання стійкості й керованості автомобілів і автопоїздів (АТЗ) у зв'язку з їх практичною важливістю вивчалися багатьма дослідниками. До теперішнього часу більш-менш повно розроблена теорія стійкості руху двовісних автомобілів. У чисельних роботах досліджуються окремі види стійкості таких автомобілів (курсова, траєкторна або поперечна) при дії одного - двох зовнішніх чинників. Різні зовнішні чинники у різній мірі впливають на показники цих видів стійкості. Рекомендації щодо зміни конструктивних параметрів для поліпшення того або іншого виду стійкості різні і часом знаходяться в суперечності з вимогами по забезпеченню інших експлуатаційних якостей автомобіля, зокрема, його плавності ходу і прохідності.

Якісна оцінка стійкості виконується на основі загальної теорії стійкості руху А. М. Ляпунова. При цьому встановлюється лише факт збільшення чи зменшення отриманих випадкових відхилень від заданого руху. Для кількісної оцінки стійкості в математичній теорії стійкості руху розроблені спеціальні методи. З цією метою також визначаються характеристики власних рухів АТЗ і зовнішніх збурень, граничні умови, що визначають можливість руху за умовами перекидання, заносу тощо [2]. Тому оціночними параметрами стійкості звичайно служать критичні параметри (наприклад, швидкість руху), що визначають граничні умови переходу від стійкого руху до нестійкого, а також характеристики, що визначають реакції АТЗ після припинення дії зовнішніх збурень. У роботі [3] показано, що практично всі параметри автомобіля і причіпних ланок впливають на керованість і стійкість руху автопоїзда. Цей вплив пов'язаний з геометричними параметрами й положенням центру мас автомобіля, характеристиками шин [4-8], числом осей і розміщенням їх по базі [4], прийнятою схемою системи управління автопоїзда [5].

Одиночний автомобіль, кваліфіковано керований у нормальних, неаварійних обставинах, здійснює цілком визначені, передбачені і контрольовані водієм, рухи. Автопоїзду навіть при самому кваліфікованому керуванні властива деяка нестійкість його руху, що характеризується наявністю горизонтальних коливань (вилянь) причіпної ланки при виконанні ним різних маневрів.

Успішне розв'язання питання про курсову стійкість руху АТЗ залежить від правильного вибору розрахункової схеми, яка б найбільш повно відображала найважливіші фактори, що впливають на цю експлуатаційну властивість, і від точності оцінки сил взаємодії пневматичної шини з дорогою [3].

Теоретично модель автомобіля повинна якнайбільш повно відображати реальний АТЗ. Дослідження автомобіля як системи кількох тіл, що з'єднані голономними і неголономними в'язями, приводить до вивчення складної механічної системи з великою кількістю ступенів свободи, яка описується системою диференціальних рівнянь високого порядку. Наприклад, у роботах [9], [10], [11] автомобіль поданий у вигляді складної, багатомасової просторової математичної моделі, в якій враховані всі ступені свободи кузова і руху непідресорених мас щодо нього. В розрахункову схему були включені також кінематичні характеристики передньої і задньої підвісок, що визначають геометричні зв'язки, які накладаються на рух непідресорених мас відносно кузова; рульове керування розглядалося у вигляді трьохмасової системи (два керованих колеса і рульове колесо), з'єднаних між собою пружними зв'язками. Враховано також сухе тертя і зазори і рульовому приводі, а також вплив кутів установки коліс і нелінійності підвіски (обмежувачі ходу ресор, несиметричність характеристик амортизаторів, сухе тертя тощо). В результаті система була описана дуже складною системою диференціальних рівнянь сімнадцятого порядку. В даному випадку питання про дослідження курсової стійкості руху являється

дуже складним (якщо неможливим), навіть зважаючи на сучасний розвиток обчислювальної техніки та наявності великої кількості спеціальних математичних програм.

В роботі [12] відзначається, що ускладнення математичної моделі не завжди дає позитивний ефект, оскільки при визначенні масових розмірів (маси, моменти інерції) і характеристик зв'язків неминучі похибки, сполучення яких призводить до неточностей при визначенні кінцевих результатів. Крім того, практичне використання подібних розрахункових схем потребує попереднього аналітичного і, особливо, експериментального визначення великої кількості конструктивних параметрів автомобіля і шин. Тому при дослідженні стійкості руху АТЗ дедалі частіше використовують плоскі моделі з урахуванням нелінійного відведення коліс його осей. У зв'язку з цим

Постановка завдання. Метою є дослідження впливу конструктивних і експлуатаційних факторів на стійкість руху автопоїзда з причепом категорії О1.

Виклад основного матеріалу. Для рішення задачі про стійкість автопоїзда у прямолінійному русі досить розглянути плоскопаралельний рух автопоїзда, рівняння якого отримані у роботі [8]. Для цього необхідно скласти систему рівнянь його збуреного руху. Ця система дозволяє визначити реакції ланок автопоїзда при одиночному збуренні (різкий поворот рульового колеса тягового автомобіля), а також критичну швидкість автопоїзда.

Стійкий рух за Ляпуновим, реалізується в заздалегідь невідомій області початкових збурювань, які називають областю притягання незбуреного руху. Виникає задача визначення границь цієї області. Критичною швидкістю (КШ) $v_{кр}$ будемо називати швидкість, за якої хоча б одна з ланок автопоїзда втрачає стійкість. Під стійкістю розуміється властивість ланки автопоїзда зберігати в заданих межах, незалежно від швидкості руху і дії зовнішніх сил напрямом руху й орієнтацію подовжньої осі [2].

За лінійності сил бічного відведення у функції кута відведення отримаємо:

$$Y_{ij} = k_{ij} \delta_{ij}, \quad (2)$$

У свою чергу, кути відведення коліс осей автопоїзда визначаються як

$$\delta_1 = \theta_1 - \frac{U + a\omega}{V}; \quad \delta_2 = -\frac{U}{V} + \frac{\omega}{V}b; \quad \delta_n = -\frac{U}{V} + \frac{\omega}{V}(c + l_1 + d) - \varphi_1$$

З урахуванням виразів, що визначають бічні сили і кути відведення осей автопоїзда, система рівнянь (1[3]) записана у вигляді:

$$\begin{cases} (m+m_1)\omega V = k_1\theta - \frac{U}{V}(k_1+k_2) - \frac{\omega}{V}[l(k_1a-k_2b) - k_n(c+l_1+d) - \varphi_1 c, k_n]; \\ c(m+m_1)\omega V = -\frac{U}{V}(k_1a-k_2b - ck_n) - \frac{\omega}{V}[k_1a^2 + k_2b^2 + ck_n(c+l_1+d)] + \varphi_1 c, k_n; \\ m_1d_1\omega V = -\frac{U}{V}l_1k_n + \frac{\omega}{V}[l_1k_n(c+l_1+d)] - \varphi_1 l_1k_n. \end{cases} \quad (3)$$

Розв'язками системи рівнянь (3) будуть значення змінних, що відповідають стаціонарним режимам, а саме [12]:

$$U = \frac{\Delta_U}{\Delta}; \quad \omega = \frac{\Delta_\omega}{\Delta}; \quad \varphi_1 = \frac{\Delta_{\varphi_1}}{\Delta}; \quad (4)$$

Корені характеристичних рівнянь можна визначити чисельними методами. Необхідно також відзначити, що опис руху АТЗ, що реально є нелінійним об'єктом, лінійними рівняннями є заміною однієї задачі іншою, з яким перша може не мати нічого спільного (через неврахування нелінійності відведення і членів вище першого порядку рівнянь руху) [12].

Звідси виникає наступна задача: установити необхідні і достатні умови стійкості за першим наближенням. Відповідно до теореми Ляпунова про стійкість сталого руху за першим наближенням [12], якщо усі корені характеристичного рівняння системи першого наближення рівнянь збуреного руху мають від'ємні дійсні частини, то незбурений рух є стійким і притому асимптотично стійким, якими б не були члени вищих порядків у диференціальних рівняннях збуреного руху.

Умови, за яких усі корені мають від'ємні дійсні частини, визначаються критерієм Ляпуна-Шипара [12]: для того щоб характеристичне рівняння мало всі корені з від'ємними дійсними частинами, необхідно і достатньо, щоб:

- 1) усі коефіцієнти характеристичного рівняння були позитивні;
- 2) були позитивними головні діагональні мінори матриці Гурвіца, що складені для даного характеристичного рівняння. Ці умови виконуються у разі додатності знаменника ω у виразі (4), тобто додатності знаменника головного визначника системи, що має вигляд [12]

$$V < V_{kp} = \beta / (-\alpha) \quad (5)$$

Для визначення коефіцієнтів α і β розглянемо стовпчик a_{i2} ($i = \overline{1,3}$) у табл. 1, в якому знаходяться коефіцієнти при кутовій швидкості ω .

Таблиця 1 – Коефіцієнти системи рівнянь рівноваги, що розв'язані відносно змінних

Праві частини	Параметри			
	ω		φ_1	Вільний член
U/V	V	V^{-1}		
$k_1 + k_2$	$m + m_1$	$k_1 a - k_2 b - k_n(c_1 + l_1 + d)$	$c_1 k_n$	$k_1 \theta$
$k_1 a - k_2 b - c k_n$	$c(m + m_1)$	$k_1 a^2 + k_2 b^2 + c k_n(c_1 + l_1 + b_{2j})$	$c_1 k_n$	
$l_1 k_n$	$m_1 d_1$	$l_1(c + l_1 + b_{2j}) k_n$	$l_1 k_n$	

Джерело: розроблено авторами

Кожний із стовпчиків складається із двох доданків: в одному із них швидкість знаходиться у чисельнику, у другому – в знаменнику. Якщо представити головний визначник у вигляді суми двох визначників

$$\|a_{ij}\|_1^4 = V^2 \times \|\beta_{ij}\|_1^4 + \|\alpha_{ij}\|_1^4, \quad (6)$$

де $\beta_{ij} = \alpha_{ij} = a_{ij}$ ($i = \overline{1,2}; j = \overline{1,2}$).

Якщо $j=2$, то

$$\beta_{12} = m + m_{12}; \quad \beta_{22} = -c m_1;$$

$$\alpha_{12} = k_1 a - k_2 b - k_n(c + l_1 + d); \quad \alpha_{22} = k_1 a^2 + k_2 b^2 + c k_n(c + l_1 + d). \quad (7)$$

При цьому α і β у (6) будуть визначатися як

$$\beta = \|\beta_{ij}\|_1^4; \quad \alpha = \|\alpha_{ij}\|_1^4. \quad (8)$$

Розв'язок рівняння (5) виконано для автомобільного поїзда у складі тягового автомобіля ВАЗ і одновісного причепа. За результатами розрахунків критична швидкість такого автопоїзда склала 33,97 м/с.

Дослідимо стійкість стаціонарного рішення v^* , u^* , ω^* , φ_l^* (у випадку прямолінійного незбуреного руху всі ці значення, крім v , дорівнюють нулю). При постійній швидкості руху ($v = \text{const}$) покладемо [13]

$$v = v^* + v', \quad u = u^* + u', \quad \omega = \omega^* + \omega', \quad \varphi_l = \varphi_l^* + \varphi'_l.$$

З огляду на те, що при $\dot{u}=0$, $\dot{\omega}=0$, $\dot{\varphi}_l=0$ одержимо

$$\sin \varphi_l = 0, \quad \cos \varphi_l = 1.$$

При цьому вирази для подовжньої і бічної швидкості запишуться у виді

$$v_l = v;$$

$$u_l = v \varphi_l + (u - \omega(b + c_0)) - (\omega - \dot{\varphi}_l)(c + c_m). \quad (9)$$

При прямолінійному русі бічні швидкості набагато менше подовжніх. У цьому випадку середні кути відведення осей автопоїзда запишуться як

$$\delta_l = -\frac{u + a\omega}{v}; \quad \delta_2 = \frac{-u + \omega b}{v}; \quad \delta_n = -\frac{\varphi_l v - u + \omega(c_1 + l_1 + d)}{v}.$$

Для варіацій u^* , ω^* , φ_l одержимо, опускаючи штрихи, рівняння розв'язані щодо старших похідних [13]

$$(m + m_1)(\dot{u} + \omega v) - m_1(B + C)\dot{\omega} + m_1 C \varphi_l^2 = 2Y_1 + 2Y_2 + 2Y_n;$$

$$-(m_1 B)\dot{u} + [(m_1(B^2 - 3BC) + I_n)]\dot{\omega} - BCm_1\ddot{\varphi}_l - m_1 v \omega(B + C) + m_1 v \omega C = 2Y_1 a - 2Y_2 b;$$

$$-m_1 B \ddot{u} + [m_1(B^2 - 3BC) + I_n]\ddot{\omega} - BCm_1\ddot{\varphi}_l - m_1 v \omega(B + C) + m_1 v \omega C 2Y_1 a - 2Y_2 b - 2Y_n(B + c_0);$$

$$m_1 C \ddot{u} - [m_1 C(B + C) + I_n]\ddot{\omega} + (m_1 C^2 + I_n)\ddot{\varphi}_l + m_1 v \omega C = 2Y_n c_1, \quad (10)$$

де $B = b + c$, $C = c + c_l$ – геометричні параметри автопоїзда.

Підставимо в (10) значення бічних сил залежністю $Y_i = k_i \delta_i$, з урахуванням позначень отримаємо

$$\left(\frac{A2}{v} + (m + m_1)v \right) \omega + \frac{A1u}{v} + A3\varphi_l + \frac{A4\dot{\varphi}_l}{v} + (m + m_1)\dot{u} - m_1(B + C)\dot{\omega} + m_1 C \ddot{\varphi}_l = 0$$

$$\left(\frac{B2}{v} - m_1(B + 2C)v \right) \omega + \frac{B1u}{v} + B3\varphi_l + \frac{B4\dot{\varphi}_l}{v} - m_1 B \ddot{u} - m_1 [(B + C)B + I_n] \ddot{\omega} - m_1 BC \ddot{\varphi}_l = 0$$

$$\left(m_1 v C + \frac{C2}{v}\right) \omega + \frac{C1 u}{v} + C1 \varphi + \frac{C3 \dot{\varphi}_1}{v} m_1 \ddot{C} u - [I_n + m_1 (B+C) C] \dot{\omega} + (m_1 C^2 + I_n) \ddot{\varphi}_1 = 0, \quad (11)$$

де вирази для коефіцієнтів рівняння (11) запишуться у вигляді:

$$\begin{aligned} A1 &= 2(k_1 + k_2 + k_n); \quad A2 = 2[k_1 a - k_2 b] - k_n (B + C - c); \quad A3 = 2k_n; \quad A4 = 2k_n c_1; \\ B1 &= 2[k_1 a - k_2 b] - k_n c_1 + B; \quad B2 = 2[k_1 a^2 + k_2 b^2 + k_n (B + C - c)(c_1 + B)]; \quad B3 = -2k_n (c_1 + B); \\ B4 &= -2k_n c_1 (c_1 + B); \\ C1 &= 2k_n c_1; \quad C2 = -2k_n c_1 (B + C - c); \quad C3 = 2k_n c_1^2. \end{aligned}$$

Після розв'язку цих рівнянь відносно старших похідних, одержимо [13]

$$\begin{aligned} \dot{u} &= - \frac{B \times m_1 \times I_n \times B0 - m_1 \times C \times C0 \times I + A0 \times m_1 \times C^2 \times I + m_1 \times I_n \times B^2 \times A0 + A0 \times I \times I_n}{m_1 \times C^2 \times m \times I + m_1 \times I_n \times B^2 \times m + m_1 \times I \times I_n + m \times I \times I_n} \\ \dot{\omega} &= - \frac{m \times m_1 \times C^2 \times B0 + m_1 \times I_n \times B0 + m_1 \times I_n \times A0 + m_1 \times C \times B \times m \times C0 + I_n \times m \times B0}{m_1 \times C^2 \times m \times I + m_1 \times I_n \times B^2 \times m + m \times m_1 \times I_n \times B^2 + m_1 \times I \times I_n + m \times I \times I_n} \\ \ddot{\varphi}_1 &= - \frac{(N1 + N2)}{m_1 \times C^2 \times m \times I + m_1 \times I_n \times B^2 \times m + m_1 \times I \times I_n + m \times I \times I_n}, \end{aligned} \quad (12)$$

де $N1 = m \times m_1 (B \times C \times B0 + B^2 \times C0 + C^2 \times B0 + C \times B \times C0) + m_1 (I_n \times B0 + I_n \times A0)$;

$N2 = m_1 [I_n \times B0 + I \times A0 + (m + m_1) \times I \times C0 - m_1 \times A0 \times C \times I]$,

$$A0 = \left(\frac{A2}{v} + (m + m_1) v \right) \omega_0 + \frac{A1 \times u}{v} + A3 \times \varphi_1 - \frac{A4 \dot{\varphi}_1}{v};$$

$$B0 = \left(\frac{B2}{v} - (B + 2C) v \right) \omega_0 + \frac{B1 \times u}{v} + B3 \times \varphi_1 - \frac{B4 \dot{\varphi}_1}{v};$$

$$C0 = \left(m_1 v C + \frac{C2}{v} \right) \omega_0 + \frac{C1 \times u}{v} + C1 \times \varphi_1 - \frac{C3 \dot{\varphi}_1}{v}.$$

Система рівнянь у векторно-матричній формі

$$\left\| a_{ij} \right\|_1^3 \times \begin{vmatrix} \dot{u} \\ \dot{\omega} \\ \ddot{\varphi}_1 \end{vmatrix} + \left\| b_{ij} \right\|_{3,4} \times \begin{vmatrix} u \\ \omega \\ \varphi_1 \\ \dot{\varphi}_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (13)$$

Сукупність функцій $u, \omega, \varphi_1 = (a_1, a_2, a_3) \exp(\lambda t)$ утворює часткове рішення системи, якщо і тільки якщо λ є коренем характеристичного рівняння

$$D(\lambda) = A_0 \lambda^4 + A_1 \lambda^3 + A_2 \lambda^2 + A_3 \lambda + A_4 = 0. \quad (14)$$

Матриця характеристичного рівняння

$$\begin{vmatrix} a_{11} \lambda + b_{11} & a_{12} \lambda + b_{12} & a_{13} \lambda^2 + b_{13} \lambda + b_{14} \\ a_{21} \lambda + b_{21} & a_{22} \lambda + b_{22} & a_{23} \lambda^2 + b_{23} \lambda + b_{24} \\ a_{31} \lambda + b_{31} & a_{32} \lambda + b_{32} & a_{33} \lambda^2 + b_{33} \lambda + b_{34} \end{vmatrix} = \sum_{i=0}^{n=4} A_i \lambda^{n-i} = 0; \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
&\text{де } a_{11} = m + m_1; a_{12} = -m_1(B + C); a_{13} = m_1 C; a_{21} = -m_1 B; \\
&a_{22} = m_1(B^2 - 3BC) + I_n; a_{23} = -m_1 BC \\
&b_{11} = \frac{A1}{v}; b_{12} = \frac{A2}{v} + (m + m_1)v; b_{13}\lambda + b_{14} = A3 + \frac{\lambda}{v} A4; \\
&a_{21} = -m_1 B; a_{22} = m_1(B^2 - 3BC) + I_n; a_{23} = -m_1 BC; \\
&b_{21} = \frac{B1}{v}; b_{22} = -m_1 v(B + 2C) + \frac{B2}{v}; b_{23}\lambda + b_{24} = B3 + \frac{\lambda}{v} B4; \\
&a_{31} = m_1 C; a_{32} = -I_n - m_1(B + C)C; a_{33} = I_n + m_1 C; \\
&b_{31} = \frac{C1}{v}; b_{32} = m_1 vC - \frac{C2}{v}; b_{33}\lambda + b_{34} = C1 + \frac{\lambda}{v} C3.
\end{aligned} \tag{16}$$

За Раусом, необхідна, але недостатня умова стійкості полягає у тому, щоб усі коефіцієнти A_i були позитивні. Система буде стійкою, якщо визначник і його мінори позитивні. Аналіз коренів характеристичного рівняння може характеризувати стан системи. У загальному випадку можливі наступні значення коренів характеристичного рівняння: λ є дійсна і позитивна величина – система нестійка, рух буде нестійким; λ – дійсна і від’ємна величина – система з часом повертається до стійкого положення. Якщо коефіцієнт λ являє собою комплексне число, то його позитивна дійсна частина свідчить про наявність наростаючих коливань, а негативна дійсна частина про наявність загасаючих коливань [13].

Визначники Гурвіца характеристичного рівняння (14) перший Δ_1 – відповідає за наявність позитивних дійсних коренів, а третій Δ_3 – за наявність позитивної дійсної частини уявних комплексно сполучених коренів.

Аналіз коефіцієнтів рівняння (14) показує, що критична швидкість автопоїзда залежить від масових і компоновальних параметрів, а також коефіцієнтів опору відведення коліс тягового автомобіля і причепа.

Запишемо у загальному вигляді рівняння, що визначає собою критичну швидкість [13]

$$v_{\text{ед}} = f(m, m_1, a, L, c, c_1, L_2, k_1, k_2, k_n). \tag{17}$$

За формулою (17) можливо провести аналіз рівномірного прямолінійного руху, а саме, визначити величину швидкості прямолінійного руху автопоїзда за умови коливальної нестійкості і виявити характер впливу різних факторів.

Як приклад, у табл. 2 наведені значення коренів характеристичного рівняння, за якими можна визначити вид стійкості, або нестійкості автопоїзда.

Таблиця 2 – Корені характеристичного рівняння

v_a , м/с	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
30,8	-14.23794453	-7.634298566	-0.07216824934– 3.01720161*I	-0.0721682497 +3.01720112*I
31,5	-13.15294984	-6.886257589	+0.0002637404– 3.077087466*I	-0.0002637404 +3.077087466*I
32,1	-12.24609371	-6.197548471	+0.0548309854– 3.108271945*I	-0.0548309854 +3.108271945*I

Джерело: розролено авторами

Аналіз розрахунків показує, що при виникненні збурення за швидкості до 31 м/с (30,8 м/с) характер зміни бічної та кутової швидкостей тягового автомобіля під час перехідного процесу згасаючий. За тих же умов при зростанні швидкості понад 31 м/с (31,5 м/с) характер зміни бічної та кутової швидкостей також згасаючий, але мають місце коливання. При збільшенні швидкості до 32 м/с коливання параметрів руху будуть розбіжними що призведе до втрати стійкості і неможливості подальшого руху. Цей рух слід вважати не стійким, якого слід уникати.

Критична швидкість прямолінійного руху як і швидкість появи коливальної нестійкості залежать від кута повороту керованих коліс тягового автомобіля, компонувальних і масових параметрів як тягового автомобіля, так і причепа. На рис. 1 наведена залежність критичної швидкості руху автопоїзда від кута повороту керованих коліс тягового автомобіля, з якої слідує. Що зі збільшенням цього кута критична швидкість прогресивно зменшується, що слід враховувати при експлуатації автопоїзда.

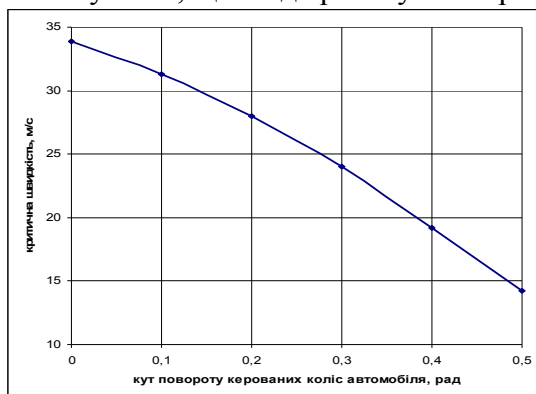
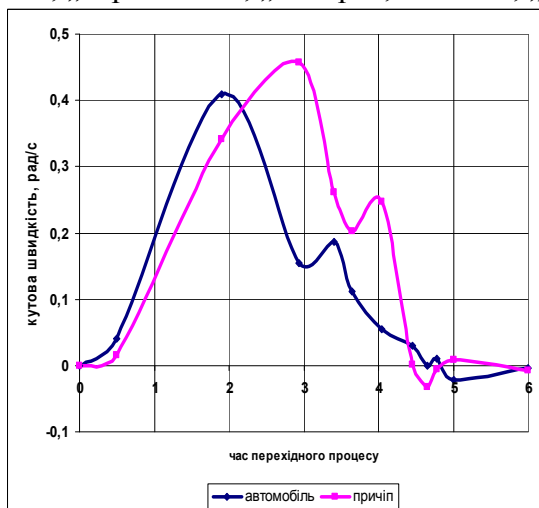


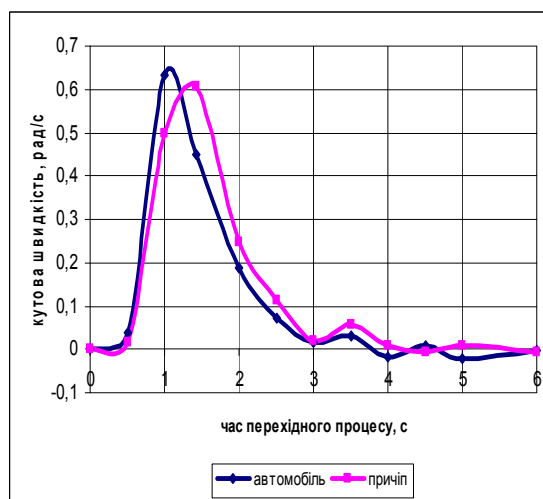
Рисунок 1 – Залежність критичної швидкості автопоїзда від кута повороту керованих коліс тягового автомобіля

Джерело: розроблено авторами

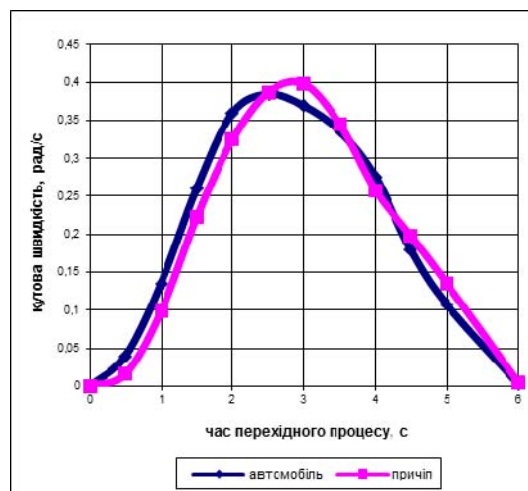
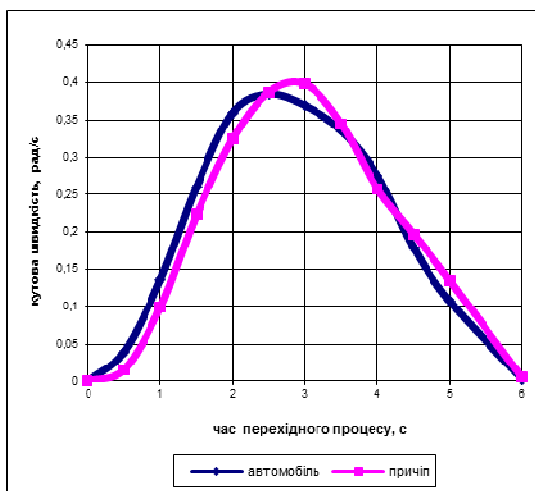
На рис. 2 – 4 представлені результати розрахунку кутової швидкості рискання і бічного прискорення ланок автопоїзда при виконанні маневру „ривок рульового колеса”, „переставка”, „поворот, $R=25$ м”, „поворот, $R=35$ м” за швидкості 10 м/с.



а)



б)



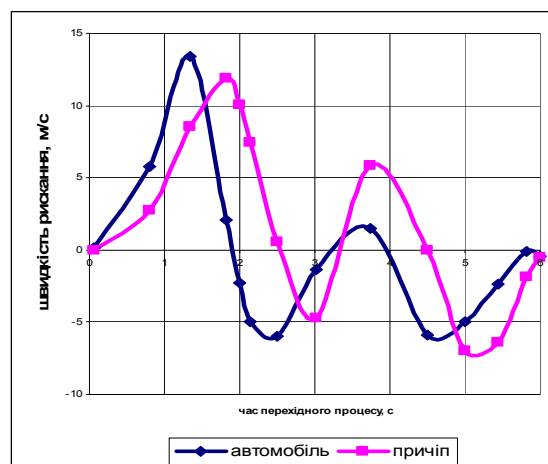
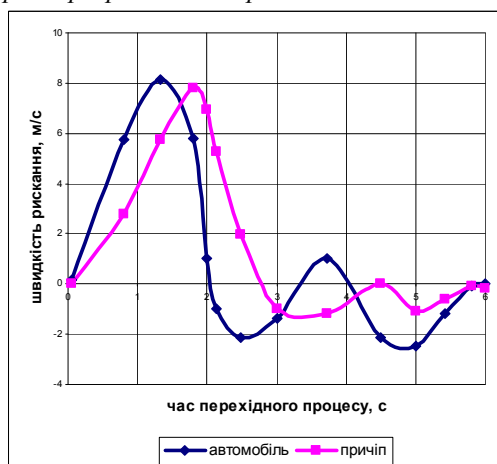
в)

г)

Рисунок 2 – Кутова швидкість ланок автопоїзда при виконанні маневрів:

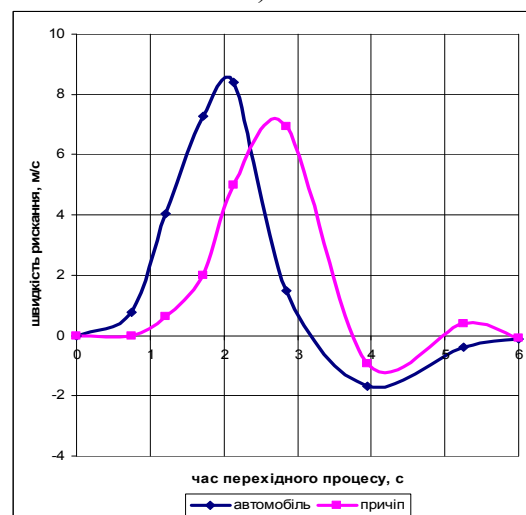
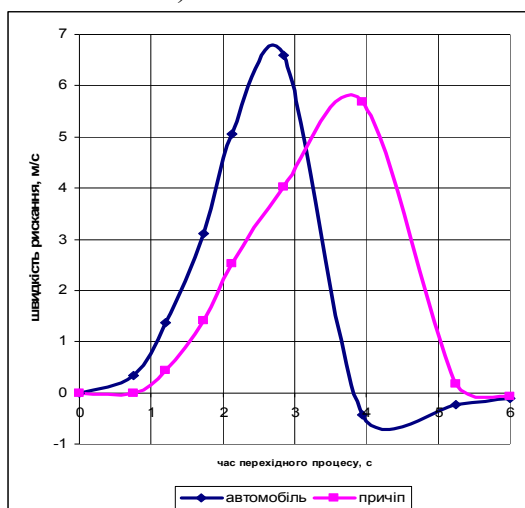
а) «переставка», б) «ривок рульового колеса», в) рух по колу, $R=35$ м, г) рух по колу, $R=25$ м

Джерело: розроблено авторами



а)

б)



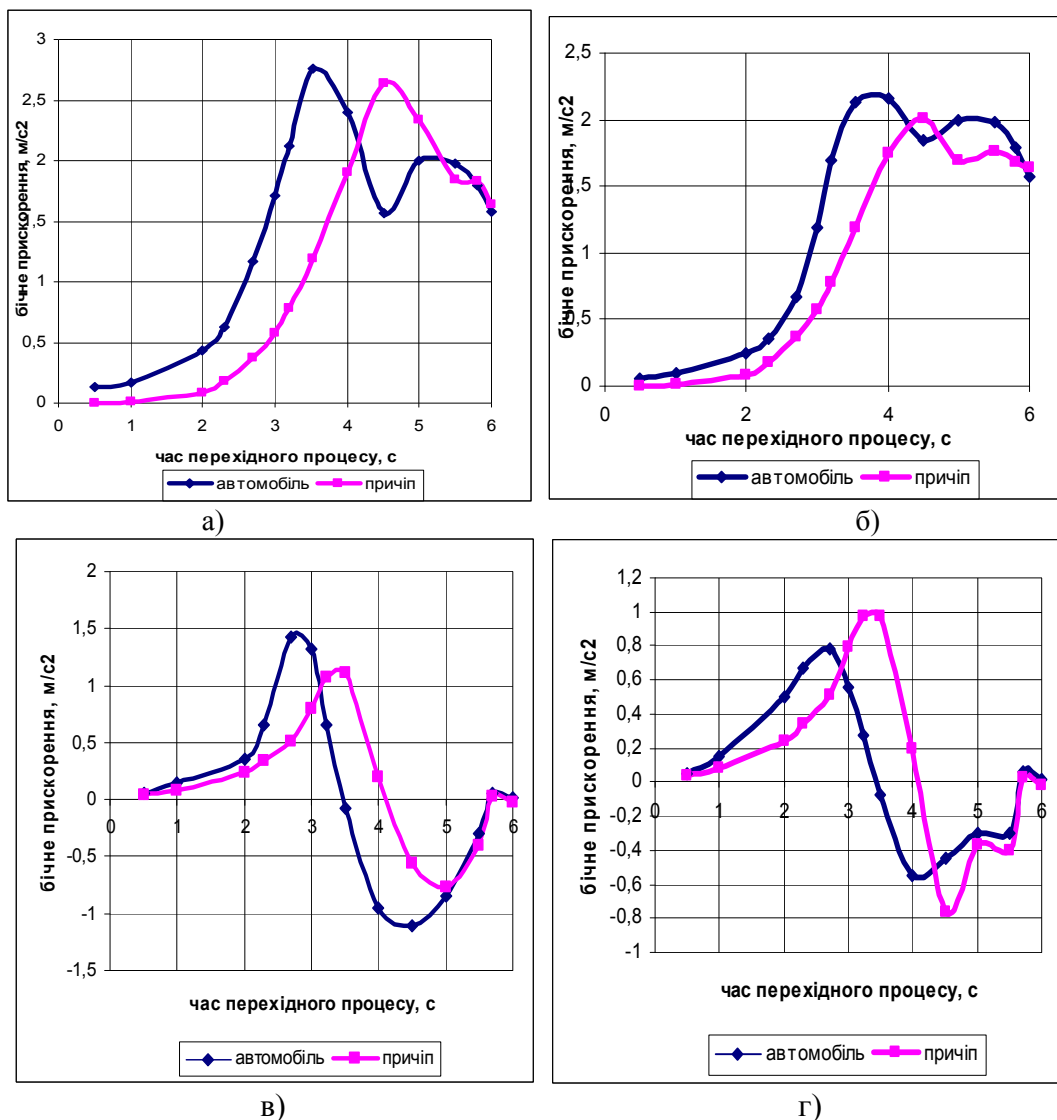
в)

г)

Рисунок 3 – Швидкість ривання ланок автопоїзда при виконанні маневрів:

а) «переставка», б) «ривок рульового колеса», в) рух по колу, $R=35$ м, г) рух по колу, $R=25$ м

Джерело: розроблено авторами



а) рух по колу, $R=25$ м; б) рух по колу, $R=35$ м; в) «ривок рульового колеса»; г) «переставка»

Рисунок 4 – Бічне прискорення ланок автопоїзда при виконанні маневрів

Джерело: розроблено авторами

Про стійкий характер руху ланок автопоїзда при виконанні цих маневрів свідчить загасаючий характер коливань кутової швидкості і швидкості ривання ланок автопоїзда, рис. 2-3. Про стійкість руху у більшому ступені можна судити по величині бічних прискорень, що діють у центрі мас окремих ланок, рис. 4. Стійкість руху можна вважати задовільною, якщо поперечні прискорення у центрі мас ланки не перевищують $0,45g$. Цій умові відповідає автопоїзд, що розглядається.

Висновки. Встановлено, що для автопоїзда, що розглядається, за номінальних параметрів навантаженості, тиску повітря в шинах усіх коліс, симетричного завантаження причепа, навантаження на тягово-зчіпний пристрій в межах 500 Н стійкість руху забезпечується, зокрема критична швидкість прямолінійного руху склала $33,97$ м/с., швидкість появи коливальної нестійкості $31,5$ м/с), що значно більше нормованого значення максимальної швидкості для автопоїздів з причепами категорії О1 (25 м/с), максимальні бічні прискорення при виконанні таких маневрів як рух по колу, ривок рульового колеса і «переставка» не перевищили максимально допустимих $0,45g$.

Список літератури

1. Волгин В.В. Прицепы к легковым автомобилям. М.: Астрель, 2005. 89 с.
2. До визначення показників стійкості автопоїзда категорії М1 у перехідних режимах руху /В.П.Сахно, Р.М.Кузнецов, В.В.Стельмашук, Л.С.Козачук . *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті: наук. журнал*. Луцьк: Луцький НТУ. 2014. №2. С.123-128.
3. Сахно В.П., Стельмашук В.В., Пазін Р.В. Визначення параметрів стійкості автопоїзда з причепом категорії О2 . *Systemy i srodki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. Monografia nrx, Seria: Transport. Rzeszow, 2018 . С. 93–102.*
4. Антонов Д.А. Расчет устойчивости движения многоосных автомобилей . М.: Машиностроение, 1984. 164 с.
5. Аксенов П.В. Многоосные автомобили . М.: Машиностроение, 1989. 279с.
6. Власко Ю.М., Хачатуров А.А. Исследование управляемости автопоезда . М.: Транспорт, 1970. 57 с.
7. Рокар И. Неустойчивость в механике . М.: изд-во иностр. лит., 1959. 317 с.
8. Козачук Л.С. До визначення стійкості руху автопоїзда категорії М1 . *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки*. 2014. № 2. С. 121-128 С.
9. Добрин А.С. Дульцев В.С. Об устойчивости движения многоосных автомобилей относительно заданной траектории . *Труды семинара по устойчивости и управляемости автомобилей* . 1968. Вып. 2. С. 27 – 39.
10. Люст В.Я. Разработка методов расчета параметров устойчивости прямолинейного движения трехосных автомобилей: автореф. дис на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. М., 1969. 23 с.
11. Автомобили. Устойчивость: монография / В.Г.Вербицкий, В.П.Сахно, А.П. Кравченко, А.В.Костенко, А.Э.Даниленко. Луганск: Изд-во «Ноулидж», 2013. 176 с.
12. Кузнецов Р. М. Покращання показників стійкості тріланкових автопоїздів у граничних режимах руху : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.02 / Національний транспортний ун-т. Київ, 2007 . 176 с.
13. Тімков О.М.. Поліпшення показників маневреності та стійкості автопоїздів з наближеними осями причепа : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.02 / Національний транспортний ун-т . Київ, 2005 . 175 с.

References

1. Volgin, V. (2005). *Pritsepy k legkovym avtomobilyam [Trailers for cars]*. Moskow: Astrel' [in Russian].
2. Sakhno, V., Kuznyetsov, R., Stelmashchuk, V. & Kozachuk, L. (2014). Do vyznachennya pokaznykiv stiykosti avtopoyizda katehoriyi M1 u perekhidnykh rezhymakh rukhu [To determine the stability of the M1 category train in transient modes of movement] . *Suchasni tekhnolohiyi v mashynobuduvanni i transporti: nauk. zhurnal – Advances in Mechanical Engineering and Transport, Vol.2*, 123-128 [in Ukrainian].
3. Sakhno, V., Stelmashchuk, V. & Pazyn, R. (2018). *Vyznachennya parametriv stiykosti avtopoyizda z prychemom katehoriyi [Determination of stability parameters of a road train with a category trailer]* . *Systemy i srodki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia, Seria: Transport. Rzeszow*, pp. 93–102 [in Ukrainian].
4. Antonov, D. (1984). *Raschet ustoychivosti dvizheniya mnogoosnykh avtomobiley [Calculation of motion stability of multi-axle vehicles]* . Moskow: Mashinostroyeniye [in Russian].
5. Aksenov, P. (1989). *Mnogoosnyye avtomobili [Multi-axle vehicles]* . Moskow: Mashinostroyeniye [in Russian].
6. Vlasko, Yu. & Khachaturov, A. (1970). Issledovaniye upravlyayemosti av-topoyezda [Investigation of controllability of a car-top train] . Moskow: Transport [in Russian].
7. Rokar, I. (1959). *Neustoychivost' v mekhanike [Instability in Mechanics Automobiles]*. Airplanes. Suspension Bridges (Moscow: IL) [in Russian].
8. Kozachuk, L. (2014). Do vyznachennya stiykosti rukhu avtopoyizda katehoriyi M1 [Before determining the stability of the M1 category train]. *Visnyk ZHDTU. Seriya "Tekhnichni nauky" – The Journal of ZSTU / Engineering, (2(69))*, 121–128. Retrieved from [https://doi.org/10.26642/tn-2014-2\(69\)-121-128](https://doi.org/10.26642/tn-2014-2(69)-121-128) [in Ukrainian].
9. Dobrin, A. & Dul'tsev, V. (1968). Ob ustoychivosti dvizheniya mnogoosnykh avtomobiley otnositel'no zadannoy trayektorii [On the stability of motion of multi-axle vehicles relative to a given trajectory] . *Trudy seminarov po ustoychivosti i upravlyayemosti avtomobiley – Proceedings of the seminar on the stability and handling of vehicles, Vol. 2*, 27 – 39. [in Russian].
10. Lyust, V. (1969). Razrabotka metodov rascheta parametrov ustoychivosti pryamolineynogo dvizheniya trekhosnykh avtomobiley [Development of methods for calculating the stability parameters of rectilinear motion of three-axle vehicles]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Moskow [in Russian].

11. Verbitskiy, V., Sakhno, V., Kravchenko, A., Kostenko A. & Danilenko, A. (2013). *Avtomobili. Ustoychivost* [Cars. Stability]. Lugansk: Izd-vo «Noulidzh» [in Russian].
12. Kuznyetsov, R. (2007). Pokrashchannya pokaznykiv stiykosti trylankovykh avtopoyizdiv u hranychnykh rezhymakh rukhu [Improvement of indicators of stability of three-link road trains in boundary modes of movement]. *Candidate's thesis*. Kiev [in Ukrainian].
13. Timkov, O. (2005). Polipshennya pokaznykiv manevrenosti ta stiykosti avtopoyizdiv z nablyzhenymy osyamy prycheha [Improving the maneuverability and stability of road trains with approximate axles of the trailer]. *Candidate's thesis*. Kiev [in Ukrainian].

Volodymyr Sakhno, Prof., DSc., **Svitlana Sharay**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

National Transport University, Kyiv, Ukraine

Igor Murovany, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vasyl Onyshchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

Igor Chovcha, teacher

Separate structural subdivision "Kyiv Transport and Economic Vocational College of the National Transport University", Kyiv, Ukraine

Influence of Constructive and Operational Factors on Stability of Movement of a Road Train with the Trailer of the O1 Category

The issues of stability and controllability of cars and road trains (ATZ) in connection with their practical importance have been studied by many researchers. If the issues of transportation of bulky goods are studied well enough, then for the transportation of light cargo, which uses low-capacity road trains with simple single- or two-axle trailers, the issues of stability are not fully studied. Recommendations for changing the design parameters to improve a particular type of stability are different and sometimes contradict the requirements for other performance of the car, in particular, its smoothness and passability.

Qualitative assessment of stability is performed on the basis of the general theory of stability of motion AM Lyapunov. Steady motion according to Lyapunov is realized in a previously unknown region of initial perturbations, which are called the region of attraction of undisturbed motion. There is a problem of defining the boundaries of this area. To solve it, the system of equations of plane-parallel motion of a road train with a trailer of category O1 was improved, from which the critical speed of rectilinear motion and the rate of oscillation instability were determined, and the factors influencing its numerical value were analyzed.

The analysis of calculations showed that in the event of perturbation at speeds up to 31 m / s (30.8 m / s) the nature of changes in the lateral and angular velocities of the traction vehicle during the transient process is extinguished. Under the same conditions, when the velocity increases above 31 m / s (31.5 m / s), the nature of the change in lateral and angular velocities also fades, but there are fluctuations. At increase in speed to 32 m / s fluctuations of parameters of movement will be divergent that will lead to loss of stability and impossibility of the further movement. This movement should be considered unstable, which should be avoided.

The stability of motion can be judged to a greater extent by the magnitude of the lateral accelerations acting in the center of mass of the individual links. The stability of the road train under consideration at nominal parameters of loading, air pressure in tires of all wheels, symmetrical loading of the trailer, loading on the traction coupling device within 500 N is provided, in particular critical speed of rectilinear movement made 33,97 m / s. oscillating instability 31.5 m / s), which is much higher than the normalized value of the maximum speed for road trains with trailers of category O1 (25 m / s), the maximum lateral acceleration when performing maneuvers such as circular motion, steering wheel jerk and "shift" is not exceeded the maximum allowable 0.45g.

road train, stability of road train, lateral and angular speed, critical speed

Одержано (Received) 17.02.2022

Прорецензовано (Reviewed) 04.03.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

УДК 658.5:629.33

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.256-262](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.256-262)

О.Л. Ляшук, проф., д-р техн. наук, У.М. Плекан, канд. екон. наук, О.П. Цьонь, доц., канд. техн. наук, Т.Б. Пиндус, асист.

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

e-mail: kaf_am@ukr.net

Планування діяльності автотранспортного підприємства. Методичні аспекти.

У статті обґрунтовано залежність ефективного функціонування автотранспортних підприємств від правильно сформованого плану розвитку на коротко- та довгострокову перспективу. Узагальнено науково-методичний інструментарій планування соціально-економічної діяльності автотранспортних підприємств. Запропоновано схему планування програми (проекту) соціально-економічного розвитку підприємств. Окреслено процеси формування карти результатів та рамки результатів як основних складових прогнозування подальшого соціально-економічного розвитку автотранспортних підприємств. **ефективність, управління, автотранспортне підприємство, соціально-економічний розвиток підприємства, методи планування, програма розвитку**

Постановка проблеми. Розвиток автотранспортного підприємства (АТП) в сучасних умовах функціонування залежить від цілої низки зовнішніх та внутрішніх факторів, що вимагає від системи управління чіткої злагодженої роботи та використання дієвого методичного забезпечення.

Значна кількість особливостей, що повинні враховуватись при вирішенні базової задачі системи управління – підвищення соціально-економічної ефективності автотранспортного підприємства – зумовлює об'єктивну необхідність формування плану розвитку підприємства як у короткостроковому, так і в довгостроковому періодах. План розвитку є специфічним комплексом заходів, спрямованим на забезпечення пришвидшення економічного розвитку та покращення конкурентних позицій на ринку. Якість виконання планів соціально-економічного розвитку залежать від оперативного виявлення проблем та швидкої відповіді на виклики, що заважають виконанню заходів по розвитку підприємства. Виконання завдань забезпечує чіткий механізм контролю та управління. Процеси організації та планування діяльності АТП супроводжуються прогнозуванням, контролем та обліком всіх процесів на підприємстві для подальшого забезпечення ефективних результатів, утримання конкурентних позицій, отримання прибутку і забезпечення подальшого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науковій літературі достатньо повно висвітлено результати досліджень вітчизняних і зарубіжних авторів щодо управління діяльністю автотранспортного підприємства. Зокрема, відомими є напрацювання Шинкаренка В.Г., присвячені удосконаленню автотранспортних послуг та управлінню маркетингом автотранспортних підприємств [12, 13]; Зайцевої І.Ю. про захист підприємств від недружніх поглинань [5]; Муромець Н.Є. щодо стійкого функціонування автотранспортної системи регіону [8]; Криворучко О.М. – напрацювання з менеджменту бізнес-процесів [6]; Шевчук Я.В. щодо автотранспортної інфраструктури [11], Дмитрієва І.А. і Нікітіна А.В. – управління економічною безпекою автотранспортних підприємств [1, 2].

Постановка завдання. Метою досліджень є аналіз та узагальнення основних науково-методичних аспектів планування соціально-економічної діяльності автотранспортних підприємств. Для досягнення мети в роботі поставлені та вирішені такі завдання:

- визначити сутність та особливості плану розвитку АТП;
- здійснити аналіз основних методів планування діяльності АТП;
- розробити схему планування програми (проекту) соціально-економічного розвитку АТП.

Виклад основного матеріалу. Процес планування включає визначення стратегії й тактики надання послуг перевезення та супутніх послуг, побудову загального плану перевірок діяльності, а також оцінювання обсягу здійснюваного внутрішнього контролю на підприємстві. Система планування відіграє важливу роль у побудові прибуткового, стабільного, спрямованого на перспективу бізнесу з економічно обґрунтованою системою господарювання [10].

Управління підприємством обов'язково складається з дій планування, організування, мотивації та контролю. Для реалізації функцій управління передбачені відповідні методи. Зокрема, планування включає прогнозування, програмування і безпосередньо саме планування [7].

Планування діяльності АТП може проводитись за допомогою методів екстраполяції, створення сценаріїв, розумової атаки, факторного аналізу, експертної оцінки, побудови «дерева» рішень та інших.

Поширеним методом прогнозування у короткостроковому періоді є екстраполяція. Метод базується на припущенні, що закономірності, які склалися в минулому, будуть зберігатися і в майбутньому [3]. Висновки, отримані зі спостережень за параметром досліджуваного явища, переносяться на іншу частину об'єкта дослідження, тобто на основі аналізу ряду вибраних функції робиться висновок про інші її значення поза цим рядом. Так формуються прогнозні значення ряду кількісних характеристик дій підприємства, а використання принципу інерції дозволяє продовжити часовий ряд досліджуваного параметра [3, 12].

Метою застосування екстраполяції в АТП є демонстрація тих результатів, яких можна досягти при умові незмінності принципів, параметрів, швидкості надання транспортних послуг та супутніх робіт за певний проміжок часу. Однак, інертність економічних явищ і процесів часто порушується численними чинниками внутрішнього і зовнішнього середовища в силу того, що підприємство транспортної галузі є відкритою системою і функціонує за ринковими правилами. Тому ще однією умовою використання методу екстраполяції для АТП є можливість обґрунтування і врахування напрямків змін тенденції, явищ і процесів у перспективі. Перевагами методу є: простота апарату дослідження, можливість використання простих обчислювальних засобів для розрахунків, що додає оперативності процесу, відносно невеликий масив вихідної інформації [3].

Варто відзначити, що вплив зовнішнього середовища на процес надання основних та додаткових послуг підприємствами транспортної галузі зростає з кожним роком. У зв'язку з цим, зростає кількість науковців, які виділяють сканування зовнішнього середовища як невід'ємний самостійний напрям дослідження [3].

Як прогностичні методи управління АТП можна використовувати також метод прогнозування за моделями динамічних рядів і випереджувальних індикаторів, методи багатфакторного прогнозування [7].

За допомогою методу «мозкової атаки» накопичується велика кількість варіантів вирішення проблеми. Під час наради враховують усі без винятку ідеї, кожен з яких

окремо розглядають і оцінюють експерти. Діє принцип заборони критики, що сприяє більшій кількості висунутих ідей і продуктивному результату. Науково доведено, що групове мислення породжує на 70 % більше цінних нових ідей, ніж сума індивідуальних мислень [3].

Метод економічного факторного аналізу передбачає поетапний перехід від вихідної факторної системи до кінцевої факторної системи (чи навпаки) та виокремлення повного набору прямих, кількісних факторів, що здійснюють вплив на динаміку результуючого показника. Факторний аналіз в управлінні АТП застосовується для комплексного, системного аналізу впливу факторів. Розрізняють різні типи факторного аналізу. За характером досліджуваного зв'язку розрізняють детермінований і стохастичний факторний аналіз. За методикою дослідження – прямий і зворотний. У залежності від ступеня деталізації факторів – однорівневий і багаторівневий. За ознакою стану досліджуваних явищ – статичний і динамічний. За ознакою часу – ретроспективний і перспективний [4].

Функція планування вимагає від суб'єкта управління аналізу даних, що можна виконати популярним науковим методом дерев рішень (decision trees). Метод ще називають деревами вирішальних правил, або деревами класифікації та регресії. Метод поділяється на 2 етапи: «побудова» або «створення» дерева (tree building) і «скорочення» дерева (tree pruning). Древа рішень забезпечують ефективність вирішення задачі класифікації, що особливо актуально при налагодженні різноманітня наданих послуг транспортування. Древа рішень спрощують розуміння розв'язуваної задачі, тому легко трактуються користувачами; дозволяє зрозуміти, чому конкретний об'єкт належить до вказаного класу.

Широке застосування знаходить метод сценаріїв, що дозволяє оцінити ймовірний розвиток подій та наслідки управлінських рішень. У наукових джерелах сценарії розглядаються надійними і реально можливими варіантами розвитку процесів.

Сценарії розвитку заданої ситуації визначають варіанти тенденцій розвитку, взаємозв'язків між факторами, можливі стани, до яких може привести те чи інше управлінське рішення. Це метод багатоаспектних прогнозних оцінок, що може реалізуватися шляхом отримання узгодженої думки, використання матриць взаємодії, імітаційного моделювання, ситуаційного аналізу, аналізу трендів. При розробці сценаріїв застосовують також економетричні моделі, системи діаграм, метод «логіки можливого розвитку подій», метод перехресного впливу подій, «метод Баеса» тощо. В організації роботи АТП метод використовується для генерування основної лінії розвитку підприємства та її складових, а також для визначення критеріїв оцінювання цілей. Формування декількох можливих сценаріїв розвитку ситуації, які відрізняються набором припущень і взаємозв'язками факторів впливу, підвищують імовірність знаходження ефективного рішення керівником. Традиційно вирізняють базовий, песимістичний та оптимістичний сценарії. Їх зіставлення та ретельний аналіз допомагає прийняти правильне управлінське рішення [11].

Методи експертиз або методи експертних оцінок – це велика група методів, які теж варто використовувати в управлінні АТП. Суть методу – опрацювання інформації, джерелом якої є опитування експертів з глибоким рівнем знань досліджуваних явищ і тенденцій [11]. На основі думок спеціалістів щодо питань впровадження та налагодження процесів транспортування можна спрогнозувати адекватну картину розвитку підприємства, врахувати можливі зсуви і стрибки.

Серед інших методів експертних оцінок популярності в новому тисячолітті набув метод форсайт, що пропонує управлінцям розглядати підприємство як «живий організм», а не стабільну систему. «Форсайт» означає «передбачення», «погляд у

майбутнє» [9]. У процесі форсайту цілеспрямованіше використовуються знання експертів, комбінуються різні методи (Делфі, SWOT-аналіз, мозковий штурм тощо). Дана технологія передбачення майбутнього характеризується системністю провадження, вимагає ретельності у плануванні. З цього приводу вчений Патрік Беккер зазначає, що форсайт – процес, а не простий набір методів, включно з консультативними процедурами, направлені на функціонування взаємозв'язків між зовнішнім і внутрішнім середовищем об'єкту дослідження [9]. Трактують обґрунтовує сприйняття форсайту з двох точок зору: як набору методів управління (в статичності) та як систематично здійснюваного процесу (в динаміці). Форсайт здійснюється на принципі свідомо «активного» відношення до майбутнього, що в своїй суті є близьким до принципів соціальної відповідальності.

Планування розвитку підприємств транспортної галузі розпочинається з формування програми чи проекту уповноваженими особами. Схематично планування результатів стратегії, програми чи проекту розвитку підприємства можна представити у вигляді схеми 1.



Рисунок 1 – Планування стратегії/програми/проекту/ соціально-економічного розвитку АТП

Джерело: [9, 11]

Початкові етапів (рис. 1.) стосуються загального процесу планування та розроблення стратегії, програми або проекту, а два останні закладають основу для створення системи подальшого моніторингу соціально-економічного розвитку підприємства.

На етапі формування карти результатів складають список бажаних позитивних результатів вирішення певного соціально-економічного завдання, яке стоїть перед підприємством. Карту результатів часто створюють за допомогою такого інструменту, як дерево проблем, при цьому завдання записують на стовбурі дерева і формулюють відповідне позитивне вирішення завдання на довгострокову перспективу. До прикладу, якщо проблема полягає у низькій участі в процесі управління стейкхолдерів, прямим позитивним результатом слугує збільшення довіри та залучення до процесу управління. Довгостроковими наслідками є розширення участі прямих стейкхолдерів в окремих напрямках діяльності АТП, ретельніше дотримання податкового законодавства тощо. За своєю суттю карта результатів – протилежність дерева проблем, а технічно карта результатів – наслідок перефразування окремих соціально-економічних проблем і їх наслідків на бажаний позитивний результат.

На етапі формування рамки результатів розробляється загальна таблиця результатів за стратегічним або програмним документом в цілому. Рамка результатів містить як очікувані результати, так і індикатори їх вимірювання, вихідні дані, ризики та припущення. Зазначимо, що правильне формулювання результатів при розробці стратегії/програми/проекту – база якісного соціально-економічного розвитку АТП для прийняття у майбутньому ефективних управлінських рішень.

Зауважимо також, що всі показники в процесі аналізу порівнюються як з тими, що закладені в Стратегії розвитку підприємства, так і з середніми показниками по підприємствах галузі. Покращення досліджуваних показників (позитивні зміни абсолютних та відносних показників) свідчить про досягнення поставлених цілей розвитку. Невід’ємною складовою оцінювання соціально-економічного розвитку АТП є окреслення висновків про вплив сформованих планів розвитку підприємства на загальний стан останнього, а також формулювання пропозицій щодо покращення ситуації.

Висновки.

1. Часто система планування на підприємстві відрізняється недосконалістю, відсутністю єдиного підходу щодо використання індикаторів виконання заходів, передбачених програмою соціально-економічного розвитку. Для нормалізації зазначеної проблеми варто розробити індикатори виконання плану розвитку з прив’язкою до виконання конкретних проектів соціально-економічного розвитку АТП та запланованих показників їх реалізації для окремо взятого питання на підприємстві. Це дозволить враховувати специфіку організації та окреслити можливі варіанти реалізації соціально-економічного розвитку останньої. Вважаємо, що доцільним є аналіз всього спектру економічних показників розвитку АТП.

2. Сучасні підходи до планування забезпечують наглядність трансформацій окремо взятого підприємства, спрямованих на забезпечення стійкого та динамічного розвитку. Планування розвитку автотранспортного підприємства передбачає важливий механізм регулювання соціально-економічних процесів на мікрорівні.

Список літератури

1. Дмитрієв І.А., Близнюк А.О., Онісіфорова В.Ю. Управління економічною безпекою автотранспортного підприємства : монографія . Харків. нац. автомоб.-дорож. ун-т. Харків: ХНАДУ, 2014. 215 с.
2. Дмитрієв І.А., Блага В.В., Благой В.В. Оцінка ефективності інвестиційних проєктів на підприємствах автомобільного пасажирського транспорту : монографія . Х.: ХНАДУ, 2010. 175 с.
3. Грабовецький Б. Є. Методи експертних оцінок: теорія, методологія, напрямки використання: монографія . Вінниця : ВНТУ, 2010. 171 с.
4. Загребя М. М. Теоретичні аспекти використання факторного аналізу при аналізі динаміки фінансового стану підприємства . *Наукові праці Кіровоградського національного технічного університету. Економічні науки*. 2014. Вип. 25. С. 455–460.
5. Зайцева І.Ю. Економіко-організаційні основи захисту підприємств автотранспорту від недружніх поглинань: монографія . Х.: УкрДАЗТ, 2011. 427 с.
6. Криворучко О.М., Сукач Ю.О.; Менеджмент бізнес-процесів автотранспортних підприємств: монографія . Х.: ХНАДУ, 2012. 243 с.
7. Мельник О.О. Системи і методи планування економічної безпеки автотранспортного підприємства . *Економіка і регіон*. 2013. № 1. С. 32–37.
8. Муромець Н.Є., Черноус О.І. Забезпечення стійкого функціонування автотранспортної системи регіону : монографія . Донецьк: ВІК, 2010. 277 с.
9. Федуллова Л. І. Форсайт: сучасна методологія технологічного прогнозування . *Економіка і прогнозування*. 2008. №3. С. 106–138.
10. Планування діяльності автотранспортного підприємства: підручник / Турченко М.О., Швець М.Д., Кірічок О.Г., Кристопчук М.Є. Вид. 2-ге, перероб. та доповн. Рівне: НУВГП, 2017. 367 с.
11. Шевчук Я.В. Автотранспортна інфраструктура: теорія і методи сучасних регіональних досліджень : монографія . Ужгород: Ліга-Прес, 2011. 376 с.
12. Шинкаренко В.Г., Ананко І.М. Разработка автотранспортных услуг : монография. Харьк. нац. автомобил.-дорож. ун-т. Х.: ХНАДУ, 2012. 251 с.
13. Шинкаренко В.Г., Ананко І.М. Удосконалення автотранспортних послуг . Х. : ХНАДУ, 2011. 33 с.

References

1. Dmytriiev, I.A., Blyzniuk, A.O. & Onisiforova, V.Iu.; (2014). *Upravlinnia ekonomichnoiu bezpekoiu avtotransportnoho pidpriemstva* [Management of the economic security of the motor vehicle enterprise] Kharkiv. nats. avtomob.-dorozh. un-t. Kharkiv: KhNADU [in Ukrainian].
2. Dmytriiev, I.A., Blaha, V.V. & Blahoi, V.V. (2010). *Otsinka efektyvnosti investytsiinykh proektiv na pidpriemstvakh avtomobilnoho pasazhyrskoho transportu* [Evaluation of the effectiveness of investment projects at enterprises of automobile passenger transport] . Khark. nats. avtomob.-dor. un-t. Kh.: KhNADU [in Ukrainian].
3. Hrabovetskyi, B.Ye. (2010). *Metody ekspertnykh otsinok: teoriia, metodolohiia, napriamky vykorystannia* [Methods of expert evaluations: theory, methodology, areas of use] . Vinnytsia : VNTU [in Ukrainian].
4. Zahreba, M.M. (2014). Teoretychni aspekty vykorystannia faktornoho analizu pry analizi dynamiky finansovoho stanu pidpriemstva [Theoretical aspects of the use of factor analysis in the analysis of the financial condition of the company] . *Naukovi pratsi Kirovohrads'koho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Ekonomichni nauky – The Collection of Scientific Works of Kirovohrad National Technical University. Economic Sciences* . Vol. 25, 455–460 [in Ukrainian].
5. Zaitseva, I.Iu. (2011). *Ekonomiko-orhanizatsiini osnovy zakhystu pidpriemstv avtotransportu vid nedruzhnikh pohlynan* [Economic and organizational foundations of the protection of motor transport enterprises from unfriendly takeovers] . Kharkiv: UkrDAZT [in Ukrainian].
6. Kryvoruchko, O.M. & Sukach, Yu.O.; (2012). *Menedzhment biznes-protsesiv avtotransportnykh pidpriemstv* [Management of business processes of motor transport enterprises]. Khark. nats. avtomob.-dor. un-t. Kharkiv: KhNADU [in Ukrainian].
7. Melnyk, O.O. (2013). Systemy i metody planuvannia ekonomichnoi bezpeky avtotransportnoho pidpriemstva [Systems and methods of planning the economic safety of the motor vehicle enterprise] . *Ekonomika i rehion – Economics and Region*, 1, 3 –37 [in Ukrainian].
8. Muromets, N.Ie. (2010). *Zabezpechennia stiikoho funktsionuvannia avtotransportnoi systemy rehionu* [Ensuring sustainable functioning of the region's motor transport system] . Donetsk: VIK [in Ukrainian].

9. Fedulova, L.I. (2008). Forsait: suchasna metodolohiia tekhnolohichnoho prohnozuvannia. [Foresight: a modern methodology of technological forecasting] . *Ekonomika i prohnozuvannia – Economics and forecasting*, 3, 106–138 [in Ukrainian].
10. Turcheniuk, M.O., Shvets, M.D., Kirichok, O.H. & Krystopchuk, M.Ie. (2017). *Planning of the activities of the motor transport enterprise* . (2-d ed.) . Rivne: NUVHP [in Ukrainian].
11. Shevchuk, Ya.V. (2011). *Avtotransportna infrastruktura: teoriia i metody suchasnykh rehionalnykh doslidzhen* [Road transport infrastructure: theory and methods of modern regional research] . Uzhhorod: Liha-Pres [in Ukrainian].
12. Shinkarenko, V.G. & Ananko, I.M. (2012). *Razrabotka avtotransportnykh uslug* [Development of motor transport services]: Kharkov: HNADU [in Ukrainian].
13. Shynkarenko, V.H. & Ananko, I.M. (2011). *Udoskonalennia avtotransportnykh posluh* [Improvement of motor transport services] . Kharkiv : KhNDAU [in Ukrainian].

Oleg Lyashuk, Prof., DSc., **Uliana Plekan**, PhD econ. sci., **Oleg Tson**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Tetyana Pyndus**, Assist.

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

Planning the Activities of the Motor Transport Enterprise. Methodological Aspects

The purpose of research is to analyze and summarize the main scientific and methodological aspects of planning socio-economic activities of motor transport enterprises.

The article analyzes and summarizes the main scientific and methodological aspects of planning socio-economic activities of motor transport enterprises and substantiates the dependence of effective functioning of motor transport enterprises on a properly formed development plan in the short and long term. The scientific and methodological tools for planning the socio-economic activities of motor transport enterprises are generalized. A number of methods are described by which the activity of motor transport enterprises can be planned. In particular, the methods are analyzed: extrapolation, scenario creation, mental attack, factor analysis, forecasting by models of time series and leading indicators, methods of multifactor forecasting, expert evaluation, building a "tree" of decisions. The scheme of planning the program (project) of social and economic development of motor transport enterprises is offered. Stages of planning are presented, including: planning of works on improvement of separate kinds of activity, definition of interested parties, identification and analysis of potential problems, formulation of vision, formation of a map of results, formation of a framework of results. The documentation of each stage of planning is shown, including: drawing up of the plan (schedule) of works, schemes of interested parties, the list of priority problems, a tree of problems, the concept of vision of each of priority problems, maps of results on each of priority problems. enterprises. Since the stages of formation of the map of results and the general table of results of the project lay the foundation for the creation of a system of further monitoring of socio-economic development of the transport enterprise, the article pays special attention to these stages.

Modern approaches to planning provide clarity of transformations of a single enterprise aimed at ensuring sustainable and dynamic development. Thus, the planning of the development of the motor transport enterprise provides an important mechanism for regulating socio-economic processes at the macro level.

efficiency, management, motor transport enterprise, social and economic development of the enterprise, planning methods, development program

Одержано (Received) 28.02.2022

Прорецензовано (Reviewed) 11.03.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

А.В. Гриньків, канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: avgrinkiv@gmail.com

Елементно-модульний метод системи технічного сервісу транспортних машин

В роботі запропоновано, що елементно-модульний метод системи технічного сервісу транспортних машин базується на характерних інтервалах зміни діагностичних параметрів, що визначають технічний стан їх вузлів, систем та агрегатів як елементів. Теоретично обґрунтовані зміни діагностичних параметрів з урахуванням ступеню відновлення технічного стану систем і агрегатів за операціями технічного сервісу. Розглянуто граничний ресурс елементів транспортної машини та закон розподілу цього показника. Доведено з економічної точки зору доцільність відновлення технічного стану елементів транспортних машин запропонованою системою технічного сервісу. Запропоновано критерій економічної доцільності застосування технічних дій по відновленню технічного стану транспортної машини. Показано, що запропонований елементно-модульний метод технічного сервісу дає можливість коректувати ті чи інші технічні операції забезпечення і відновлення належного рівня показників експлуатаційної надійності транспортних машин.

елементно-модульний метод, технічний сервіс, транспортна машина, діагностичний параметр, технічний стан

Постановка проблеми. У проблемі підвищення надійності функціонування та ефективності використання транспортних машин (ТМ) на підприємствах, фірм, компаній, в т.ч. агропромислового виробництві (АПВ) велика роль належить методам удосконалення системи їх технічного сервісу. Під системою технічного сервісу розуміють сукупність принципів, правил і методів виконання технічних впливів по забезпеченню працездатного стану вузлів, систем і агрегатів ТМ [1]. При цьому технічне обслуговування (ТО) служить для підтримки технічно справного стану машин, а ремонт – відновлення їх технічного стану [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Більшість дослідників удосконалення системи технічного сервісу машин розглядає забезпечення їх експлуатаційної надійності через розробку та ефективність методів обслуговування і ремонту [2-6]. В той час фінансово-економічний стан підприємств, що мають на своєму балансі ТМ, в значній мірі залежить від їх технічного стану [7]. Вибір стратегії організації системи технічного сервісу в сучасних умовах має здійснюватися на основі системно-спрямованого аналізу зміни технічного стану ТМ в процесі експлуатації і зміни витрат на їх обслуговування [6]. Основною процедурою є побудова узагальненої моделі, що відображає взаємозв'язок окремих складових системи технічного сервісу [8]. У зв'язку з цим одним з основних стратегічних пріоритетів підвищення надійності та ефективності

роботи ТМ є вдосконалення систем забезпечення їх працездатності на основі критерію мінімуму витрат на ТО і Р. Існуючі варіанти систем ТО і Р засновані на проведенні профілактичних технічних впливів або спрямовані на усунення пошкоджень після відмови елементів систем і агрегатів ТМ [9].

До останнього часу єдиною, офіційно чинною є планово-запобіжна система (ПЗС) ТО і Р [10]. Вивчення досвіду експлуатації ТМ у АПВ свідчить, що ця система

дозволила дбайливо і раціонально витрачати ресурс машин за рахунок виконання регламентованих технічних впливів [11]. Спостерігається неодноразове перевищення періоду експлуатації ТМ амортизаційного терміну служби [12]. Прагнення в даний час до збільшення продуктивного часу за рахунок скорочення терміну перебування у ТО і Р та витрат на забезпечення працездатності машин призводить в кінцевому рахунку до скорочення тривалості їх служби.

В такому випадку використання ТО і Р для парку різномарочних машин є недоцільним при відмовленні від регламентованих технічних впливів. В той час регламент проведення ТО і Р повинен бути більш індивідуальним для кожного об'єкта спостереження [13]. Це може бути досягнуто тільки при підвищенні інформативності про технічний стан машин [6]. В даний час для забезпечення справності і працездатності ТМ, крім ПЗС, застосовуються заявочна система, яка здійснюється за потребою, тобто по фактичному стану машин. При цьому ТО і Р, ПЗС, а також системи на основі планової діагностики технічного стану базуються на основі проведення технічного діагностування [14] як самостійного виду ремонтно-профілактичного впливу (рис. 1).

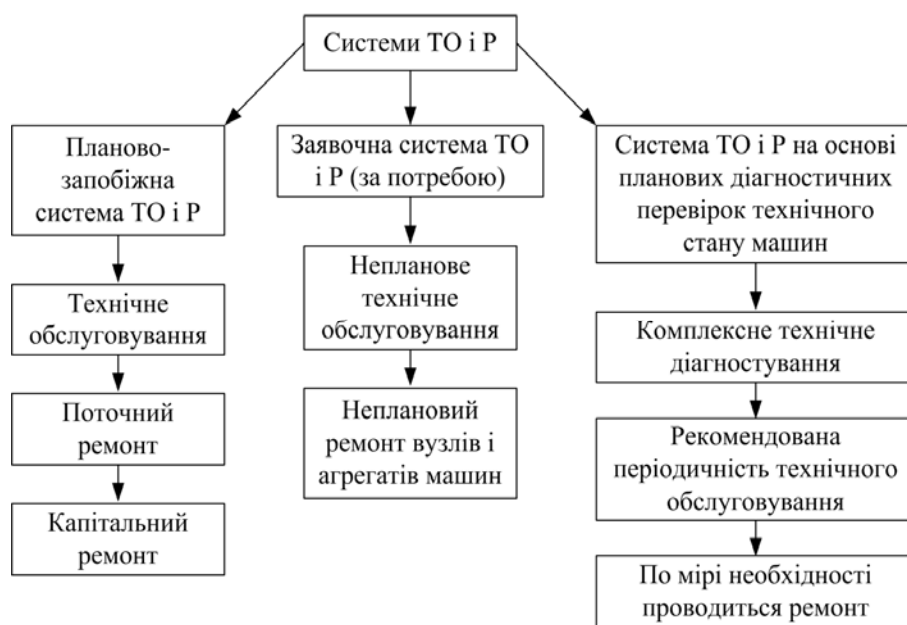


Рисунок 1 – Системи технічного обслуговування і ремонту транспортної техніки

Джерело: розроблено автором

Планово-запобіжна система ТО і Р ТМ в Україні дісталася у спадок. До її появи існували відповідні "Інструкції", які регламентували особливості виконання ТО і Р машин. На зміну інструкціям прийшло "Положення про профілактичне обслуговування автомобілів". В ньому вперше були прийняті принципи ПЗС забезпечення працездатності. Цим документом введена триступенева система ТО: ЩО – щоденний огляд, ТО-1, ТО-2. З 1994 р. в Україні, було прийнято "Положення про профілактичне обслуговування і ремонт рухомого складу автомобільного транспорту" (далі "Положення-94"). Це положення передбачало альтернативу періодичності ТО за пробігом (напрацюванням) АТТ у вигляді періодичності кількості спаленого палива. У 2010 р. було затверджено наказ №173 "Про затвердження Правил технічної експлуатації тракторів, масоходних шасі, самохідних сільськогосподарських, дорожньо-будівельних і меліоративних машин, сільськогосподарської техніки, інших механізмів".

Даний наказ передбачає проведення ТО і Р за відповідний пробіг (напрацювання), регламентований заводами виробниками з врахуванням кліматичних та експлуатаційних умов та впровадження трьохсистемну стратегію обслуговування: ТО-1, ТО-2, ТО-3 (табл.1).

Таблиця 1 – Періодичність ТО транспортних машин

Тип ТМ	Періодичність, видів технічного обслуговування			
	ЩО	ТО-1	ТО-2	ТО-3
Автомобілі вантажні, причеи і напівпричеи	Один раз на робочу добу	4000 км	16000 км	–
Трактори		400 мото-год	1600 мото-год	6400 мото-год

Джерело: розроблено автором

Зазначені положення передбачають наступні технічні впливи: ТО в період обкатки; щоденне обслуговування (ЩО); перше технічне обслуговування (ТО-1); друге технічне обслуговування (ТО-2); третє технічне обслуговування (ТО-3); сезонне технічне обслуговування (СТО); поточний ремонт (ПР); капітальний ремонт (КР); технічне обслуговування під час консервації ТМ; технічне обслуговування та ремонт ТМ на лінії [15].

Якщо періодичність обслуговування ТМ відрізняється від періодичності, визначеної документацією заводу-виробника, то враховують коефіцієнт корегування, запропонований і розроблений заводом виробником, а сезонне обслуговування виконується для підготовки об'єкта до використання в осінньо-зимових чи весняно-літніх умовах. Це здійснюється двічі на рік – весною та восени.

Періодичність ТО, може бути зменшена власником ТМ до 23% у залежності від умов експлуатації. За таких умов, ремонт – комплекс операцій щодо відновлення справності або працездатності ТМ. Для реалізації поточного ремонту (ПР) можливе застосування знеособленого або комбінованого методів [16]. Знеособленість ремонту ТМ полягає у швидкій заміні несправного вузла, системи або їх агрегати, які ремонтують, справним новим чи заздалегідь відремонтованим з іншої ТМ, тобто зводиться лише до демонтажно-монтажних операцій. Не знеособленість не допускає таку заміну і ТМ очікує на повернення з ремонту системи або агрегату [17]. Комбінований методу ПР полягає в тому, що для тимчасового швидкого відновлення працездатності ТМ несправні вузли, системи і агрегати замінюють "чужими". Оскільки на відновлення "своїх" деталей для ТМ потрібен тривалий час через значну трудомісткість або ж відсутність запасних частин. Після того, як ці системи і агрегати відновленні, вони встановлюються на "свої" ТМ [18].

Розв'язанню проблеми підвищення експлуатаційної надійності ТМ розробкою ефективною системи їх технічного сервісу присвячено багато робіт вітчизняних і зарубіжних вчених, таких як Авдонькін Ф.М., Аулін В.В., Барзилович Є.Ю., Барлоу Р., Бідняк М.Н., Біліченко В.В., Волков В.П., Варфоломєєв В.М., Говорущенко М.Я., Кузнецов Є.С., Міхлін В.М., Полянський О.С., Сараєв А.В., та ін. Однією з основних умов досягнення відповідного рівня надійності вони розглядали оптимальну експлуатацію. Теоретичним питанням удосконалення управління технічним станом ТМ є вибір прогресивних технічних напрямів і систем забезпечення їх експлуатаційної надійності створенням системи технічного сервісу [19]. Оскільки система ТО і Р на певному етапі розвитку формується на основі досягнутого наукового рівня теоретичних і експериментальних досліджень, то вона періодично повинна уточнюватися і вдосконалюватися. Алгоритм реалізації діючої в Україні системи технічного сервісу

ТМ представлено на рисунку 2.

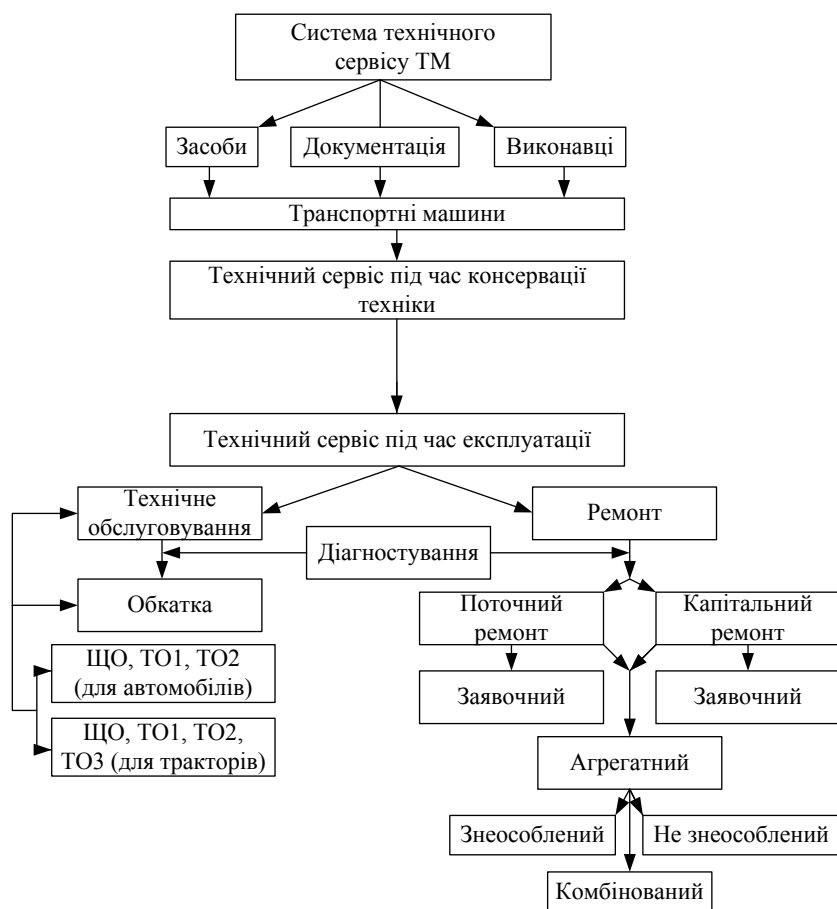


Рисунок 2 – Алгоритм реалізації діючої в Україні системи технічного сервісу ТМ

Джерело: розроблено автором

При забезпеченні експлуатаційної надійності ТМ існує тенденція переходу від ПЗС ТО і Р до системи обслуговування за технічним станом [20, 21]. Система обслуговування і ремонту за станом має три види робіт: обов'язкові, контрольно-діагностичні, усунення виявлених несправностей [22]. В міру вдосконалення методів і засобів діагностування об'єм обов'язкових робіт зменшується, в такому випадку можливе застосування в "чистому вигляді" тактики ТО і Р за станом [22, 23]. В цій системі обов'язкові роботи і діагностування є плановими, а усунення несправностей або виявлення відмов носить прогностичний та запобіжний характер [24].

Для транспортних, сільськогосподарських, будівельних та інших машин застосовується третя змішана система, яка об'єднує в собі елементи першої і другої. В свою чергу змішана система ТО і Р в залежності від методу встановлення періодичності і об'єму технічних впливів поділяється на середньостатистичну і діагностичну [25]. Для середньостатистичної системи в якості основного математичного апарату широко застосовується теорія ймовірності і математична статистика, а для діагностичної – теорія експлуатаційної надійності, що об'єднує в розумних межах детерміновані і ймовірнісні розрахунки [26-28].

Для забезпечення достатнього рівня надійності ТМ під час експлуатації, мінімізації витрат і підтримання їх в працездатному стані, а також для забезпечення максимальної ефективності використання, гостро постає питання у розробці нової або удосконаленні існуючої системи технічного сервісу [22, 29]. Зазначене дозволяє

забезпечувати необхідний рівень експлуатаційної надійності та працездатності ТМ при залученні сучасних засобів та заходів мінімізації витрат.

При модульній структурі парку машин на підприємстві ТМ, в якій вони групуються за певними ознаками, застосування єдиної системи технічного сервісу стає недоцільним. Потрібна більш гнучка, диференційована система, заснована на визначенні технічного стану кожного елемента як об'єкта діагностування.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка методу побудови системи технічного сервісу, яка повинна бути адаптивною та елементно-модульною, тобто враховувати технічний стан структурних елементів вузлів, систем і агрегатів ТМ і бути спрямованою на реалізацію певних технічних дій кожного модуля парку машин.

Виклад основного матеріалу.

Визначено, що управлінням технічним станом ТМ, на основі діагностичного інформаційного забезпечення, можна гарантувати прийнятний рівень експлуатаційної надійності впровадженням елементно-модульного методу створення системи технічного сервісу. Основними завданнями підходу є [30, 31]:

- відповідність інтенсивності технічної експлуатації фактичному технічному стану;
- проведення необхідного і достатнього обсягу робіт технічного сервісу;
- належне і своєчасне управління ресурсом систем і агрегатів ТМ.

В зв'язку з цим діагностичні параметри, а отже і технічний стан ТМ, будуть змінюватися в певних межах [32,33], які використовують для виділення модулів в існуючому парку машин підприємства. Його можна характеризувати ступенем відновлення $\mu^{(B)}$. Для першого періоду напрацювання ступінь відновлення технічного стану дорівнює:

$$\mu_1^{(B)} = \left(\mu_{11}^{(B)}, \mu_{12}^{(B)}, \dots, \mu_{1i}^{(B)}, \dots, \mu_{1n}^{(B)} \right), \quad (1)$$

де $\mu_{1i}^{(B)} = \frac{D_{1i}}{D_{0i}}$, причому $\mu_{1i}^{(B)} \leq 1$; D_{0i} , D_{1i} – відповідно значення i -го

діагностичного параметру в початковий момент та в кінці першого відновлення технічного стану. При цьому абсолютну зміну діагностичного параметру можна визначити за виразом:

$$\Delta D_1 = D_0 \left(\mu_1^{(B)} - \exp(-\alpha_1 t_1) \right). \quad (2)$$

Після n -ної технічної дії зміна діагностичного параметру становить [140]:

$$D_n(t) = D_{0n} \exp(-\alpha_n t_n); \quad (3)$$

$$\Delta D_n(t) = D_{n-1} \left(\mu_1^{(B)} - \exp(-\alpha_n t_n) \right); \quad (4)$$

$$D_n(t) = D_{n-1}(t) \beta_n. \quad (5)$$

Оскільки процес зміни технічного стану елементів ТМ носить випадковий характер, то діагностичні параметри можна описати узагальненим випадковим процесом, який характеризується швидкістю їх спрацювання та відновлення. Враховуючи те, що елемент ТМ можна використовувати до певних граничних значень діагностичного параметру D_{ep} , слід припустити, що тривалість роботи його визначальних підсистем до поточного та капітального ремонту визначиться функцією випадкового процесу з горизонталлю D_{ep} .

Граничний ресурс елемента ТМ, дорівнює:

$$T_{ep} = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{D(t)}{D_{ep}}. \quad (6)$$

Величина цього показника довговічності є випадковою і її можна описати законом нормального розподілу [34, 35]:

$$f(T_{ep}) = \frac{1}{V_t T_{ep} \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(T - T_{ep})^2}{2V_t^2 T_{ep}^2} \right), \quad (7)$$

де V_t – коефіцієнт варіації ресурсу відповідального елемента ТМ.

Метод організації системи управління технічним станом елементів ТМ в цілому за діагностичною інформацією дозволяє з достатньою ймовірністю визначити граничний, залишковий та використаний ресурс і найбільш обґрунтовано прийняти конкретні технічні рішення по відновленню їх технічного стану і реалізувати систему технічного сервісу в будь-які моменти експлуатації, визначити оптимальні терміни та обсяг робіт по ТО, ПР і КР. Крім того, можна планувати більш раціональне використання ТМ на підприємствах.

Оскільки метод синтезованої кількісної оцінки технічного стану базується на показниках діагностичної інформації, ресурсу елементів ТМ та модулів парку машин, то їх працездатний стан в конкретний момент часу можна уявити як функціональну залежність [36-38]:

$$R_t^M = F(D_t, T_R), \quad (8)$$

$$\text{при } \lim T_R \rightarrow 0; \lim R_t^M \rightarrow 0. \quad (9)$$

Доцільність відновлення технічного стану елементів ТМ системою технічного сервісу з економічної точки зору можна оцінити величиною затрат на здійснення технічних впливів, а також за зміною показників надійності. Якщо затрати на відновлення стану при цьому, з врахуванням втрат від простоїв по технічним причинам, подані відношенням до його первісної вартості і втрат від простоїв в період до технічної дії, перевищують величину відновленого ресурсу віднесено до величини ресурсу за певний період, то такі дії економічно недоцільні. Отже критерієм економічної доцільності застосування тих чи інших технічних дій по відновленню технічного стану ТМ є наступний:

$$\frac{C_{m\partial}^D + S_{n\partial}}{C_n + S_{\partial\partial}} \leq \frac{R_{n\partial}}{R_{\partial\partial}}, \quad (10)$$

де $C_{m\partial}^D$, C_n – відповідно собівартість технічної дії та вихідна (початкова) вартість елемента АТТ;

$S_{n\partial}$, $S_{\partial\partial}$ – втрати від простою машини по технічним причинам в період з виконанням та без виконання технічних дій;

$R_{n\partial}$, $R_{\partial\partial}$ – відповідні значення ресурсів у вказані періоди.

Критерій дає можливість оцінити припустиму собівартість виконаної технічної дії по поліпшенню стану ТМ в цілому і парку машин:

$$C_{m\partial}^D = \mu_{m\partial} (C_n + S_{\partial\partial}) - S_{n\partial}, \quad (11)$$

де

$$\mu_{m\partial} = \frac{R_{n\partial}}{R_{\partial\partial}}. \quad (12)$$

В якості критерію ефективності запропонованої технічної дії по поліпшенню

технічного стану елементу ТМ можна використати наступний [39]:

$$E_{m\partial} = f_{m\partial}^E \mu_{m\partial} \geq 1, \quad (13)$$

де $\mu_{m\partial}$ – ступінь відновлення технічного стану системи або агрегату ТМ після виконання певних технічних дій;

$f_{m\partial}^E$ – коефіцієнт економічної ефективності виконання конкретної технічної дії, значення якого можна обчислити за виразом:

$$f_{m\partial}^E = \frac{C_{\Pi} + S_{БД}}{C_{ТД}^D + S_{ПД}}. \quad (15)$$

Рациональне використання ресурсу системи або агрегатів ТМ передбачає розрахунок коефіцієнта використання ресурсу r_R [40]:

$$r_R = \frac{R_{R\partial}}{R_{Rn}}, \quad (16)$$

де R_{Rn} , $R_{R\partial}$ відповідно, потенціальний та реальний (дійсний) ресурси ТМ.

Коефіцієнт використання ресурсу може мати наступні значення: $r_R > 1$, $r_R = 1$, $r_R < 1$. Це визначається можливими ситуаціями, що залежать від ступеня використання ресурсу: $R_{Rn} > R_{R\partial}$, $R_{Rn} = R_{R\partial}$, $R_{Rn} < R_{R\partial}$.

Зазначимо, що величиною реального ресурсу оцінюють якість системи технічного сервісу, при достатньому рівні якої, показники реального і потенціального ресурсів будуть співпадати. Величина потенціального ресурсу – це норма напрацювання ТМ до наступної технічної дії. Цим попереджається недовикористання технічних можливостей ТМ в експлуатації.

Запропонований елементно-модульний метод управління системою технічного сервісу ТМ дає можливість розробити систему управління технічним станом ТМ та парком машин підприємства, який включає наступний алгоритм:

1. Визначення початкового стану: отримання інформації про конструктивні особливості, пробіг (напрацювання), тривалість експлуатації;
2. Врахування нормативно-правових актів та норм, що регулюють використання елементів і ТМ в цілому на підприємствах.
3. Умови використання ТМ на підприємствах: дорожньо-кліматичні особливості, кваліфікація операторів, навантажено-швидкісний режим експлуатації.
4. Отримання діагностичної інформації про технічний стан елементів і ТМ в цілому, використовуючи методи, методики та обладнання технічної діагностики.
5. Технічне забезпечення для аналізу діагностичної інформації з включенням програмного забезпечення на ПК.
6. Формування модулів парку машин на підприємстві для оперативного корегування номенклатурою технічних дій ТО і Р в процесі експлуатації.
7. Обробка, систематизація та узагальнення отриманої діагностичної інформації про технічний стан та експлуатаційної надійності елементів і ТМ та модулів парку машин.
8. Прогнозування технічного стану елементів ТМ у цілому в певний момент часу (напрацювання), постановка гарантованого терміну виконання ними своїх функцій, вироблення керуючих дій по підтриманню та поліпшенню їх технічного стану та стану парку машин за допомогою елементно-модульної системи ТО і Р, побудованої на основі запропонованого методу.

Запропонований алгоритм управління реалізує комплексний підхід для побудови ефективної елементно-модульної системи ТО і Р. Маючи інформацію про початковий

стан для підтримання і належного рівня складу надійності парку машин підприємства та врахувавши умови використання ТМ можливо ідентифікувати стратегію системи ТО і Р та визначити закономірності зміни технічного стану їх елементів. Важливим є врахування конкретних нормативно-правових актів та норм, що регулюють експлуатацію ТМ на підприємстві, оскільки недотримання хоча одного з приписів може призвести до заборони експлуатації.

Управління технічним станом елементів ТМ і модулів парку машин підприємств орієнтовано перш за все, на оперативний контроль ресурсовизначальних діагностичних параметрів технічних систем та їх підсистем, спеціальні режими адаптації на початковому етапі експлуатації, коли експлуатаційні відмови практично відсутні. Виявляються і враховуються особливості впливу режимів роботи ТМ і зовнішніх умов на діагностичну інформацію про їх технічний стан. Отримана інформація у вигляді масиву результатів діагностики різноманітними методами і методиками [41-44] не може бути одномірною та рівнозначною. Постає необхідність групування та зберігання інформації, що висуває певні вимоги до програмного забезпечення.

В дослідженнях при ЩО застосовувались операції з періодичністю близько 1500км пробігу для автомобілів або 62,5 мото-год для тракторів. Терміни проведення операцій корегуватися в певних межах з метою узгодження та періодичного співпадання з графіком проведення робіт по ТО-1. Операції відповідали термінам як за ПЗС, так і елементно-модульною системою (ЕМС) ТО і Р та необхідності виконання робіт ТО-2 для автомобілів і тракторів та ТО-3 – для тракторів.

Застосування операцій адекватного рівня технічного стану ТМ доцільно при виконанні робіт ПР і КР, де бажано достовірно знати наявний технічний стан, а отже мати можливість прогнозувати його на тривалий термін експлуатації. Чим точніше та повніше буде отримана інформація, включаючи інформацію про стан матеріалу деталей, геометричні параметри деталей та спряжень, наявність прихованих потенційних дефектів, тим більш достовірно буде дано гарантований строк служби елементів ТМ, звичайно враховуючи умови експлуатації та інтенсивність використання.

Для ТМ технічні дії за ПЗС ТО і Р і інтервали діагностування були чітко визначені в 62,5 мото-год / 3000 км пробігу. Проведення та об'єм технічних дій здійснюване по регламенту ПЗС й прийняті на підприємстві. При цьому можливі відхилення. Згідно нормативу вони складали $\pm 10\%$.

Порядок виконання діагностичних операцій і технічних дій, при використанні елементно-модульної системи ТО і Р, та управління технічним станом для автомобілів КамАЗ пропонується наступним чином: виконання діагностичних операцій з певною періодичністю (1500 км пробігу), якщо технічний стан елементів ТМ змінюється стабільно та допускає використання його на планований період; ТО-1 (0...3000 км пробігу) з відповідними операціями діагностування і ранжованого ряду технічних дій в обсязі передбаченому реальним технічним станом; наступні ТО-1 в терміни та обсязі регламентованому поточним технічним станом. Зазначимо, що при цьому змінюється не лише терміни та структура технічних дій, але і кількість ТО. Термін ТО-2, що визначає здатність моторної оливи виконувати свої функції, складає близько 12 тис. км пробігу з операціями діагностування та відповідними технічними діями. Терміни операцій ПР – в разі потреби – з попередніми операціями діагностування складає в межах інтервалу 0...300 тис. км, а КР – по потребі 300 тис. км пробігу.

Для тракторів Т-150К, МТЗ 1025, 8РТ ІТ4 структура операцій мала вид: виконання діагностичних операцій з певною періодичністю (62,5 мото-год), при досягненні ТО-1 (125 мото-год) операції діагностування ранжованого ряду з

відповідними технічними діями в обсязі передбаченому Положенням, наступні три ТО-1 – аналогічно; ТО-2 через 250 мото-год з операціями діагностування та відповідними технічними діями; ТО-3 через 500 мото-год з операціями діагностування та відповідними технічними діями; ПР – в разі потреби з попередніми операціями діагностування в межах інтервалу 0...10000 мото-год; КР – при досягненні 10000 мото-год.

Операції діагностування ТМ за елементно-модульним методом проводили в термінах аналогічно за ПЗС, якщо відсутня ситуація критичного або є сумніви щодо певного виду технічного стану. У разі отримання сигналу небезпечного, передаварійного стану, проводиться уточнення причини його виникнення згідно ранжованого ряду інформаційного забезпечення управління технічним станом ТМ. В даному випадку можливе відхилення від зазначеної періодичності та перехід на вищий рівень дослідження, що пов'язано з необхідністю уточнення параметрів технічного стану ТМ.

Зазначимо, що порядок отримання діагностичної інформації в досліджуваних ТМ, при збереженні єдиної структури управління технічним станом елементів, може мати відмінності в термінах та повноті проведення пошукових дій.

Реалізуючи запропонований елементно-модульний метод управління технічним станом, можливо спрогнозувати необхідні операції ТО, що в подальшому будуть відображені в послідовності їх реалізації для реальної експлуатації ТМ досліджуваного парку машин підприємства. Враховуючи значення діагностичних даних досліджуваних елементів ТМ та математичні закономірності зміни відповідних діагностичних параметрів здійснюють прогнозування на основі системи диференціальних рівнянь графу зміни станів ТМ [44]. Запропонована система прогнозування технічного контролю та регулювання досліджуваних елементів ТМ наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати прогнозування експлуатаційної надійності технічного стану ТМ на основі реалізації елементно-модульного методу ТО і Р

Двигун АТТ					
Напра- цювання, мото-год	Перелік діагностичних параметрів	Значення діагностичних параметрів		Ймовірність знаходження досліджуваних ТМ, в стані нормальної експлуатації	Пробіг (напрацювання) до проведення контролю та ТО, мото-год
		Граничне	Поточне		
КамАЗ-740					
0...270	Компресія в ЦПГ, МПА	2,5	2,82	0,91	245
	Лужне число робочої моторної оливи, мг/мгКОН	4,0	3,9		
	Вміст механічних домішок в робочій моторній оливі, %	2,2	2,1		
	Діелектрична проникність робочої моторної оливи	3,0	3,25		
	Температура спалаху моторної оливи в закритому тиглі, С°	210	205		

Продовження таблиці 2

John Deere PowerTech 9,0 I Stage II					
0...250	Компресія в ЦПГ, МПА	2,6	3,05	0,92	290
	Лужне число робочої моторної оливи, мг/мгКОН	5,0	7,9		
	Вміст механічних домішок в робочій моторній оливі, %	2,5	2,1		
	Діелектрична проникність робочої моторної оливи	3,4	3,09		
	Температура спалаху моторної оливи в закритому тиглі, С°	190	214		
Трансмсія					
АТТ сімейства КамАЗ					
0...270	Вміст механічних домішок в робочій моторній оливі, %	3,2	1,2	0,92	280
	Діелектрична проникність робочої моторної оливи	3,8	2,5		
	Лужне число оливи, мг/мгКОН	6,0	7,9		
АТТ сімейства John Deere					
0...500	Вміст механічних домішок в робочій моторній оливі, %	3,2	0,8	0,91	460
	Діелектрична проникність робочої моторної оливи	2,7	2,8		
	Лужне число оливи, мг/мгКОН	11,0	10,4		

Аналіз отриманих результатів свідчить, що на основі розробленої на основі запропонованого методу елементно-модульної системи ТО і Р та використання критеріїв статистичної інформативності контрольних діагностичних параметрів вдалося спрогнозувати та отримати дані надійності та пробіги ТМ, які задовольняють рівень надійності на межі 0,9. Значення прогнозних пробігів за діагностичними параметрами технічного стану елементів ТМ, на яких слід проводити контрольні та регулювальні дії досліджуваних елементів ТМ, що працюють у важких умовах експлуатації АПВ, дають змогу проводити уточнення стратегії технічного обслуговування для конкретних модулів парку машин на підприємствах. За даними таблиці можливе коректування інтервалів напрацювання, з урахуванням пробігів контролю і регулювання для силових агрегатів ТМ. В свою чергу зменшується кількість діагностичних простоїв. Відповідно до умов експлуатації для силового агрегату ТМ КамАЗ 740 ТО-2 потрібно зменшити на 9,3 %, щоб забезпечити його експлуатаційну надійність більше рівня 0,9, а обслуговування трансмісії ТМ сімейства КамАЗ можливо збільшити на 3,4 % відповідно. Натомість для елемента ТМ John Deere PowerTech 9,0 I Stage II ТО-2 можна збільшити за напрацюванням на 16,1 %, а трансмісію потрібно обслуговувати раніше на 8%. Дані розрахунки є ефективними для сформованих модулів парку машин підприємства.

Висновки.

1. Розглянуто ступінь відновлення технічного стану елементів транспортних машин за зміною діагностичних параметрів з напрацюванням, а також його граничний стан, граничний ресурс та його закон розподілу за запропонованим методом їх технічного обслуговування і ремонту.
2. Враховуючи діагностичну інформацію, ресурс елементів транспортних машин та модулів парку машин запропоновано функціональну залежність залишкового ресурсу від цих величин, критерій економічної доцільності застосування тих чи інших дій по відновленню технічного стану.
3. Критерій економічної доцільності відновлення стану транспортних машин

запропонованим методом системи технічного сервісу дає можливість оцінити припустиму собівартість виконаної технічної дії, запропонувати критерій її ефективності та раціональне використання ресурсу за відповідними коефіцієнтами.

4. Запропоновано елементно-модульний метод управління системного технічного сервісу транспортних машин та парку машин підприємства. Розроблено алгоритм реалізації методу. Показано, що управління технічним станом елементів транспортних машин і модулів парку машин орієнтовано на оперативний контроль ресурсовизначальних діагностичних параметрів, спеціальні режими адаптації з урахуванням особливостей впливу режимів роботи транспортних машин і зовнішніх умов.

5. Розроблено порядок виконання діагностичних операцій і технічних дій за елементно-модульним методом в системі технічного обслуговування та ремонту. Показано, що реалізацію запропонованого методу управління технічним станом можливо спрогнозувати. Наведено систему прогнозування експлуатаційної надійності технічного стану транспортних машин за такими їх елементами як двигун і трансмісія. Дано рекомендації про коректування технологічних операцій зазначених елементів.

Список літератури

1. Макарова И.В., Хабибуллин Р.Г., Беляев Э.И. Повышение коэффициента технической готовности парка автомобильной техники средствами интеллектуализации транспортной системы. *Фундаментальные исследования*. 2013. № 10-2. С. 282-287.
2. Kurochkin V. N., Nikitchenko S. L., Nesmiyan A. Y., Nazarenk S. A. Reliability of technological systems: structure and modeling. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Production 27-28 August 2020, Rostov Region. 2021. Vol. 659, No. 1. P. 012-009.
3. Gollin, D., Rogerson, R. Productivity, transport costs and subsistence agriculture. *Journal of Development Economics*. 2014. №107. 38-48.
4. Patel K. K., Schot J. Twisted paths to European integration: comparing agriculture and transport policies in a transnational perspective. *Contemporary European History*. 2011. 20(4). P. 383-403.
5. Sroka Z. J. Some aspects of thermal load and operating indexes after downsizing for internal combustion engine. *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 2012. № 110(1). P. 51-58.
6. Аналитические исследования эксплуатации автотранспортных средств: монография / Г.Н. Груздов та інші. М.: РУСАЙНС, 2015. 144с.
7. Антонюк О. П. Покращення процесу забезпечення запасними частинами рухомого складу автотранспортного підприємства: дис... канд. техн. наук: 05.22.20 / Вінниц. нац. техн. ун-т. Вінниця. 2021. 174 с.
8. Repin S., Evtiulov S., Rajczyk J. Optimizing the service life of plant machinery and vehicles using information system for management of engineering status. *Architecture and Engineering*. 2016. Vol. 1(2). P. 53-57.
9. Колобов К. С. Удосконалення способу експрес-діагностування технічного стану транспортних дизелів: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / Держ. підпр. "Держ. автотрансп. наук.-досл. та проект. ін-т". Київ, 2019. 186 с.
10. Повышение готовности к использованию по назначению мобильной сельскохозяйственной техники совершенствованием системы диагностирования / Н.В. Бышов, С.Н. Бoryчев, И.А. Успенский и др. Рязань: РГАТУ, 2013. 172 с.
11. Daniyarovich B. D. Creation and organization of a system of branded technical service for agricultural machines. international journal of discourse on innovation, integration and education. *International journal of discourse on innovation, integration and education*. Karshi. Karshi branch of the Tashkent institute of irrigation and agricultural mechanization engineers. 2020. Vol. 1. №4. С. 120-124.
12. Голубев И.Г., Фадеев А.Ю., Макуев В.А. Оценка качества технического сервиса тракторов. *Техника и оборудование для села*. 2010. №7. С. 40-41.
13. Голубев И.Г. Организация сервисного обслуживания сельскохозяйственной техники зарубежными фирмами на российском рынке. *Техника и оборудование для села*. 2013. №6. С. 36 -38.
14. Дидманидзе О.Н., Варнаков Д.В. Прогнозирование параметрической надежности двигателей автотранспортных средств в нормальном и специальном эксплуатационных режимах. *Международный технико-экономический журнал*. 2013. №3. С. 94-98.

15. Rybacki P. The research of the quality of agricultural machines technical service by servqual method. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 2011. Vol. 56, № 2. P. 122-143.
16. Успенский И.А., Безруков Д.В., Николотов И.Н. Роль диагностирования тормозных систем в повышении безопасности движения и эффективности технической эксплуатации. *Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей*. XII Международная научно-практическая конференция. Владимир: ВГТУ, 2010. С. 329–331.
17. Osuch A., Osuch E., Rybacki P., Przygodziński P., Kozłowski R., Przybylak A. A decision support method for choosing an agricultural machinery service workshop based on fuzzy logic. *Agriculture*. 2020. Vol. 10(3). P. 76-84.
18. Диагностика технических устройств / Г. А. Бигус, Ю. Ф. Даниев, Н. А. Быстрова, Д. И. Галкин М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 615с.
19. Filipczyk J., Madej H. The application of on-board diagnostics systems for assessing the technical state of automotive vehicles. *Journal of KONES*. 2010. Vol. 17, P. 99-104.
20. Салмин В.В. Обоснование эвристического метода оценки элементов системы ВАДС. *Транспорт Урала*. 2011. №4. С. 12–16.
21. Dalla Vedova, M. D., Berri, P. C. Optimization techniques for prognostics of on-board electromechanical servomechanisms affected by progressive faults. *International Review of Aerospace Engineering* (I. RE. AS. E). India. Indian Institute of Technology Kanpur. 2019. Vol. 12(4). P 160-170.
22. Voronov V. S., Rouban A. I. Identification of models using analog sensitivity functions. *In Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1679. No. 3. P. 032-045.
23. Вдосконалення методики формування потужності зони поточного ремонту автомобілів. / Цимбал С. В., Біліченко В. В., Крещенецький В. Л. та ін. *Наукові нотатки*. 2018. Вип. 62. С. 44-47.
24. Дубінін Є. О., Клец Д. М., Холодов А. П., Слинченко, І. В. Мобільний реєстраційно-вимірювальний комплекс для оцінювання та підвищення експлуатаційних властивостей колісних машин. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. Вип. 2(88). 2020. С. 56-60.
25. Ermakova O. V., Kaloshina M. N., Dianova E. V. Management of innovative projects over the life cycle of distributed aviation systems. *Russian Engineering Research*. 2019. Vol. 39(5), P. 439-442.
26. Кореневский Н. А., Разумова К. В. Синтез коллективов гибридных нечетких моделей оценки состояния сложных систем. *Наукоемкие технологии*. 2014. Вип. 15(12). P. 31-39.
27. Афанасьева Т.В. Моделирование нечётких тенденций временных рядов : монография. Ульяновск: Изд-во УлГТУ. 2013. 214 с.
28. Ярушев С.А., Аверкин А.Н., Павлов В.Ю. Когнитивные гибридные системы поддержки принятия решений и прогнозирования. *Программные продукты и системы*. 2017. Вип. 30(4). С. 57-68.
29. Воронина В.В., Мухаметзянов А.Д., Балдина Ю.С. Разработка web-сервиса для работы с программируемыми логическими интегральными схемами. *Automation of control Proce.* 2015. №3(41). С.98-105.
30. Глущенко А. А., Зейнетдинов Р. А., Вайчик, И. С. Диагностирование двигателя по содержанию продуктов износа в картерном масле. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2015. Вип. 41. С. 48-51.
31. Gopal K., Prakash R. Building the business case for telematics based diagnostics at Mahindra Reva. *World electric vehicle journal*. 2012. Vol. 5(3). P. 722-729.
32. Песковацков Д. Н. К вопросу технического обслуживания тракторов в сельском хозяйстве за рубежом. *Наука без границ*. 2018. Вип. 10, № 27. С. 69-73.
33. Малыха Е.Ф., Катаев Ю.В., Вялых Д.Г. Дилерская форма организации технического сервиса машин. *Наука без границ*. 2018. Вип 5, № 22. С. 73-78.
34. Filipczyk J., Madej H. The application of on-board diagnostics systems for assessing the technical state of automotive vehicles. *Journal of KONES*. 2010. Vol. 17. P. 99-104.
35. Шило И. Н., Миклуш В. П., Лабушев Н. А. Концепция модернизации инженерно-технической системы АПК Республики Беларусь. *Труды ГОСНИТИ*. 2014. Вип. 117. С. 18-23.
36. Erokhin M., Pastukhov A. G., Kazantsev S. P. Operability assessment of drive shafts of John Deere tractors in operational parameters. *Engineering for Rural Development*. 2019. Vol. 17. P. 28-33.
37. Казакова В., Шинкевич В., Дунаев А. Перспектива совершенствования технического обслуживания сельскохозяйственной техники. *Инновации в сельском хозяйстве*. 2019. Вип. 3. С. 218-224.
38. Loor-Sácido O.A., Cevallos-Mera R.X., Shkiliova L. Diagnosis of agricultural mechanization in faour communities in Manabí Province, Ecuador. *Revista ciencias técnicas agropecuarias*. 2019. Vol. 28, № 1. P.28-39.
39. Krzaczek P., Piekarski P. Utilization of vehicle control-diagnostic system in evaluation of energetic

- parameters. *Zeszyty naukowe politechniki rzeszowskiej. Mechanika*. 2010. Vol. 81. № 277. С. 7-14.
40. Hrushets'kii S.N., Didur V.V. The problems of technical servicing and providing machinery reliability for AIC. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. 2015. Вип. 3. С.154-160.
41. Siegel J., Bhattacharyya R., Deshpande A., Sarma S. Vehicular engine oil service life characterization using on-board diagnostic (OBD) sensor data. In *SENSORS*. 2014 IEEE. 2-5 Nov. 2014. Valencia, Spain. P. 1722-1725.
42. Olszowski S., Marczak M. Diagnostics of new generation diesel engines. *Diagnostyka*. 2008. Vol. 48. P. 83-88.
43. Аулін В.В., Гриньків А.В. Связь информационной энтропии с показателями надежности агрегатов и транспортных средств. Материалы X межд. научно-техн. конф. "Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств: Эксплуатация и развитие автомобильного транспорта". Пенза: ПГУАС. 2015. С.39-44.
44. Аулін В.В., Жулай О.Ю., Лівіцький О.М. Транспортні засоби в агропромисловому комплексі та система діагностичного моніторингу їх технічного стану. *Конструювання, виробництво та експлуатація с/г машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2007. Вип. 37. С. 146-154.

References

1. Makarova I.V., Habibullin R.G. & Belyaev E.I. (2013). Povyishenie koeffitsienta tehnikeskoy gotovnosti parka avtomobilnoy tehniki sredstvami intellektualizatsii transportnoy sistemyi [Increasing the coefficient of technical readiness of the fleet of automotive vehicles by means of intellectualization of the transport system]. *Fundamentalnyie issledovaniya - Basic research*, №10-2. S.282-287 [in Russian].
2. Kurochkin, V.N., Nikitchenko, S.L., Nesmian, A.Y. & Nazarenk, S.A. (2021). Reliability of technological systems: structure and modeling. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Production 27-28 August 2020, Rostov Region*, Vol. 659, No. 1. P. 012-009 [in English].
3. Gollin, D. & Rogerson, R. (2014). Productivity, transport costs and subsistence agriculture. *Journal of Development Economics*, 107, 38-48 [in English].
4. Patel, K.K. & Schot, J. (2011). Twisted paths to European integration: comparing agriculture and transport policies in a transnational perspective. *Contemporary European History*. 20(4). P. 383-403 [in English].
5. Sroka, Z. J. (2012). Some aspects of thermal load and operating indexes after downsizing for internal combustion engine. *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 110(1). P. 51-58 [in English].
6. Gruzlov, G.N. et al. (2015). *Analiticheskie issledovaniya ekspluatatsii avtotransportnykh sredstv: monografiya [Analytical studies of the operation of vehicles: monograph]*. Moskva: RUSAYNS [in Russian].
7. Antoniuk, O.P. (2021) Pokrashchennia protsesu zabezpechennia zapasnykh chastynamy rukhomoho skladu avtotransportnoho pidpriemstva [Improvement of the process of supplying spare parts of a crumbly warehouse of motor transport enterprises]: *Candidate's thesis*. Vinnytsia [in Ukrainian].
8. Repin, S., Evtulov, S. & Rajczyk, J. (2016). Optimizing the service life of plant machinery and vehicles using information system for management of engineering status. *Architecture and Engineering*. Vol. 1(2). P. 53-57 [in English].
9. Kolobov, K.S. (2019). Udoskonalennia sposobu ekspres-diahnostuvannia tekhnichnoho stanu transportnykh dyzeliv [Improving the method of rapid diagnosis of the technical condition of transport diesels]. *Candidate's thesis*. Derzh. avtotransp. nauk.-dosl. ta proekt. in-t" [in Ukrainian].
10. Byshov N.V., Borychev S.N., Uspensky I.A. et al. (2013). Povyishenie gotovnosti k ispolzovaniyu po naznacheniyu mobilnoy selskohozyaystvennoy tehniki sovershenstvovaniem sistemyi diagnostirovaniya [Improving the readiness for the intended use of mobile agricultural machinery by improving the diagnostic system. *Ryazan: RGATU - Ryazan: RGATU* [in Russian].
11. Daniyarovich, B.D. (2020). Creation and organization of a system of branded technical service for agricultural machines. international journal of discourse on innovation, integration and education. *International journal of discourse on innovation, integration and education*. Karshi. Karshi branch of the Tashkent institute of irrigation and agricultural mechanization engineers. Vol. 1. №4. 120-124 [in English].
12. Golubev, I.G., Fadeev, A.Yu. & Makuev, V.A. (2010). Otsenka kachestva tehnikeskogo servisa traktorov [Evaluation of the quality of technical service of tractors]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela - Machinery and equipment for the village*, 7, 40-41 [in Russian].
13. Golubev, I.G. (2013). Organizatsiya servisnogo obsluzhivaniya selskohozyaystvennoy tehniki zarubezhnyimi firmami na rossiyskom rynke [Organization of service maintenance of agricultural

- machinery by foreign firms in the Russian market]. *Tehnika i oborudovanie dlya sela - Machinery and equipment for the village*, 6, 36 -38 [in Russian].
14. Didmanidze, O.N. & Varnakov, D.V. (2013). Prognozirovaniye parametricheskoy nadezhnosti dvigateley avtotransportnykh sredstv v normalnom i spetsialnom ekspluatatsionnykh rezhimakh [Predicting the parametric reliability of motor vehicle engines in normal and special operating conditions]. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskyy zhurnal - International technical and economic journal*, 3, 94-98 [in Russian].
 15. Rybacki, P. (2011). The research of the quality of agricultural machines technical service by servqual method. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, Vol. 56, № 2. P. 122-143 [in English].
 16. Uspenskiy, I.A., Bezrukov, D.V. & Nikolotov, I.N. (2010). Rol diagnostirovaniya tormoznykh sistem v povyshenii bezopasnosti dvizheniya i effektivnosti tekhnicheskoy ekspluatatsii [The role of diagnosing brake systems in improving traffic safety and the efficiency of technical operation]. *Fundamentalnyye i prikladnyye problemy sovershenstvovaniya porshnevnykh dvigateley - Fundamental and applied problems of improving piston engines*. XII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Vladimir: VGTU. 2010. S. 329-331 [in Russian].
 17. Osuch, A., Osuch, E., Rybacki, P., Przygodziński, P., Kozłowski, R. & Przybylak, A. (2020). A decision support method for choosing an agricultural machinery service workshop based on fuzzy logic. *Agriculture*, Vol. 10(3). P. 76-84 [in English].
 18. Bigus, G.A., Daniev, Yu.F., Byistrova, N.A. & Galkin, D.I. (2014). *Diagnostika tekhnicheskikh ustroystv [Diagnostics of technical devices]*. Moskva: Izd-vo MG TU im. N.E. Bauman [in Russian].
 19. Filipczyk, J. & Madej, H. (2010). The application of on-board diagnostics systems for assessing the technical state of automotive vehicles. *Journal of KONES*, Vol. 17. P. 99-104 [in English].
 20. Salmin, V.V. (2011). Obosnovaniye evristicheskogo metoda otsenki elementov sistemy VADS [Substantiation of the heuristic method for evaluating the elements of the VADS system]. *Transport Urala - Ural transport*, 4, 12-16 [in Russian].
 21. Dalla Vedova, M.D. & Berri, P. C. (2019). Optimization techniques for prognostics of on-board electromechanical servomechanisms affected by progressive faults. *International Review of Aerospace Engineering (I. RE. AS. E)*. India. Indian Institute of Technology Kanpur. Vol. 12(4). P. 160-170 [in English].
 22. Voronov, V.S. & Rouban, A.I. (2020). Identification of models using analog sensitivity functions. *In Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1679. No. 3. P. 032-045 [in English].
 23. Tsybmal, S. V., Bilichenko, V. V., Kreshchenetskiy, V. L. et al. (2018). Vdoskonalennia metodyky formuvannia potuzhnosti zony potочноho remontu avtomobiliv [Improving the method of forming the capacity of the current repair zone of cars]. *Naukovi notatky - Scientific notes*, Vol. 62, 44-47 [in Ukrainian].
 24. Dubinin, Ye.O., Klets, D.M., Kholodov, A.P. & Slynchenko, I.V. (2020). Mobilnyi reiestratsiino-vymiriuvalniy kompleks dlia otsiniuvannia ta pidvyshchennia ekspluatatsiinykh vlastyvostei kolisnykh mashyn [Mobile registration and measuring system for evaluating and improving the performance of wheeled vehicles]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu - Bulletin of Kharkiv National Automobile and Road University*, Vol. 2(88), 56-60 [in Ukrainian].
 25. Ermakova, O.V., Kaloshina, M.N. & Dianova, E.V. (2019). Management of innovative projects over the life cycle of distributed aviation systems. *Russian Engineering Research*. Vol. 39(5). P. 439-442 [in English].
 26. Korenevskiy, N.A. & Razumova, K.V. (2014). Sintez kollektivov gibridnykh nechetkikh modeley otsenki sostoyaniya slozhnykh sistem [Synthesis of collectives of hybrid fuzzy models for assessing the state of complex systems]. *Naukoemkie tekhnologii - Science-intensive technologies*, Vol. 15(12), 31-39 [in Russian].
 27. Afanaseva, T.V. (2013). *Modelirovaniye nechetkikh tendentsiy vremennykh ryadov [Modeling fuzzy trends in time series Monograph]*. Ulyanovsk: Izd-vo UIGTU [in Russian].
 28. Yarushev, S.A., Averkin, A.N. & Pavlov, V.Yu. (2017). Kognitivnyye gibridnyye sistemy podderzhki prinyatiya resheniy i prognozirovaniya [Cognitive hybrid decision support and forecasting systems]. *Programmnyye produkty i sistemy - Software products and systems*, Vol. 30(4), 57-68 [in Russian].
 29. Voronina, V.V., Muhametzyanov, A.D. & Baldina, Yu.S. (2015). Razrabotka web-servisa dlya raboty s programmiruemymi logicheskimi integralnymi shemami [Development of a web service for working with programmable logic integrated circuits]. *Automation of control Process - Automation of control Process*, 3(41), 98-105 [in Russian].
 30. Gluschenko, A.A., Zeynetdinov, R.A., Vaychik & I.S. (2015). Diagnostirovaniye dvigatelya po sodержaniyu produktov iznosa v karternom masle [Engine diagnostics by the content of wear products in

- crankcase oil]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta - Proceedings of the St. Petersburg State Agrarian University*, Vol. 41, 48-51 [in Russian].
31. Gopal, K. & Prakash, R. (2012). Building the business case for telematics based diagnostics at Mahindra Reva. *World electric vehicle journal*. Vol. 5(3). P. 722-729 [in English].
 32. Peskovatskov, D.N. (2018). K voprosu tehnikeskogo obsluzhivaniya traktorov v selskom hozyaystve za rubezhom [On the issue of maintenance of tractors in agriculture abroad]. *Nauka bez granits - Science without borders*, Vol. 10, № 27, 69-73 [in Russian].
 33. Malyiha, E.F., Kataev, Yu.V. & Vyalyih, D.G. (2018). Dilerskaya forma organizatsii tehnieskogo servisa mashin [Dealer form of organization of technical service of machines]. *Nauka bez granits - Science without borders*, Vol 5, 22, 73-78[in Russian].
 34. Filipczyk, J. & Madej, H. (2010). The application of on-board diagnostics systems for assessing the technical state of automotive vehicles. *Journal of KONES*. Vol. 17. P. 99-104 [in English].
 35. Shilo, I.N., Miklush, V.P. & Labushev, N.A. (2014). Kontseptsiya modernizatsii inzhenerno-tehnicheskoy sistemyi APK Respubliki Belarus [The concept of modernization of the engineering and technical system of the agro-industrial complex of the Republic of Belarus]. *Trudy GOSNITI - Proceedings of GOSNITI*, Vol. 117, 18-23 [in Russian].
 36. Erokhin, M., Pastukhov, A.G. & Kazantsev, S.P. (2019). Operability assessment of drive shafts of John Deere tractors in operational parameters. *Engineering for Rural Development*. Vol. 17. P. 28-33 [in English].
 37. Kazakova, V., Shinkevich, V. & Dunaev, A. (2019). Perspektiva sovershenstvovaniya tehnikeskogo obsluzhivaniya selskohozyaystvennoy tehniki [Prospects for improving the maintenance of agricultural machinery]. *Innovatsii v selskom hozyaystve - Innovations in agriculture*, Vol. 3, 218-224 [in Russian].
 38. Loo-Sácido, O.A., Cevallos-Mera, R.X. & Shkiliova, L. (2019). Diagnosis of agricultural mechanization in faour communities in Manabí Province, Ecuador. *Revista ciencias técnicas agropecuarias*. Vol. 28, 1. P.28-39 [in English].
 39. Krzaczek, P., Piekarski, P. (2010). Utilization of vehicle control-diagnostic system in evaluation of energetic parameters. *Zeszyty naukowe politechniki rzeszowskiej. Mechanika*. Vol. 81, 277. 7-14 [in English].
 40. Hrushets'kii, S.N. & Didur, V.V. (2015). The problems of technical servicing and providing machinery reliability for AIC. *Bulletin of the Ukrainian Branch of the International Academy of Agrarian Education*. Vol. 3, 154-160 [in English].
 41. Siegel, J., Bhattacharyya, R., Deshpande, A. & Sarma, S. (2014). Vehicular engine oil service life characterization using on-board diagnostic (OBD) sensor data. In *SENSORS*, IEEE. 2-5 Nov. 2014. Valencia, Spain. P. 1722-1725 [in English].
 42. Olszowski, S., Marczak, M. (2008). Diagnostics of new generation diesel engines. *Diagnostyka*. Vol. 48. P. 83-88 [in English].
 43. Aulin, V.V. & Grinkiv, A.V. (2015). Svyaz informatsionnoy entropii s pokazatelyami nadezhnosti agregatov i transportnykh sredstv [Communication of information entropy with indicators of reliability of units and vehicles]. *Materialy X mezhd. nauchno-tehn. konf. "Problemyi kachestva i ekspluatatsii avtotransportnykh sredstv: Ekspluatatsiya i razvitie avtomobilnogo transporta" - Materials X int. scientific and technical conf. "Problems of quality and operation of motor vehicles: Operation and development of motor transport"*. Penza: PGUAS. 2015. S.39-44 [in Russian].
 44. Aulin, V.V., Zhulai, O.Iu. & Livitskyi, O.M. (2007). Transportni zasoby v ahropromyslovomu kompleksi ta systema diahnostychnoho monitorynhu yikh tekhnichnoho stanu [Vehicles in the agro-industrial complex and the system of diagnostic monitoring of their technical condition]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia s/h mashyn. Zahalnodержавnyi mizhvidomchyi naukovy-tekhnichnyi zbirnyk - Design, manufacture and operation of agricultural machinery. National interdepartmental scientific and technical collection*, Vol. 37, 146-154 [in Ukrainian].

Andrey Hrinkiv, Senior Researcher, PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Element-modular Method of the System of Technical Service of Transport Machines

The paper proposes that the element-modular method of the system of technical service of transport machines is based on the characteristic intervals of change of diagnostic parameters that determine the technical condition of their components, systems and units as elements. Theoretically substantiated changes in diagnostic parameters taking into account the degree of restoration of the technical condition of systems and units for technical service operations. The maximum resource of elements of the transport machine and the law of distribution of this indicator are considered. From the economic point of view the expediency of restoration of a technical condition of elements of transport cars by the offered system of technical service is proved. The

criterion of economic expediency of application of technical actions on restoration of a technical condition of transport cars is offered. It is shown that according to this criterion it is possible to estimate the cost of technical actions to improve the technical condition of the transport vehicle and the fleet as a whole. The criterion of efficiency of technical action on improvement of a technical condition of an element of transport cars and a factor of rational use of a resource with possible situations is offered also.

An algorithm for controlling the system of technical service of transport machines by the element-modular method has been developed. The results of forecasting technical control and regulation of the studied elements of transport vehicles: engine and transmission are considered.

It is shown that the proposed element-modular method of technical service makes it possible to adjust certain technical operations to ensure and restore the appropriate level of operational reliability of transport vehicles.

element-modular method, technical service, transport machine, diagnostic parameter, technical condition

Одержано (Received) 11.02.2022

Прорецензовано (Reviewed) 02.03.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

УДК 629.3.014

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.278-289](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.278-289)

С.В. Лисенко, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: sv07091976@gmail.com

Системно-спрямований підхід підвищення експлуатаційної надійності транспортних машин на етапах їх життєвого циклу

В роботі на основі системно-спрямованого підходу визначено, як на етапах життєвого циклу транспортних машин, що працюють у відкритих кар'єрах та в умовах агропромислового виробництва, підвищити рівень їх експлуатаційної надійності. На етапі пуску силових агрегатів запропоновано спосіб зменшення зносу спряжень деталей. Розроблено схему реалізацію способу. Визначено, що ефективно цей спосіб застосувати при експлуатації транспортних машин в жорстких нестаціонарних умовах та режимах "пуск-зупинка". Експериментально доведено, що запропонований спосіб дає можливість економити до 15% експлуатаційні матеріали та збільшувати термін заміни моторної оливи. На етапі експлуатації транспортних машин у відкритому кар'єрі і умовах агропромислового виробництва дослідженнями доведено подовження використання моторної та трансмісійної оливи на 25...40%, виявлено зменшення кількості технічних обслуговувань та необхідність коректування термінів технічних обслуговувань транспортних машин.

експлуатаційна надійність, транспортна машина, системно-спрямований підхід, силовий агрегат, моторна олива, трансмісійна олива, нестаціонарні умови, термін заміни, композиційна присадка

Постановка проблеми. Існуючі способи підвищення ресурсу вузлів, систем і агрегатів транспортних машин (ТМ) включають використання різноманітних мастил [1], накладання фізичних полів (механічного навантаження, накладання стаціонарних та динамічних електричних та магнітних полів) на трибоспряження деталей і фізико-хімічна активація мастильного середовища. Всі способи і необхідне обладнання для їх реалізації забезпечують високий рівень експлуатаційної надійності ТМ. Разом з тим жорсткі, нестаціонарні умови, підвищення навантажувально-швидкісних режимів роботи ТМ вимагають як подальшого удосконалення їх конструкції, так і методів технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При виготовленні та ремонті вузлів, систем та агрегатів ТМ використовують різні методи формування спряжених ексцентричних поверхонь деталей з використанням присадок і добавок з поверхнево-активними речовинами (ПАР), пластичної деформації поверхневих шарів, методів підбору режимів і тривалості обкатки з вирівнюванням навантаження на диференціально-розподільчих робочих поверхнях, формуванням на них оптимальної шорсткості, реалізація умов мінімального припрацювального зносу [2]. Припрацювальні процеси можливо здійснювати використанням порошку каоліну, гідрооксидів і органічних сполук алюмінію, високодисперсних алмазів, сполук хрому, кремнію та ін. При обкатці агрегатів ТМ використовуються обкаточні оливи з металоорганічними ПАР, металоплакуючі оливи з додаванням жирних кислот м'яких металів [3].

При реалізації обкаточної триботехнології, крім традиційних мінералів [4], особливо ефективні нанокерамічні припрацювальні препарати Вальтера Вагнера [5] та ін. Зазначене свідчить, що окремими прикладами триботехнологій при підвищенні довговічності вузлів, систем і агрегатів не можливо розв'язати цілісну проблему підвищення експлуатаційної надійності [6]. Необхідна комплексна регламентація застосування заходів та технологій триботехніки на усіх етапах життєвого циклу ТМ, що визначають виготовлення вузлів, систем і агрегатів, закінчення експлуатаційної обкатки, проявом номінальних та граничних значень ресурсних параметрів [7]. Це вимагає включення в технічну експлуатацію ТМ через науково-технічну документацію додатково триботехнології: експлуатаційної обкатки; профілактичного зношування; ремонтно-відновлювану; обкаточно-профілактичну з додаванням відповідних трибопараметрів [8].

В процесі експлуатації профілактичні препарати швидко модифікують робочі поверхні деталей на певну глибину й формують полімерні, або вуглецеві алмазоподібні, аморфні вуглецеві або комплексні плівки з металами і вуглецеводневими сполуками та мінералами, або утворюють з металом галогеніди (фториди, хлориди, іодиди). Ремонтно-відновлювальні трибопрепарати, в експлуатації утворюють на поверхнях тертя деталей антифрикційні антизносні плівки тривалої дії [9]. Вони осаждаються з мастильного середовища завдяки прояву явищ фізичної і хімічної адсорбції, трибополімеризації, електричного осадження, активації іонно-обмінних процесів між спряженими поверхнями тертя і мастильним середовищем з препаратами, утворення полімерної плівки завдяки каталітичних процесів [10].

Постановка завдання. Метою даної роботи є використання системно-спрямованого підходу для підвищення експлуатаційної надійності на визначених етапах життєвого циклу ТМ реалізацією триботехнологій припрацювання та відновлення.

Виклад основного матеріалу. Виходячи з теоретичних та експериментальних досліджень використання композиційної присадки на основі геомодифікатор КГМТ-1 [9] обґрунтовано, що ТМ протягом терміну свого існування експлуатується в різних умовах і режимах. Знаючи реальний термін заміни моторної оливи, управляти термінами технічного обслуговування (ТО) та визначати ймовірність знаходження машин у працездатному стані і необхідності проведення технічних дій. Особливо це є необхідним при використанні ТМ в умовах жорсткої нестаціонарної експлуатації [4].

Результати проведених досліджень дали можливість сформулювати ряд узагальнених рекомендацій, щоб продовжити довговічність систем і агрегатів ТМ:

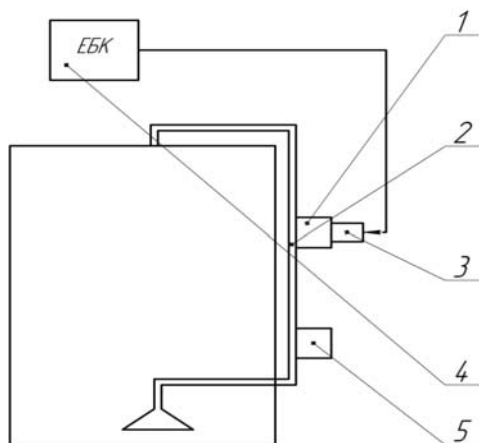
– при визначенні терміну використання моторної та трансмісійної оливи та ТО ТМ, слід враховувати умови і режими їх експлуатації;

– на етапі припрацювання, краще зробити обкатку дизелів ТМ, що працюють в нестационарних умовах і режимах, композиційною присадкою на основі геомодифікатора КГМТ-1;

– при модифікуванні оливи силових агрегатів ТМ композиційною присадкою на основі геомодифікатора КГМТ-1 можна виконувати її заміну з періодичністю 275...350 мото-год.;

– модифікування моторної і трансмісійної оливи запропонованою композиційною присадкою істотно зменшує концентрацію шкідливих хімічних елементів у продуктах зносу.

Запропоновано спосіб зменшення зносу трибоспрямих деталей силових агрегатів під час пуску, який полягає в наступному: у системі змащення додатково створюється тиск перед початком пуску двигуна. Схема цього способу наведена на рис.1.



1 – додатковий насос; 2 – система мащення; 3 – електропривод;
4 – електронний блок керування (ЕБК); 5 – оливний насос

Рисунок 1 – Схема способу зменшення зносу спряжень деталей силових агрегатів ТМ під час їх пуску (патент України №74656)

Джерело: розроблено автором

Спосіб реалізується наступним чином: додатковий насос (1) створює тиск в системі мащення (2) перед початком пуску двигуна. Додатковий насос (1) вмикається і керується електроприводом (3), на який подає команду ЕБК (4) і який вмикається після того, як починає працювати оливний насос (5) системи мащення. При цьому спряження деталей дизеля ТМ будуть завжди розділені плівкою оливи.

Зазначеним способом можливо зменшення зносу спряжень деталей силових агрегатів ТМ завдяки додатковому насосу, який створює тиск в системі змащення перед початком пуску дизеля. Спосіб ефективно працює в режимі роботи "пуск-зупинка", завдяки якому знос спряжень деталей значно зменшується. Експлуатація ТМ в режимі роботи "пуск-зупинка" дає можливість економити паливно-мастильні матеріали до 15% та збільшувати термін заміни моторної оливи.

В процесі стендових випробувань визначали зовнішню швидкісну характеристику двигунів серії ЯМЗ і COMATSU ТМ. Дослідження проводили на стенді КИ-1363В кафедри "Експлуатації та ремонту машин" Центральноукраїнського національного технічного університету (рис. 2).



Рисунок 2 – Загальний вид обкаточно-гальмівного стенду КИ-1363В

Джерело: розроблено автором

Обкаточно-гальмівний стенд має наступні технічні характеристики: діапазон тиску оливи – до 1,0 МПа; температура охолоджуючої рідини – 293...383 К; частота обертання колінчастого вала – 1000...3250 об/хв. і вимірювання здійснюється цифровим тахометром та контролюється цифровим індикатором; максимальний навантажувальний момент – до 1850 Н·м; та ін. Стенд дозволяє проводити припрацювання і випробування дизелів в режимах: в холодному, в гарячому без навантаження, в гарячому з навантаженням.

Стендові випробування на свіжій моторній оливі М-10Г₂к здійснювали відповідно до режимів, наведених в технічних вимогах для дизелів ЯМЗ-240, а модифікованій присадками Roil Gold і КГМТ-1 – в режимах роботи кар'єрних автосамоскидів та ТМ у агропромисловому виробництві (АПВ).

Тривалість стендових випробувань становила 150 годин. В процесі випробувань задавали максимальну потужність дизеля, вимірювали частоту обертання колінчастого вала ω_i та обчислювали такі характеристики як потужність, крутний момент і питому витрату палива за формулами:

– потужність N , кВт:

$$N(\omega_i) = N_{\max} \cdot \left(\frac{\omega_i}{\omega_{\max}} \right) \cdot \left[a + b \cdot \left(\frac{\omega_i}{\omega_{\max}} \right) - \left(\frac{\omega_i}{\omega_{\max}} \right)^2 \right] \cdot 1000, \quad (1)$$

де ω_i – швидкість обертання колінчастого вала, об/хв.;

$\omega_{\max}$ – максимальна швидкість обертання колінчастого вала, об/хв.;

$N_{\max}$ – максимальна потужність дизеля, кВт; a , b – емпіричні коефіцієнти;

– крутний момент M_k , Н·м:

$$M_k(\omega_i) = 1000 \cdot \frac{N(\omega_i)}{\omega_i}, \quad (2)$$

де $N(\omega_i)$ – функція зміни потужності дизеля;

– питома витрата палива $g(\omega_i)$, г/кВт·год, визначалась з формулою:

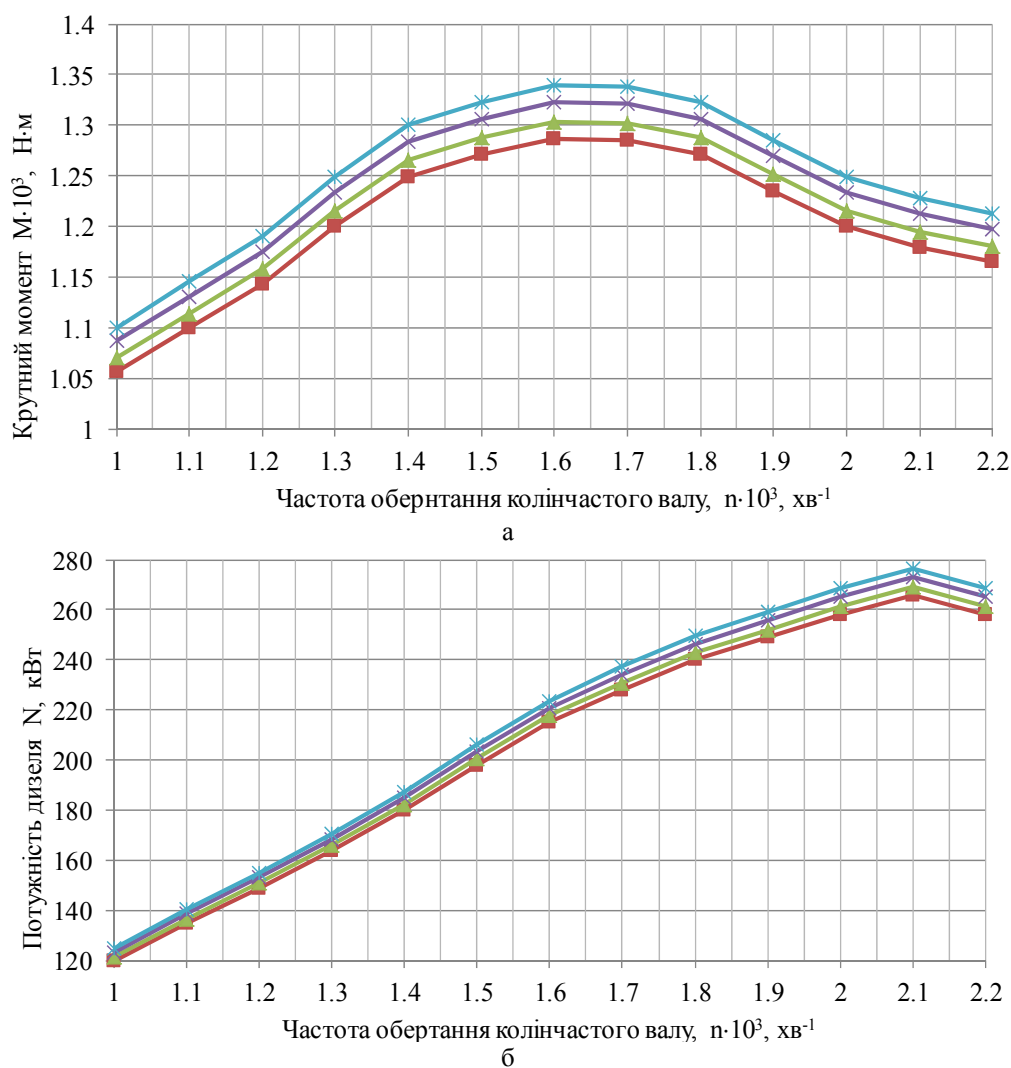
$$g(\omega_i) = g_n \cdot \left(a - b \cdot \left(\frac{\omega_i}{\omega_{\max}} \right) + c \cdot \left(\frac{\omega_i}{\omega_{\max}} \right)^2 \right), \quad (3)$$

де g_n – максимальна питома витрата палива, г/кВт·год; a , b , c – емпіричні коефіцієнти.

При стендових випробовуваннях була використана вимірювальна апаратура: тахометри для вимірювання частоти обертання колінчатого валу (ГОСТ 13082-71); ваги для визначення витрат палива і оливи; манометри для вимірювання тиску у системі мащення, живлення і охолодження (ГОСТ 9933-81); психрометри для визначення вологості повітря (ГОСТ 6353-82); механічний секундомір для визначення тривалості прокручування колінчатого валу в момент пуску двигуна – тривалості витрат контрольних доз рідини і повітря (ГОСТ 5072-72).

При стендових випробуваннях параметри двигунів реєструвалися згідно ГОСТ 18509-88. Відбір проб проводили по ГОСТ 2517-85. Досліджували також фізико-хімічні показники та властивості робочих олив як модифікованих, так і немодифікованих присадками.

Залежності крутного моменту, потужності та питомої витрати палива від частоти обертання колінчастого валу силових агрегатів ТМ при роботі на свіжій та модифікованій присадками НИОД-5, Roil Gold і КГМТ-1 моторній оливі (рис.3).



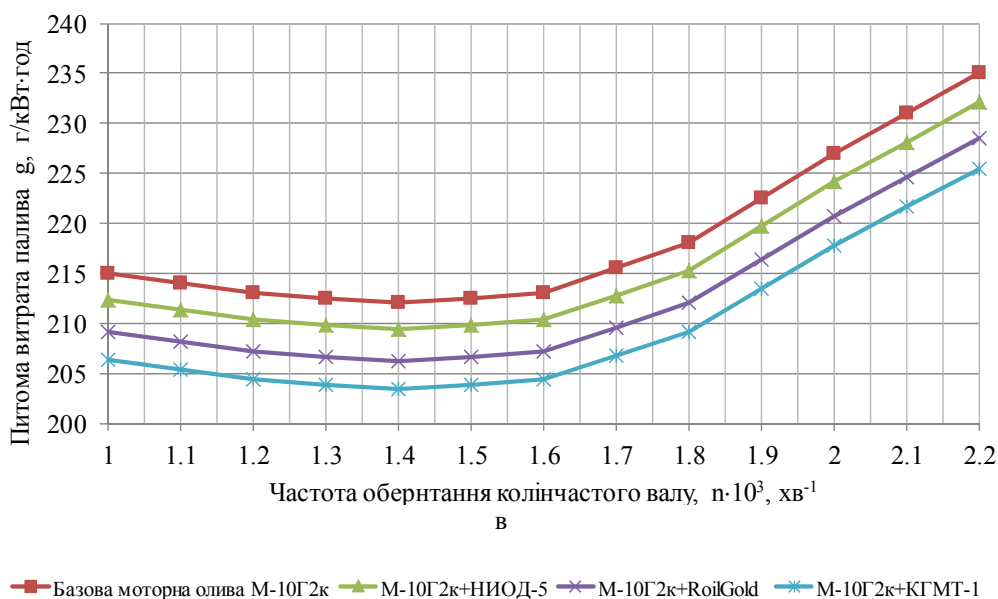


Рисунок 3 – Результат стендових випробувань ЯМЗ-240 ТМ АПВ зі свіжою моторною оливою М-10Г₂к та оливою, модифікованою присадками НИОД-5, RoilGold і КГМТ-1: а – крутний момент; б – потужність; в – питома витрата палива

Джерело: розроблено автором

Виявлено, що додавання композиційної присадки в моторну оливу забезпечило стійке підвищення потужності дизеля в усьому діапазоні швидкісного режиму (частоти обертання колінчастого валу). Потужність дизеля при роботі на оливі М-10Г₂к+НИОД-5 збільшилась на 1,1...1,3 %; на оливі М-10Г₂к+RoilGold – на 2,5...2,9%; на оливі М-10Г₂к + КГМТ-1 – на 3,9...4,2%. Збільшення крутного моменту для оливи М-10Г₂к+НИОД-5 склало на 1,2...1,4 %; для оливи М-10Г₂к+RoilGold – на 2,6...3,0%; для оливи М-10Г₂к + КГМТ-1 – на 3,9...4,3%. Найбільший приріст крутного моменту отримано в режимі максимальної частоти обертання колінчастого валу дизеля.

Зменшення питомої витрати палива від додавання присадок у оливу склало: М-10Г₂к+НИОД-5 – на 1,24...1,26 %; М-10Г₂к+RoilGold – на 2,73...2,77%; М-10Г₂к + КГМТ-1 – на 3,95...4,15%.

Аналіз отриманих даних показав, що підвищення потужності обумовлене зниженням витрат на подолання сили тертя та процесів припрацювання при пуску дизелів автомобілів, які працюють в нестаціонарних умовах експлуатації при додаванні присадок до моторної оливи. Зниження питомої та погодинної ефективної витрати палива, обумовлене підвищенням ефективної потужності при використанні присадки. Крім цього виявлено, що в процесі експлуатаційних випробуваннях достатньо досліджувати присадки Roil Gold і КГМТ-1, як найбільш ефективні.

Дані про експлуатаційні випробування дизелів кар'єрних самоскидів на Новопавлівському кар'єрі ПАТ "Кіровоградграніт" Кіровоградського району Кіровоградської області фіксували на початку і в кінці експлуатації (табл. 1).

Таблиця 1 – Експлуатаційні випробування транспортних машин

№	Господарство	Моторна олива	Початок експлуатації	Кінець експлуатації	Середня тривалість експлуатації, місяць
БелАЗ-75471					
1	ПАТ "Кіровоградграніт"	М-10Г ₂ к	Травень 2012	Вересень 2015	3
2	ПАТ "Кіровоградграніт"	М-10Г ₂ к + Roil Gold	Травень 2012	Вересень 2015	3
3	ПАТ "Кіровоградграніт"	Модифікована КГМТ-1	Травень 2012	Вересень 2015	3
Comatsu HD 405-6					
4	ПАТ "Кіровоградграніт"	М-10Г ₂ к	Травень 2015	Вересень 2017	3
5	ПАТ "Кіровоградграніт"	М-10Г ₂ к + Roil Gold	Травень 2015	Вересень 2017	3
6	ПАТ "Кіровоградграніт"	Модифікована КГМТ-1	Травень 2015	Вересень 2017	3
ХТЗ-17021					
7	СТОВ "Хутірське"	М-10Г ₂ к	Жовтень 2017	Жовтень 2019	3
8	СТОВ "Хутірське"	М-10Г ₂ к + Roil Gold	Жовтень 2017	Жовтень 2019	3
9	СТОВ "Хутірське"	Модифікована КГМТ-1	Жовтень 2017	Жовтень 2019	3
ХТЗ-17021					
10	ТОВ "Агрофірма Колос"	М-10Г ₂ к	Жовтень 2016	Листопад 2018	3
11	ТОВ "Агрофірма Колос"	М-10Г ₂ к + Roil Gold	Жовтень 2016	Листопад 2018	3
12	ТОВ "Агрофірма Колос"	Модифікована КГМТ-1	Жовтень 2016	Листопад 2018	3

Джерело: розроблено автором

Крім цього було виділено два етапи експлуатаційних випробувань. На першому етапі двигуни працювали в звичайному режимі, а на другому – в умовах, коли в оливну систему додавали присадку Roil Gold та композиційну присадку на основі геомодифікатора КГМТ-1. На обох етапах спостереження здійснювали з періодичністю, рівною 25 мото-год.

Аналогічні дослідження проводили і на ТМ, що експлуатується в СТОВ "Хутірське" та ТОВ "Агрофірма Колос" Маловисківського району Кіровоградської області. Відбір проб моторної та трансмісійної олив здійснювали з дизелів автомобілів БелАЗ-75800, Comatsu HD 405-6 та тракторів ХТЗ-17021.

Досліджуваний парк машин на підприємствах було поділено на три частини: в яких досліджувалась свіжа олива, олива з присадкою Roil Gold та з композиційною присадкою КГМТ-1.

Під час експлуатаційних випробуваннях було визначено інтенсивність зміни параметрів концентрації заліза в оливі, швидкості надходження заліза в оливу, а також сукупність властивостей і показників якості моторної і трансмісійної олив. У процесі досліджень проводили систематичні спостереження і фіксували показники, що характеризують зовнішні умови експлуатації. Інтервали між вимірами були кратні періодичності проведення ТО.

Періодичність проб оливи визначали за напрацювання (пробігом) ТМ:

$$\Delta L = L_{TO} \frac{k_1}{n}, \quad (4)$$

де L_{TO} – періодичність ТО;

k_1 – коефіцієнт коректування пробігу автосамоскида або ТМ у АПВ до ТО;

n – кількість відборів проб оливи.

Підставивши в формулу (4) $L_{TO} = 250$ мото-год., $k_1 = 1,2$, $n = 12$ отримали, що періодичність відбору проб моторної оливи становить 25 мото-год. Кількість хімічних елементів визначали спектрографом МФС-7.

Число вимірів діагностичних параметрів коливалося від трьох до п'яти. Аналіз якості оливи проводили по бракувальним показникам [11]. В якості бракувальних показників оливи застосовували в'язкість ν ; лужне число ЛЧ; кислотне число КЧ; температура спалаху ТС; коксівність; вміст води; диспергуючі властивості, діелектрична проникність та ін.

В процесі експлуатаційних випробувань проводили аналіз порівняння терміну заміни не модифікованих і модифікованих присадками "Roil Gold" та КГМТ-1 моторної та трансмісійної оливи з виявленням можливості збільшення терміну заміни спрацьованої моторної оливи композиційною присадкою на основі геомодифікатора КГМТ-1. Визначали динаміку зміни основних показників модифікованої оливи та її спектральний аналіз. За вмістом заліза в оливі оцінювали залишковий ресурс силових агрегатів ТМ.

Статистична обробка, отриманих при вимірюваннях показників, характер зміни з напрацюванням силових агрегатів ТМ, дала можливість представити їх у вигляді однофакторних математичних моделей [1,12] експоненціальної залежності:

$$P = P_0 \cdot \exp(b \cdot t), \quad (5)$$

де P , P_0 – фізико-хімічні показники якості оливи;

b – постійна, що характерна для кожного показника якості;

t – напрацювання дизеля в мото-год. Постійні a і b моделей визначали, використовуючи статистичні дані показників на інтервалі напрацювання від t_1 до t_2 :

$$\begin{cases} P = P_0 \cdot \exp(b \cdot t_1); \\ P = P_0 \cdot \exp(b \cdot t_2). \end{cases} \quad (6)$$

Розв'язавши систему рівнянь (6) відносно b , отримували:

$$b = \frac{\ln(P_1 / P_2)}{t_2 - t_1}; \quad P_0 = \frac{P_1}{\exp b \cdot t_2}. \quad (7)$$

Математичні моделі представляли у вигляді регресійних рівнянь зміни кожного фізико-хімічного показника для базових та модифікованих присадками моторних і трансмісійних оливи з напрацюванням силових агрегатів ТМ. Кожному регресійному рівнянню дано графічну інтерпретацію. При цьому використані наступні позначення: фізико-хімічних показників: P_{TC} – температура спалаху; P_G – густина; $P_{K.ч}$ – кислотне число; $P_{Д.з}$ – диспергируюча здатність; $P_{К.В}$ – кінематична в'язкість.

Експлуатаційні випробування, проведені у ПАТ "Кіровоградграніт", СТОВ "Хутірське", ТОВ "Агрофірма Колос", показали покращення фізико-хімічних показників та властивостей моторної і трансмісійної оливи після модифікування присадкою КГМТ-1 й подовженням терміну їх використання. З досліджень визначено, що термін заміни моторної оливи можливо подовжувати на 25...40%, то відповідно можна визначити кількість ТО у зв'язку з подовженням ресурсу моторної і трансмісійної оливи і порівняти з номінальною кількістю ТО (табл.2). Експлуатаційні випробування визначили необхідність коректування термінів ТО ТМ, що працюють в

жорстких умовах експлуатації, для забезпечення необхідного рівня їх експлуатаційної надійності.

Представлена таблиця коректування свідчить, що за робочий сезон кількість ТО ТМ, пов'язаних із заміною моторної оливи зменшується на 4.

Таблиця 2 – Коректування термінів ТО ТМ термінів заміни моторної оливи

Робочі місяці	Дні в місяцях														ТО	ТО
Травень	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
										ТО			ТО		1	1
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28		
						ТО						ТО			1	1
Червень	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
		ТО									ТО	ТО			2	1
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
							ТО		ТО						1	1
Липень	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
				ТО					ТО					ТО	2	1
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23		
								ТО		ТО					1	1
Серпень	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6		
						ТО	ТО								1	1
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
		ТО				ТО						ТО			2	1
Вересень	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3		
					ТО			ТО							1	1
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
				ТО	ТО									ТО	2	1
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30			
			ТО							ТО					1	1
Сумарна кількість ТО															15	11

*   – Терміни ТО, що стосуються заміни свіжої базової та модифікованої на основі геомодифікатора КГМТ-1 моторної оливи.

Джерело: розроблено автором

Застосування присадок та способу зменшення зносу трибоспряжень деталей силових агрегатів ТМ під час їх пуску дають можливість подовжити термін заміни моторної оливи. Це передусім стосується ТМ, що працюють в нестационарних умовах відкритих кар'єрів і підприємств агропромислового виробництва Кіровоградської області. При цьому є сенс говорити про збільшення інтервалів ТО з метою раціональної організації проведення вчасних технічних дій для відповідних ТМ. Зазначене забезпечує належний рівень показників довговічності силових агрегатів, а також економічну доцільність запропонованих заходів.

Висновки.

1. Запропоновано та реалізовано спосіб зменшення сил тертя в спряженнях деталей силових агрегатів на етапі пуску дизелів транспортних машин.

2. На етапі стендових випробувань досліджено залежність потужності, крутного моменту і питомої витрати палива від частоти обертання колінчатого валу силового агрегату. На цьому етапі було розглянуто ефективність впливу присадок НИОД-5, RoilGold і КГМТ-1 на властивості і показники моторної оливи. Виявлено, що в

експлуатаційних дослідженнях доцільно використовувати присадки RoilGold і КГМТ-1.

3. На етапі експлуатаційних випробувань на Новопавлівському кар'єрі ПАТ "Кіровоградграніт", СТОВ "Хутірське" та ТОВ "Агрофірма Колос" були досліджені властивості показники моторної та трансмісійної оливи автомобілів БелАЗ-75800, Comatsu HD 405-6 та тракторів ХТЗ-17021. Дослідженню підлягали як модифіковані, так і немодифіковані оливи. Модифікування здійснювали присадкою RoilGold та композиційною присадкою КГМТ-1 на основі геомодифікатора. Виявлено подовження строку функціонування досліджуваних оливи та експоненціальні залежності величин їх показників від напрацювання (пробігу).

4. Подовжено функціонування моторних і трансмісійних оливи та подовжений строк їх заміни дали можливості внести деякі коректування в систему технічного обслуговування та ремонту транспортних машин. Розроблено таблицю коректування технічного обслуговування транспортних машин та проведено оцінку економічної доцільності запропонованих заходів підвищення довговічності їх силових агрегатів.

Список літератури

1. Аулін В.В., Лисенко С.В., Кузик О.В. Підвищення експлуатаційної надійності машин шляхом модифікування моторної оливи. *Вісник Харківського нац. техн. університету сільськ. господарства. Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва*. 2010. Вип. 100. С. 127-133.
2. Аулін В.В., Лисенко С.В., Кузик О.В., Гриньків А.В., Голуб Д.В. Трибофізичні основи підвищення надійності мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки технологіями триботехнічного відновлення: монографія. Кропивницький: Лисенко В. Ф., 2016. - 303 с.
3. Аулін В.В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки: дис... д-ра техн. наук: 05.02.04 / Хмельниц. нац. ун-т. Хмельницький, 2015. 360 с.
4. Аулін В.В., Замота Т.Н., Лисенко С.В. Повышение эксплуатационной износостойкости деталей машин их триботехническим восстановлением и управлением процессами приработки. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2016. Vol. 18. № 2. P.89-96.
5. Джус Р.Н. Реологические особенности автомобильных трибосистем при применении ревитализантов. *Автомобильный транспорт: Сб. науч. трудов*. 2004. Вип. 14. С. 52-55.
6. Aulin V.V., Lysenko S.V., Hrinkiv A.V., Slon V.V., Chernai A.E. Creation of theoretical bases of tribotechnologies of running-in and restoration as means of effective increase of operational wear resistance of motor transport and mobile agricultural machinery . *Problems of Tribology*, V. 26, No 1/99-2021, 51-58.
7. Аулін В.В., Слонь В.В., Лисенко С.В. Експрес-оцінка впливу моторних оливи і присадок до них на характеристики зносу робочих поверхонь деталей двигунів вантажних автомобілів. *Вісник інженерної академії України*. 2013. №2. С. 166-170.
8. Аулін В.В., Слонь В.В., Лисенко С.В. Характер зміни триботехнічних характеристик спряжень дизелів при їх роботі в різних режимах. *Проблеми трибології*. 2013. №3. С.89-96.
9. Аулін В.В., Лисенко С.В., Гриньків А.В., Слонь В.В. та ін. Вплив процесів, що відбуваються в рухомих спряженнях деталей транспортних машин під дією компонентів геомодифікатора, на ефективність триботехнологій припрацювання і відновлення. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. Вип. 3(34). С.250-265.
10. Aulin V., Slon V., Lysenko S., Golub D. Research of the change of power of diesel vehicles operating in non-stationary conditions. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2015. Vol.17. No.2. P. 103-108.
11. Наглюк И.С. Скорость поступления продуктов износа в моторное и трансмиссионное масло при эксплуатации транспортных машин. *Вісник СевНТУ*. 2011. Вип. 121. С. 114-117.
12. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах. Кіровоград: Лисенко В.Ф., 2014. 369 с.

References

1. Aulin, V.V., Lysenko, S.V. & Kuzyk, O.V. (2010). Pidvyshchennia ekspluatatsiinoi nadiinosti mashyn

- shliakhom modyfikuvannya motornoj olyvy [Improving the operational reliability of machines by modifying the engine oil]. *Visnyk Kharkivskoho nats. tekhn. universytetu silsk. hospodarstva. Problemy nadiinosti mashyn ta zasobiv mekhanizatsii silskohospodarskoho vyrobnytstva - Bulletin of the Kharkiv National tech. University of Rural Development farms. Problems of reliability of machines and means of mechanization of agricultural production, Issue. 100*, 127-133 [in Ukrainian].
2. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Kuzyk, O.V., Hryniv, A.V. & Holub, D.V. (2016). Trybofizychni osnovy pidvyshchennia nadiinosti mobilnoi silskohospodarskoi ta avtotransportnoi tekhniki tekhnolohiiamy trybotekhnichnoho vidnovlennia: monohrafiia [Tribophysical bases of increase of reliability of mobile agricultural and motor transport technics by technologies of tribotechnical restoration: monograph]. Kropyvnytskyi: Lysenko V. F. [in Ukrainian].
 3. Aulin, V.V. (2015). Trybofizychni osnovy pidvyshchennia znosostiikosti detalei ta robochych orhaniv silskohospodarskoi tekhniki [Tribophysical bases of increase of wear resistance of details and working bodies of agricultural machinery]. *Candidate's thesis*. Khmelnyts. nats. un-t. Khmelnytskyi [in Ukrainian].
 4. Aulin, V.V., Zamota, T.N. & Lysenko, S.V. (2016). Povyshenie ekspluatatsionnoy iznosostoykosti detaley mashi ih tribotekhnicheskim vstanovleniem i upravleniem protsessami prirabotki [Improving the operational wear resistance of machine parts by tribotechnical recovery and running-in process control]. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture - MOTROL. Commission of Motorization and Energy in Agriculture, Vol. 18, No 2*, P.89-96 [in Russian].
 5. Dzhys, R.N. (2004). Reologicheskie osobennosti avtomobilnyih tribosistem pri primenenii revitalizantov [Rheological features of automotive tribosystems when using revitalizants]. *Avtomobilnyi transport: Sb. nauch. trudov - Road transport: Sat. scientific works, Issue 14*, 52-55 [in Russian].
 6. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Hryniv, A.V., Slon, V.V. & Chernai, A.E. (2021). Creation of theoretical bases of tribotechnologies of running-in and restoration as means of effective increase of operational wear resistance of motor transport and mobile agricultural machinery. *Problems of Tribology, Vol. 26, No 1/99-2021*, 51-58 [in English].
 7. Aulin, V.V., Slon, V.V. & Lysenko, S.V. (2013). Express assessment of the impact of engine oils and additives before them on the characteristics of the wear of working surface parts of engines of vintage cars [Express assessment of the impact of engine oils and additives before them on the characteristics of the wear of working surface parts of engines of vintage cars]. *Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine - Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine, No. 2* pp. 166-170 [in Ukrainian].
 8. Aulin, V.V., Slon, V.V. & Lysenko, S.V. (2013). The nature of the change in tribotechnical characteristics of diesel conjugation during their work in different modes [The nature of the change in tribotechnical characteristics of diesel conjugation during their work in different modes]. *Problems of tribology, 3*. pp.89-96 [in Ukrainian].
 9. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Hryniv, A.V., Slon, V.V. et al. (2020). Vplyv protsesiv, shcho vidbuvaiutsia v rukhomykh spriazhenniakh detalei transportnykh mashyn pid diieiu komponentiv heomodyfikatora, na efektyvnist trybotekhnolohii prypratsiuvannya i vidnovlennia [Influx of processes, which are used in ruhomy harnesses of parts of transport machines under the geomodifier components, on the effectiveness of tribotechnologies, application and innovation]. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky - Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical sciences, Issue. 3(34)*, 250-265 [in Ukrainian].
 10. Aulin, V., Slon, V., Lysenko, S. & Golub, D. (2015). Research of the change of power of diesel vehicles operating in non-stationary conditions. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, Vol.17, 2*, P. 103-108 [in English].
 11. Naglyuk, I.S. (2011). Skorost postupleniya produktov iznosa v motornoe i transmissionnoe maslo pri ekspluatatsii transportnykh mashin [The rate of entry of wear products into engine and transmission oil during the operation of transport vehicles]. *Visnik SevNTU - Visnik SevNTU. Issue 121*, 114-117 [in Russian].
 12. Aulin, V.V. (2014). Fizychni osnovy protsesiv i staniv samoorhanizatsii v trybotekhnichnykh systemakh. [Physical bases of processes and states of self-organization in tribotechnical systems]. Kirovohrad: Lysenko V.F. [in Ukrainian].

Serhii Lysenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

System-oriented Approach to Improving the Operational Reliability of Transport Vehicles at the Stages of Their Life Cycle

The paper, based on a system-oriented approach, identifies how to increase the level of their operational reliability at the stages of the life cycle of transport machines operating in open pits and in the conditions of agro-industrial production. At the start-up stage of power units, a method of reducing the wear of parts is

proposed. The scheme of realization of a way is developed. It is determined that it is effective to use this method when operating vehicles in harsh non-stationary conditions and "start-stop" modes. It is experimentally proven that the proposed method allows to save up to 15% of consumables and increase the life of the engine oil.

The study of the effectiveness of the use of additives NIOD-5, RoilGold and the proposed additive KGMT-1 to motor oil was carried out at the stage of bench tests of power units of transport vehicles. It has been determined that the addition of a composite additive to the engine oil provides a steady increase in power, torque and reduction of specific fuel consumption. RoilGold and KGMT-1 additives work especially effectively.

At the stage of operation of transport vehicles in open quarries and conditions of agro-industrial production, research proved the extension of the use of motor and transmission oil by 25 ... 40%, revealed a decrease in maintenance and the need to adjust the maintenance of vehicles. Based on the results of operational studies, a corrective table of terms of replacement of motor oil of transport vehicles operating in harsh non-stationary conditions is constructed. It is found out how to ensure the proper level of operational reliability of transport vehicles.

operational reliability, transport machine, system-oriented approach, power unit, motor oil, transmission oil, non-stationary conditions, replacement period, composite additive

Одержано (Received) 10.02.2022

Прорецензовано (Reviewed) 18.02.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

УДК 629.1.04

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.289-298](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.289-298)

О.Л. Просяк, асп.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

Системи управління тиском повітря в шинах транспортних засобів: їх конструктивні та функціональні особливості

У статті проведений аналіз систем управління тиском в шинах транспортних засобів, що захищені патентами, виробляються провідними виробниками цих систем, мають унікальні конструктивні особливості. Проведений аналіз дозволяє визнати перспективність створення систем, орієнтованих на використання цифрових технологій, які забезпечують автоматичний моніторинг і регулювання тиску, автоматичне виявлення пошкоджених шин, можливість віддаленого доступу до системи. Виявлені конструктивні особливості дозволили визначити напрямки вдосконалення системи керування тиском в шинах автомобіля.

шина, колесо, тиск, керування, система, патент

Постановка проблеми. Розробка і вдосконалення систем контролю тиску в шинах має важливе значення, тому що рекомендований розробником тиск в шинах відіграє визначальну роль при формуванні зони контакту з дорожнім покриттям. При наявності систем контролю тиску в шинах непередбачені аварійні ситуації можуть бути зведені до мінімуму, при цьому збільшиться строк служби шин, паливна економічність автомобіля, а також параметри його експлуатації. У той же час наявність великої кількості патентів та конструкцій таких систем потребує їх певної систематизації, вивчення проблеми встановлення цих систем на вітчизняні автомобілі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До проблем, які стосуються управління тиском в шинах автомобілів в останні роки зверталися О.Д. Бойко [1], Л.С. Козачук, В.В. Стельмашук, В.П. Онищук, І.С. Козачук, Р. Іскандарян та ін.

© О. Л. Просяк, 2022

У той же час в науковій літературі майже не дослідженими залишаються конструктивні особливості цих систем, перспективні напрями їх розвитку. Відповідно ця стаття спрямована на визначення найбільш перспективних розробок та можливостей вдосконалення системи керування тиском в шинах автотранспортних засобів.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз систем управління тиском в шинах автотранспортних засобів, дослідження їх конструктивних особливостей та функціональних можливостей.

Для досягнення поставленої мети необхідно дослідити конструкції систем підкачки шин з точки зору їх патентного захисту, розкрити функціональні можливості цих систем.

Виклад основного матеріалу. Конструкції систем підкачки шин в цілому і їх окремих елементів відрізняються великою різноманітністю, тому при розробці нових, або вдосконаленні існуючих конструкцій, необхідно враховувати досвід, накопичений провідними вітчизняними та зарубіжними автовиробниками.

Отже, в наш час існує ряд технологічних рішень, які дозволяють контролювати тиск в пневматичних шинах і здійснювати їх регулювання в автоматичному режимі.

Йдеться про системи типу:

- Central tire inflation system (CTIS), яка дозволяє регулювати тиск повітря в шинах. Конструктивно система дозволяє забезпечити контроль та регулювання тиску повітря в кожній шині, що покращує характеристики руху машини на різних опорних поверхнях. У світі є два головні виробники CTIS: американська корпорація Dana и заснований у Франції підрозділ компанії GIAT «Syegon». Кожен виробник пропонує дві версії: CTIS для військових автомобілів, а також пристрої для вантажних та легкових транспортних засобів;

- Tyre Pressure Monitoring System (TPMS), яка попереджає про низький або високий тиск в шині, має великий спектр конструктивних рішень, вона контролює тиск повітря в шинах, а в окремих варіантах дозволяє, як і CTIS, підтримувати вказаний виробниками тиск повітря в шинах шляхом використання стислого повітря пневматичної системи автомобілів та їх причепів [1].

Серед цих пристроїв можна виділити:

- пристрої для централізованого управління тиском в шинах, за допомогою яких тиск повітря в шинах може змінюватися під час руху автомобіля в залежності від дорожніх умов. Це значно покращує показники експлуатації автомобіля, а також дозволяє продовжувати рух автомобіля в разі незначного пошкодження;

- пристрої для нецентралізованого управління тиском в шинах дозволяють підтримувати тиск повітря в кожному колесі окремо в залежності від навантаження, що припадає на колеса і умов взаємодії деформованого колеса з ґрунтом.

Як правило, найбільші світові виробники свої технічні рішення і винаходи підкріплюють патентами, тому аналіз патентних баз дає можливість визначити основні напрями прийнятих конструкторських рішень.

Для відбору найбільш значущих і ефективних технічних винаходів по системам підкачки шин колісних машин за останні 20 років було проведено пошук по патентних відомствах країн СНД, Європи, США. Також пошук здійснювався в Базі патентів України [2].

Вибірку патентів здійснювали з міжнародного патентного класифікатора B60C23 – пристрої для вимірювання, сигналізації управління або розподілу тиску і температури в шинах, спеціально пристосовані для установки їх на транспортних засобах; розміщення пристроїв для накачування шин (наприклад, насосів, резервуарів) на транспортних засобах; пристосовання для охолодження шин.

Всього було знайдено близько 18 тис. патентів по системам централізованої підкачки шин транспортних засобів. За даним напрямом були виділені основні власники патентів, якими є відомі автовиробники або виробники автокомпонентів: Dana Corporation, Vehicle Inflation Technologies, AM General, Meritor, Eaton Corporation, «КамАЗ», «ГАЗ» та ін.

Як показує аналіз патентів, централізоване регулювання тиску повітря в шинах коліс застосовують на вантажних і спеціальних автомобілях для підвищення прохідності. Дана система регулює зміну тиску повітря в шинах при зміні дорожніх умов, а також забезпечує безперервне підкачування в разі їх пошкодження.

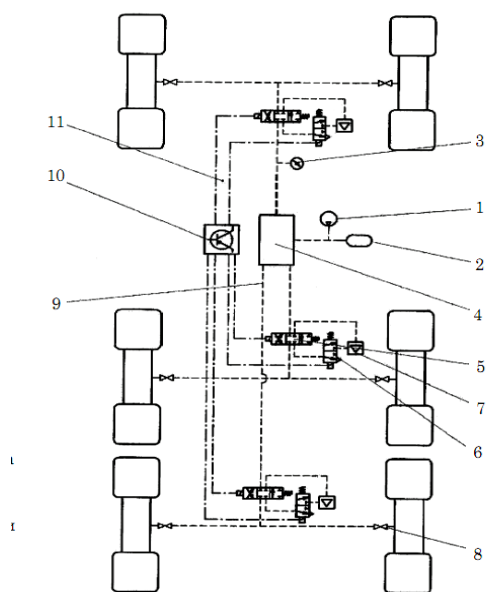
Нині, в цій сфері, можна виділити три основні напрями для патентування:

1) розробка структури і алгоритму системи централізованої підкачки шин;
2) проектування системи підведення повітря до обертової ступиці колеса автомобіля;

3) розробка пристрою контролю тиску в пневматичній шині.

Значне місце в вибірці патентів за системами підкачки повітря в шинах займають технічні рішення в сфері розробки структури і алгоритму систем централізованої підкачки шин.

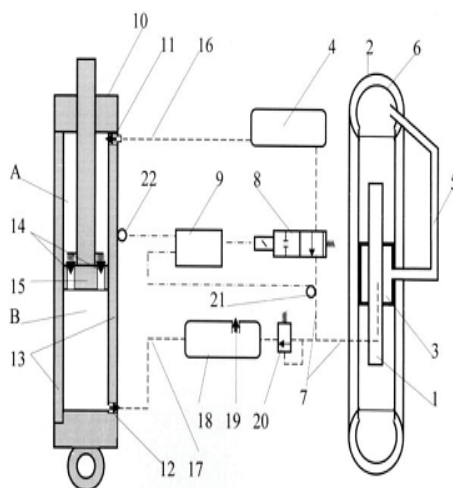
Так, в патентах 93625 (автори: Клец Д.М., Куренко О.Б., Яценко К.Г., Подригало М.А., Рогозін І.В., рис. 1); 56000 (автори: Хитренко Я.В., Мальнов С.І., Костюк ВВ., Козлинський М.П., Гутий А.В., рис. 2) пропонуються системи регулювання тиску повітря в шинах транспортних засобів шляхом забезпечення раціональних параметрів їх маневреності, шляхом встановлення датчиків, які здатні виміряти та порівнювати реальний тиск з рекомендованим і вирівнювати їх величини шляхом стравлювання або докачування повітря в шини [2].



1 - компресор; 2 - пневматичний балон; 3 - датчик тиску повітря; 4 - блок управління тиском повітря;
5 - електромагнітні клапани управління тиском; 6 - клапани випуску повітря; 7 - ежектори; 8 - колісні
клапани; 9 - трубопроводи і шланги; 10 - електричний блок управління; 11 - електричні ланцюги

Рисунок 1 – Система керування тиском в пневматичних шинах (патент №93625)

Джерело: [2]



1 - цапфа; 2 - колесо; 3 - внутрішній утілювач; 4 - повітряний ресивер; 5 - трубопровід; 6 - шина; 7 - повітряна магістраль (основна); 8 - електромагнітний клапан; 9 - блок управління; 10 - поршневий насос-амортизатор; 11 - верхній перепускний клапан; 12 - нижній перепускний клапан; 13 - корпус амортизатора; 14 - перепускний клапан; 15 - амортизуючий поршень; 16 - повітряна магістраль (додаткова); 17 - магістраль для зниження тиску; 18 - ресивер; 19 - запобіжний клапан; 20 - редукційний клапан; 21 - датчик тиску; 22 - датчик коливань тиску

Рисунок 2 – Система керування тиском в пневматичних шинах (патент №56000)

Джерело: [6]

Цей підхід, який заснований на встановленні датчиків тиску, є найбільш розповсюдженим, його використано і в інших розробках (напр. патент № 23157. Автори: Денис В.В., Білодід В.П., Козлинський М.П., Калінін О.М., Іванов О.М., Слюсаренко О.І.).

У свою чергу компанія Dana Corporation захистила патентом систему (рис. 3), яка включає в себе: 1) кран, який регулює тиск та має клапан, що обмежує параметри падіння тиску; 2) повітряний манометр; 3) електронний блок управління клапанами тиску; 4) датчики, що сигналізують про падіння тиску; 5) крани запору повітря; 6) трубопроводи; 7) система постачання повітря до шин.

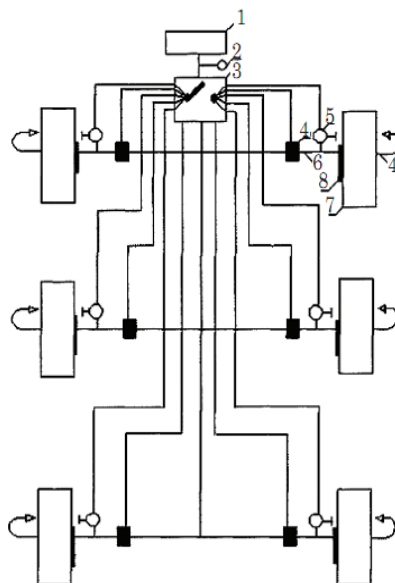
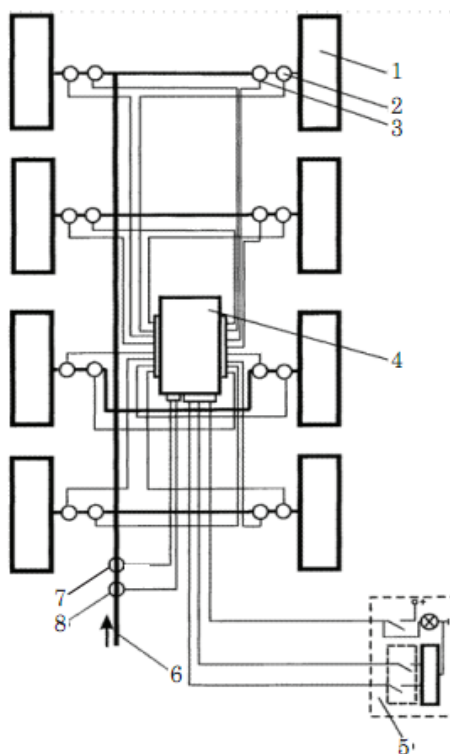


Рисунок 3 – Система керування тиском в пневматичних шинах компанії Dana Corporation

Джерело: [3]

Як наголошується в патенті, блок управління використовує значну кількість параметрів (тиск повітря в шинах, обсяг витоків повітря з системи, розташування клапанів), що потребує додаткового налаштування системи, відповідно до конструктивних особливостей транспортного засобу, умов експлуатації. У зв'язку з цим перед установкою системи на транспортний засіб потрібно ручне калібрування блоку управління підкачкою шин, що, в принципі, знижує цінність цієї розробки [3].

Розробкою систем, здатних негайно виявляти пошкодження і постачати достатню кількість додаткового обсягу повітря в шину, активно займається компанія Eaton (патенти EP0297837, US5313995), пропонуючи рішення «run flat» (шина, що залишається робочою після проколу). Система містить контрольний і запірний клапани на кожному колісному вузлі автомобіля (патент EP0297837), що підключені до центральної системи управління. Якщо продуктивності джерела повітря недостатньо, пошкоджена шина відключається від системи підкачки [4, 5].



1 - колесо; 2 - пристрій контролю тиску; 3 - електропневмоклапан; 4 - керуючий пристрій; 5 - панель управління; 6 - пневмопровід; 7 - електропневмоклапан збільшення тиску (постачання повітря від компресора); 8 - електропневмоклапан зниження тиску

Рисунок 4 – Система керування тиском в пневматичних шинах компанії Eaton

Джерело: [4]

Велика увага в патентних документах приділяється також розробці систем підведення повітря до обертової ступиці колеса. Варто виділити два основних способи підведення повітря до шини: із зовнішнім і внутрішнім розташуванням каналів, якими поступає повітря. У першому випадку повітря подається до шини за допомогою шлангів, розташованих із зовнішнього контуру колеса автомобіля (патент US7273082 компанії Hendrickson), у другому – через спеціальні канали в ступиці (патент RU111479 компанії ВАТ «КамАЗ») [6].

Дослідження патентів показали, що більш широко використовується перший спосіб, що пов'язано з можливістю незначної зміни конструкції автомобіля і кращої ремонтпридатністю. Однак застосування систем підведення повітря з внутрішнім розташуванням каналів характерно для військових і спеціальних транспортних засобів, оскільки при цьому немає необхідності у використанні зовнішніх трубок або шлангів, які можуть бути легко пошкоджені. Такий підхід використовує, наприклад компанія AM General Corporation, яка виробляє автомобілі Hummer [7]. В результаті має місце достатньо високий рівень експлуатаційної надійності, хоча, безумовно, що при цьому виникають труднощі з обслуговуванням системи.

У сучасній індустрії розробки та виробництва керування тиском в шинах транспортних засобів виникають і раніше невідому, інноваційні рішення, наприклад Проблема очищення повітря перед його попаданням в шину вирішує компанія Meritor Heavy Vehicle Technology. Так, у патенті US6394159 описаний спосіб установки фільтра на ступиці колеса для очищення повітря від домішок при підкачуванні. Фільтр встановлений на зовнішній частині ступиці і тому є легкодоступним для обслуговування (патент US6394159 компанії Meritor Heavy Vehicle Technology).

Як інноваційне рішення слід виділити шину Goodyear, що здатна до самопідкачування (патент US8381785). Відповідно до патенту, в закраїни шини вмонтована пара тороподібних оболонок, які при обертанні колеса періодично стискаються і підкачують повітря в шину, використовуючи принцип роботи шлангового насоса [8]. Досліджуючи це рішення варто вказати на труднощі в регулюванні тиску в шинах при використанні даної системи, а отже, відсутність доцільності використання даної конструкції на багатоцільовому транспортному засобі.

Велика кількість зарубіжних патентів за останні 5-10 років присвячена системам підкачки непровідних коліс, зокрема коліс причепів і напівпричепів, також виробники та конструктори роблять акцент на зниження коефіцієнта опору коченню шин шляхом оптимального вибору тиску повітря в них, розглядають регулювання тиску повітря в шинах в основному як засіб підвищення прохідності на складному ґрунті.

У той же час слід вказати на те, що в останні роки дані системи отримують нові можливості у зв'язку із тим, що виробники звернули увагу на перспективність цифрових технологій для регулювання тиску повітря в пневматичній шині. Наприклад, компанія Schmitz Cargobull почала виробництво цифрових систем які надають можливість перетворити будь-який трейлер в «розумний транспортний засіб» [9].

Система TrailerConnect, створена даною компанією, пропонує моніторинг температури, стан шин, розташування автомобіля і безпеки в режимі реального часу, може бути модернізована для використання на будь-якому вантажному автомобілі.

Система забезпечує контроль тиску в шинах і його регулювання за допомогою системи автоматичної підкачки, яка запускається з кабіни водія при тому, що параметри управління тиском задаються за допомогою смартфона або iPad. Сам контроль може відбуватися і дистанційно, коли водій знаходиться поза кабіною, але має потребу в отриманні інформації стосовно тиску в шинах Цей додаток поширюється безкоштовно в мережі Інтернет, однак пакет спеціального обладнання для експлуатації системи необхідно докуповувати окремо (приблизна вартість 5000 €).

У цій сфері в основному патентують алгоритми роботи системи підкачки шин, які забезпечують автоматичний моніторинг і регулювання тиску до потрібного рівня, що визначається водієм; автоматичне виявлення пошкоджених шин і, в разі необхідності, відключення їх від системи.

Так, наприклад, в патенті US6401743 компанії Vehicle Inflation Technologies наведена система оповіщення, яка використовує регулятор тиску і електричний сигналізатор, що являють собою єдине ціле. Завданням винаходу є створення такої системи, яка буде вказувати на низький рівень тиску в системі, навіть при відключеному джерелі подачі повітря. При цьому немає необхідності в установці додаткових клапанів або зовнішніх перемикачів (патент US6401743 компанії Vehicle Inflation Technologies). Необхідний рівень тиску повітря виставляється механічним пристроєм (гвинтом). При значному зниженні тиску повітря в шинах поршень опускається і замикає електричні контакти, які включають сигналізатор [10].

Звернемо увагу також на те, що в патентах останніх років простежується тенденція розширення набору датчиків, які відстежують параметри повітря в шині (тиск і температуру), перенесення їх максимально близько до об'єкта вимірювання (на колесо або в шину) і використання бездротового зв'язку з ними.

Принципове значення для даного дослідження має робота М. М. Потапова, в якій автор визначив, що система управління тиском в шинах автомобіля повинна реалізовувати наступні функції: підтримка однакового тиску в шинах одній осі; усунення паразитної потужності шляхом зміни радіуса кочення колеса; встановлення необхідного тиску в колесах автомобіля при експлуатації автомобіля в польових умовах.

Система складається з наступних підсистем: підсистема підтримки однакового тиску в шинах одній осі; підсистема усунення паразитної потужності; підсистема обслуговування режиму «Поле»; підсистема фіксування паразитного крутного моменту; підсистема підкачки шини [11].

З цією позицією можна погодитися, додавши, що дана система повинна мати функцію віддаленого контролю і управління тиском повітря в шинах автомобілів.

Слід зазначити, що ці винаходи не завжди знаходять застосування в реальних умовах експлуатації, проте за наявними патентами у провідних компаній-виробників можна простежити тенденцію розвитку конструкцій систем, а також визначити патентоспроможність розроблюваних в рамках НІОКР елементів конструкцій приводу.

Зазначимо, що в нашій країні експлуатується велика кількість морально та технічно застарілих моделей автомобілів сімейств ЛуАЗ, УАЗ, ГАЗ-66, ЗІЛ-131, Урал, КрАЗ МАЗ, КАМАЗ.

Конструкції цих автомобілів були розроблені понад 40 років тому і суттєво не змінювалися, відповідно на даних автомобілях не встановлені сучасні системи регулювання тиску в автомобільних шинах, що знижує ефективність їх експлуатації, хоча при цьому і установка таких систем на ці автомобілі не є економічно доцільною.

Згідно з даними західних дослідників витрати на установку подібних систем досягають 2000 € - 15000 € при тому, що розрахунковий період окупності такої системи становить 4.8 років, іншими словами, в окремих випадках вартість однієї такої системи може перевищувати вартість всього застарілого транспортного засобу [12, с. 53].

Поряд із цим аналіз існуючих конструкцій систем регулювання тиску повітря в шинах показує, що технічні рішення спрямовані на автоматизацію управління тиском повітря в залежності від умов експлуатації. Разом з тим регулювання тиску повітря в шинах має певну проблемність за цілою низкою причин, а саме наявності суб'єктивної думки водія про момент включення в роботу системи регулювання тиску повітря в шинах; особлива адаптивність національного автотранспортного парку до установки найбільш «просунутих» цифрових систем, висока вартість систем.

У зв'язку з цим, на сьогодні актуальним завданням є розробка системи керування тиском в шинах автомобіля з урахуванням можливостей сучасних автотранспортних підприємств закуповувати і встановлювати такі системи на автомобілі, а також з урахуванням необхідності зниження вартості таких систем у порівнянні із західними зразками. У той же час, безумовно, що вітчизняним розробникам доцільно звернутися до використання цифрових технологій у процесі створення нових зразків систем управління тиском в пневматичних шинах автотранспортних засобів з тим, щоб зробити ці системи конкурентоздатними, інформативними та ефективними.

Висновки. Проведене дослідження і аналіз патентно-ліцензійної роботи свідчить про те, що за останнє десятиліття багатьма науково-дослідними організаціями і колективами вчених приділяється значна увага питанню вдосконалення конструкції систем управління тиску в шинах транспортних засобів. Безумовно, що в наш час найбільш перспективним рішенням, можливістю його регулювання в автоматичному і ручному режимах. При тому, що дана система повинна мати високий рівень інформативності, надавати можливість керувати тиском з водійського місця і забезпечувати водієві повний контроль за станом тиску повітря в шині автомобіля з урахуванням рекомендованих, бажаних і оптимальних параметрів тиску, що впливають з умов експлуатації автомобіля в конкретний момент часу.

Створення такої системи є важливим напрямом розвитку теорії та практики експлуатації автомобілів з урахуванням зазначених вище вимог та реальних умов їх експлуатації в Україні, що і є метою і головним напрямом подальшого дослідження.

Список літератури

1. Бойко О. Д. Тенденції розвитку систем регулювання тиску повітря в шинах . *Вісник ЖДТУ*. 2009. № 1 (48). С. 11-21.
2. База патентів України. URL: <http://uapatents.com/4-93625-sistema-regulyuvannya-tisku-povitrya-v-shinakh-transportnikh-zasobiv-za-umovi-zabezpechennya-racionalnikh-parametriv-kh-manevrenosti.html> (дата звернення: 01.02.2022)
3. Dana Corporation. Active adaptation of control algorithms or a central tire inflation system. Pat. 1497145 European Patent Office, 2003, bul. № 2007/46, 15 p.
4. Eaton Corporation. Central tire inflation system. Pat. 0297837 European Patent Office, 1995, bul. № 89/01, 13 p.
5. Eaton Corporation. Central tire inflation system. Pat. 5313995 United States Patent, 1994, 13 p.
6. Открытое акционерное общество «КамАЗ». Система подвода воздуха к шинам. Пат. 111479 Российская Федерация, 2011, 2 с.
7. AM General Corporation. Vehicle wheel end assembly. Pat. 5535516 United States Patent, 1996, 9 p.
8. The Goodyear Tire & Rubber Company. Self-inflating tire assembly. Pat. 8381785 United States Patent, 2013, 18 p.
9. Schmitz Cargobull brings retrofit telematics package to temperature-controlled trailers. URL: <https://www.commercialmotor.com/news/product/schmitz-cargobull-brings-retrofit-telematics-package-temperature-controlled-trailers> (дата звернення: 04.02.2022)
10. Vehicle Inflation Technologies, Inc. Automatic tire inflation system having a pressure regulator with an integrated leak detection switch. Pat. 6401743 United States Patent, 2002, 7 p.
11. Потапов Н.Н. Снижение энергии на преодоление кинематического рассогласования в трансмиссии полноприводных тягово-транспортных средств регулированием давления в шинах . *Вісник машинобудування та транспорту*. 2019. № 2. С. 89-94.
12. Рон Манро, Фрэнк МакКаллок. Контроль давления воздуха в шинах тяжелых грузовых автомобилей. Ряд наблюдений в отношении применения контроля давления воздуха в шинах на лесовозах в Хайленде, Шотландия . URL: <http://www.ador.ru/data/files/static/roadex> (дата обращения: 08.02.2022)

References

1. Bojko, O.D. (2009). Tendentsii rozvytku system rehuliuвання тиску повітря в шинakh [Progress of the systems of regulation of pressure of air trends are in tires]. *Visnyk ZhDTU – The Journal of ZSTU*, 1 (48), 11-21 [in Ukrainian].
2. Patent database of Ukraine . Retrieved from <http://uapatents.com/4-93625-sistema-reguluvannya-tysku-povitrya-v-shinakh-transportnykh-zasobiv-za-umovi-zabezpechennya-racionalnykh-parametriv-kh-manevrenosti.html>
3. Dana Corporation. Active adaptation of control algorithms or a central tire inflation system. Pat. 1497145 European Patent Office, 2003, bul. № 2007/46, 15 p. [in English].
4. Eaton Corporation. Central tire inflation system. Pat. 0297837 European Patent Office, 1995, bul. № 89/01, 13 p. [in English].
5. Eaton Corporation. Central tire inflation system. Pat. 5313995 United States Patent, 1994, 13 p. [in English].
6. KamAZ Open Joint-Stock Company. Air supply system to tires. Stalemate. 111479 Russian Federation, 2011, 2 p. [in English].
7. AM General Corporation. Vehicle wheel end assembly. Pat. 5535516 United States Patent, 1996, 9 p. [in English].
8. The Goodyear Tire & Rubber Company. Self-inflating tire assembly. Pat. 8381785 United States Patent, 2013, 18 p. [in English].
9. Schmitz Cargobull brings retrofit telematics package to temperature-controlled trailers. *commercialmotor.com*. Retrieved from <https://www.commercialmotor.com/news/product/schmitz-cargobull-brings-retrofit-telematics-package-temperature-controlled-trailers> [in English].
10. Vehicle Inflation Technologies, Inc. Automatic tire inflation system having a pressure regulator with an integrated leak detection switch. Pat. 6401743 United States Patent, 2002, 7 p. [in English].
11. Potapov, N.N. (2019). Snizhenie jenergii na preodolenie kinemacheskogo rassoglasovanija v transmissii polnoprivodnyh tjavovo-transportnyh sredstv regulirovaniem davlenija v shinah [Reduction of energy to overcome the kinematic mismatch in the transmission of all-wheel drive traction vehicles by regulating the pressure in the tires]. *Visnik mashinobuduvannja ta transportu – Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, 2, 89-94 [in Russian].
12. Ron Manro, Frjenk MakKallok. Kontrol' davlenija vozduha v shinah tjavhelyh gruzovyh avtomobilej. Rjad nabljudenij v otnoshenii primenenija kontrolja davlenija vozduha v shinah na lesovozah v Hajlende, Shotlandija [Control of air pressure in tires of heavy trucks. A number of observations on the application of tire pressure monitoring to timber trucks in the Highlands, Scotland]. Retrieved from http://www.ador.ru/data/files/static/roadex_2.pdf [in Russian].

Alexey Prosyak, post-graduate

Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkov, Ukraine

Air Pressure Control Systems in Vehicle Tires: Their Constructional and Functional Features

The development and improvement of tire pressure and control systems in car tires is important because the tire pressure recommended by the developer plays a key role in the formation of the contact zone with the road surface.

In accordance with the set goal, the analysis of tire pressure control systems of vehicles protected by patents, manufactured by leading manufacturers of these systems, have unique design features. It is noted that over the past decade, many research organizations and teams of scientists have paid considerable attention to improving the design of tire pressure management systems, among which are:

- devices for centralized control of tire pressure, by means of which the air pressure in the tires can change during the movement of the car depending on road conditions;
- devices for decentralized control of tire pressure allow to maintain the air pressure in each wheel separately depending on the load on the wheels and the conditions of interaction of the deformed wheel with the ground.

At the same time, the presence of a large number of patents and designs of such systems requires some systematization, studying the problem of installing these systems on domestic cars. The aim of the article is to analyze the pressure control systems in the tires of vehicles, the study of their design features and functionality. To achieve this goal used a systematic approach to the analysis of this problem methods, methods of analysis of patents and designs of these systems, the method of classification, the method of generalization.

The analysis allows us to recognize the prospects for the creation of systems focused on the use of digital technologies that provide automatic monitoring and regulation of pressure, automatic detection of damaged tires, the possibility of remote access to the system. The scientific novelty of the article is determined by the fact that it systematizes the data on the designs of the studied systems, identifies points that need improvement. The research allowed to determine the directions of improvement of pressure control systems in truck tires, what is the practical significance of this article.

tire, wheel, pressure, control, system, patent

Одержано (Received) 22.02.2022

Прорецензовано (Reviewed) 03.03.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.299-310](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.299-310)**В.В. Аулін**, проф., д-р техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: AulinVV@gmail.com*

Використання методів теорії сенситивів при розв'язанні завдань технічних, транспортних і виробничих систем і процесів

На прикладі функції технічного стану систем і агрегатів машин як функції діагностичних параметрів побудовано критерій її відносної чутливості (сенситив). Розглянуто відносний критерій чутливості (сенситив) і для кожного діагностичного параметру і функції стану від вагомих факторів та від напруження. Використовуючи властивості сенситивів та методику реалізації теорії чутливості функцій, отримано частинні критерії відносної чутливості. Розглядаючи сукупність функцій діагностичних параметрів і функції надійності, як функції ймовірності безвідмовної роботи від напруження, показано, що вони параметрично задані. Встановлено зв'язок сенситивів діагностичних параметрів з рівнем надійності систем, агрегатів і машин в цілому. Розроблено блок-схему методу визначення характеру динамічного розвитку діагностичних параметрів та показників надійності технічного стану систем і агрегатів машин. На основі даних експериментальних досліджень побудовано математичні моделі відносної чутливості (сенситиву) для найбільш інформативно значущих діагностичних параметрів силових агрегатів та трансмісій. Показано, що математичні моделі сенситивів діагностичних параметрів дають можливість визначити локальні значення сенситиву на діапазонах напруження і є ефективним інструментом для відбору діапазонів напруження, на яких варто контролювати певні діагностичні параметри щоб забезпечити належний рівень надійності систем, агрегатів та машини в цілому.

сенситив, технічна система, технічний стан, діагностичний параметр, функція надійності, силовий агрегат, трансмісія

Постановка проблеми. Коефіцієнти і функції чутливості, що розглядаються в теорії чутливості, можливо використати при розв'язанні наступних завдань: для ідентифікації, контролю, випробувань, встановлення та розподілу допусків на параметри елементів технічних, транспортних і виробничих систем; аналізу точності систем управління і обладнання з урахуванням розкиду параметрів, аналізу стійкості; для вирішення завдань оптимального та адаптивного управління, ідентифікації об'єктів, випробування і налаштування технічних, транспортних і виробничих і т.д. та прогнозування їх станів і процесів з визначенням рівня надійності. В одних завданнях, при заданих функціях чутливості, досліджуються додаткові зміни параметрів, а в інших – оцінки цих змін поєднуються із знаходженням змін самих параметрів [1-3].

Зазначені групи завдань і методи використання теорії чутливості, при їх розв'язанні, мають універсальний характер. Однак при ідентифікації станів систем і агрегатів машин може мати місце невисока швидкість сходження, яка при інших рівних умовах спадає з ростом кількості контролюючих параметрів.

Серед зазначених завдань на увагу заслуговує діагностування систем і агрегатів машин, яка характеризується певною невизначеністю їх технічного стану в процесі експлуатації, а його зміну можливо контролювати діагностичними параметрами.

Контроль кожного параметра знімає частину невизначеності технічного стану систем і агрегатів машин. У свою чергу, параметри, що діагностуються, повинні формувати максимум інформації про технічний стан об'єкту і адекватно відображати реальний стан з урахуванням ймовірнісних характеристик його відмов при експлуатації [4].

Завдання вибору контрольованих параметрів для визначення технічного стану систем і агрегатів машин ставиться наступним чином: для виявленого переліку об'єктів контролю, що характеризуються кінцевою множиною контрольованих діагностичних параметрів та показників надійності, необхідно обґрунтувати їх сукупність, що мають найбільшу інформативність [5]. Для вирішення цього завдання будують інформаційну модель об'єкту і розраховують ймовірнісні характеристики його знаходження в справному і несправних станах внаслідок відмови складових частин. Потім розраховують кількість інформації, що вноситься діагностичним параметром, на підставі чого визначають сукупність параметрів, що підлягає технічному діагностуванню та визначенню технічного стану систем та агрегатів і машин в цілому.

Інформацію про процеси, які протікають в них під час експлуатації, і технічний стан систем і агрегатів машин отримують різними фізичними методами. Ефективно обробляти отриману базу даних, використовуючи методи узагальненої теорії графів та теорії чутливості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання, що стосується чутливостей функцій було сформульовано в роботі Г. Боде [1] при дослідженні властивостей лінійних систем зі зворотним зв'язком. Більш детально вони розглянуті у зв'язку з необхідністю розв'язання проблеми точності розрахунково-обчислювальних пристроїв [58]. Формування теорії чутливості як самостійного наукового напрямку набуло в технічній кібернетиці в зв'язку з бурхливим використанням адаптивних (самоналагоджувальних) систем управління, створюваних для ефективної роботи різномірних систем при параметричних впливах [3, 6].

Зміну чутливості станів систем і агрегатів технічних та технологічних машин ініційовано появою монографій [7,8] югославських вчених Р. Томовіча і М. Вукобратовіча. Найбільшого поширення теорія чутливості знайшла в робототехніці [9], де її беруть на озброєння фахівці в області надійності, контролю, діагностики та випробувань робототехнічних систем.

Метод ідентифікації, що базується на теорії чутливості і стосується досліджень динамічних об'єктів, розглянуто в роботах А.І. Рубана [10]. При цьому важливою проблемою є рівень чутливості. Широкий спектр завдань теорії управління системами з використанням теорії чутливості відображено в роботі Б.М. Петрова і П.Д. Крутька [11]. Автори вирішують завдання підбору невідомих параметрів диференціальних рівнянь адаптивного управління та з'ясовують можливість ідентифікації нестационарних параметрів.

Активізації використання теорії чутливості на широкий клас завдань управління та досліджень систем і агрегатів машин дано і в роботах Р.М. Юсупова, Ф.М. Захаріна [12], В.І. Городецького, Е.Н. Розенвассера [13], К. Спіді, Р. Брауна, Дж. Гудвіна [14], Ю.Я. Остова [15] і А.І. Рубана [16] та інші. В роботі Р.М. Юсупова і Ф.М. Захаріна [12] з'ясовано умови ідентифікованості невідомих параметрів диференціального рівняння управління систем, що відповідають впливам початкових умов, та розглянуто питання поліпшення коректності зворотних завдань управління. Зазначимо, що при експлуатаційному управлінні системами і агрегатами часто використовується метод послідовної оптимізації та виявляються можливості вирішення завдань ідентифікації постійних і змінних параметрів. Р.М. Юсупов, Ю.Я. Остов [15] і А.І. Рубан [16] на основі теорії чутливості визначають одночасно параметри звичайних диференціальних

рівнянь із врахуванням збурюючих впливів і початкових умов керування складними системами, розглянуто параметри лінійних однопараметричних об'єктів. При цьому розглянуто наступні варіанти підстроювання параметрів: початкові умови відомі і модель має структуру, яка збігається з об'єктом; початкові умови невідомі, але модель має структуру, яка збігається з об'єктом; початкові умови відомі і модель має структуру, яка не збігається з об'єктом.

Питання оптимізації регуляторів на основі теорії чутливості дано в роботі Б.М. Петрова і П.Д. Крутька [11], К. Спіді, Р. Браун і Дж. Гудвін [14] запропонували варіант застосування зв'язаних рівнянь для розрахунку складових градієнта функції якості за параметрами диференціального рівняння. Оскільки цю процедуру за початковими умовами реалізувати неможливо, звертаються до теорії чутливості.

Подальшого розвитку теорія чутливості набула у вигляді теорії відносної чутливості функцій (сенситивів), відображеної в роботах А.Г. Кузьменка [73] та В.В. Ауліна [18, 19]. Теорію сенситивів використано при вирішенні завдань оцінки точності математичних моделей процесів тертя та зношування і вимірювання триботехнічних характеристик. Проведений аналіз теорії сенситивів виявив її істотні переваги і широкі аспекти застосування у порівнянні з абсолютною чутливістю функцій, нагального розв'язання потребують ряд питань важливих технічних проблем і завдань: оцінка технічного стану та еволюція його розвитку; визначення показників надійності систем і агрегатів машин за діагностичною інформацією; уточнення зв'язків між діагностичними параметрами і показниками надійності систем і агрегатів машин.

Постановка завдання. Метою даної роботи є виявити можливості теорії чутливості функцій на конкретному прикладі дослідження зміни функції технічного стану систем і агрегатів машин за допомогою критерію відносної чутливості (сенситиву).

Виклад основного матеріалу. Дослідження зміни функції технічного стану від зміни істотних факторів та параметрів за допомогою критерію відносної чутливості (сенситиву) має специфічний фізичний, геометричний та економічний зміст, а також істотні переваги у порівнянні з методами абсолютної чутливості, в основі яких покладено зміст похідної. В першу чергу істотною перевагою є те, що критерій відносної чутливості безрозмірна величина, яка має ряд інших характерних властивостей [20], яких можна дотримуватись та використовувати при аналізі бази даних про технічний стан систем і агрегатів та машин в цілому.

Математична сутність критерію чутливості будь-якої цільової функції полягає у побудові відношення відносного приросту цільової функції $f(x)$ стану до відносного приросту фактору або параметру:

$$\text{sen } f(x) = \frac{df(x)}{f(x)} \cdot \frac{x}{dx} = \frac{df(x)}{dx} \cdot \frac{x}{f(x)} = f'(x) \cdot \frac{x}{f(x)}. \quad (1)$$

Цю форму представлення критерію відносної чутливості (сенситиву) пропонується використовувати для оптимальної оцінки будь-якого діагностичного параметру, який необхідно піддавати контролю при визначенні технічного стану систем і агрегатів машин. Взявши за основу вираз (1), критерій відносної чутливості кожного діагностичного параметру від факторів $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i$, має вигляд:

$$\text{sen } D_i(\alpha_i) = \frac{D'_i(\alpha_i)}{D_i(\alpha_i)} \cdot \alpha_i = f'_{\alpha_i}(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i) \cdot \frac{\alpha_i}{f(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i)}; \quad (2)$$

$$\text{sen } D_i(\beta_i) = \frac{D'_i(\beta_i)}{D_i(\beta_i)} \cdot \beta_i = f'_{\beta_i}(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i) \cdot \frac{\beta_i}{f(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i)}; \quad (3)$$

$$\text{sen } D_i(\gamma_i) = \frac{D_i'(\gamma_i)}{D_i(\gamma_i)} \cdot \gamma_i = f'_{\gamma_i}(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i) \cdot \frac{\gamma_i}{f(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i)}; \quad (4)$$

$$\text{sen } D_i(\delta_i) = \frac{D_i'(\delta_i)}{D_i(\delta_i)} \cdot \delta_i = f'_{\delta_i}(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i) \cdot \frac{\delta_i}{f(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i)}. \quad (5)$$

Зосередимо увагу на тому факті, що крім загального характеру дослідження функцій технічного стану систем, агрегатів і машин в цілому, встановлюється закономірність відносної зміни їх приросту від відносного приросту сукупності діагностичних параметрів. При цьому спостерігають закономірності зміни відносної чутливості функцій стану з напрацюванням. На цій основі будується необхідний математичний апарат з використанням властивостей абсолютної і відносної чутливостей функції технічного стану $S(D)$, як функції діагностичних параметрів, які є також функціями від напрацювання $D(t)$. Найбільш поширеною мірою абсолютної чутливості функцій стану до зміни факторів та функцій діагностичних параметрів $D(t)$ є їх кінцевий приріст або диференціал:

$$dS(D(t)) = \frac{dS(D(t))}{dD(t)} dD(t). \quad (6)$$

Абсолютна чутливість функції стану, тобто похідна від функції стану, як правило, має розмірність абсолютної чутливості діагностичного параметру:

$$\frac{dS(D(t))}{dD(t)} = S'(D(t)). \quad (7)$$

Якщо функція стану залежить від вектора діагностичних параметрів $\vec{D}(t) = (D_1(t), D_2(t), \dots, D_n(t))$, як функцій, то розрізняють цілу систему часткових абсолютних чутливостей функції стану:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S(D_1(t), D_2(t), \dots, D_n(t))}{\partial D_1(t)} &= S'_{D_1}(D_1(t), D_2(t), \dots, D_n(t)); \frac{\partial S(D_1(t), D_2(t), \dots, D_n(t))}{\partial D_2(t)} = \\ &= S'_{D_2}(D_1(t), D_2(t), \dots, D_n(t)); \dots; \frac{\partial S(D_1(t), D_2(t), \dots, D_n(t))}{\partial D_n(t)} = S'_{D_n}(D_1(t), D_2(t), \dots, D_n(t)). \end{aligned} \quad (8)$$

Критерій відносної чутливості цільової функції технічного стану $S(D(t))$ дорівнює:

$$\text{sen } S(D(t)) = \frac{dS(D(t))}{S(D(t))} \bigg/ \frac{dD(t)}{D(t)} = S'(D(t)) \cdot \frac{D(t)}{S(D(t))}, \quad (9)$$

де $dS(D(t))/S(D(t))$, $dD(t)/D(t)$ – відносні прирости цільової функції стану, діагностичного параметру, функції напрацювання.

У разі залежності функції стану від вектора діагностичних параметрів, часткові критерії відносної чутливості (сенситиви) дорівнюють:

$$\begin{aligned} \text{Sen } S_{D_1}(D_i(t)) &= S'_{D_1}(D_i(t)) \cdot \frac{D_1(t)}{S_{D_1}(D_i(t))}; \text{Sen } S_{D_2}(D_i(t)) = S'_{D_2}(D_i(t)) \cdot \frac{D_2(t)}{S_{D_2}(D_i(t))}; \dots; \\ \text{Sen } S_{D_n}(D_i(t)) &= S'_{D_n}(D_i(t)) \cdot \frac{D_i(t)}{S_{D_n}(D_i(t))}. \end{aligned} \quad (10)$$

Корисним при застосуванні критерію відносної чутливості є правило диференціювання логарифмічної функції стану технічного об'єкта:

$$\text{sen } S(D(t)) = \frac{d(\ln S(D(t)))}{d \ln D(t)} = \frac{(\ln S(D(t)))' S(D(t))}{(\ln D(t))' D(t)}. \quad (11)$$

В такому представленні критерій чутливості подається як відношення похідної (частинної похідної) від логарифму функції стану до похідної логарифму діагностичних параметрів. Зазначимо, що на практиці має сенс використання абсолютної та відносної

чутливості першого і другого порядків. Абсолютна чутливість першого порядку від функції стану визначає швидкість зміни приросту функції стану від зміни значень діагностичних параметрів, а абсолютна чутливість другого порядку від функції стану – швидкість швидкості зміни функції стану або прискорення зміни приросту функції стану зі зміною приросту діагностичного параметру. Абсолютну чутливість другого і більш високих порядків можна використовувати для аналізу сходження розрахункових алгоритмів. Оскільки відносна чутливості першого і другого порядку функції стану від діагностичних параметрів є безрозмірними, то їх ефективно можна використовувати як критерії відносної чутливості при аналізі бази даних інформаційних технологій і методів обробки на ПК.

Корисним при розв'язанні технічних завдань є використання властивостей сенситивів (критеріїв відносної чутливості). При розгляді сукупності діагностичних параметрів технічного стану систем і агрегатів машин критерій відносної чутливості узагальнюється:

– функція технічного стану:

$$S(D(t)) = U_1(D(t)) + U_2(D(t)) + U_3(D(t)) + U_4(D(t)) + U_5(D(t)) + \dots = \sum_{i=1}^n U_i(D(t)); \quad (12)$$

– відносна чутливість функції технічного стану:

$$\begin{aligned} Sen(S(D(t))) = Sen(S(U_1(D(t)))) \frac{U_1(D(t))}{\sum U_i(D(t))} + Sen(S(U_2(D(t)))) \frac{U_2(D(t))}{\sum U_i(D(t))} + \\ + Sen(S(U_3(D(t)))) \frac{U_3(D(t))}{\sum U_i(D(t))} + \dots + Sen(S(U_5(D(t)))) \frac{U_5(D(t))}{\sum U_i(D(t))} + \dots, \end{aligned} \quad (13)$$

де $Sen(S(D(t)))$, $Sen(S(U_i(t)))$ – загальний та часткові відносна чутливості функції стану від діагностичних параметрів $D(t)$;

$U_i(D(t))$, $i = \overline{1, N}$ – функції їх зміни для різних систем і агрегатів машин.

Використовуючи методику реалізації теорії чутливості функцій технічного стану можливо отримати частинні критерії відносної чутливості по кожному з діагностичних параметрів при різному напрацюванні. При цьому функцію діагностичного параметру та загальну функцію надійності (ймовірність безвідмовної роботи) машин або систем і агрегатів можна вважати параметрично заданими:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= D_i(t) \\ y_j &= P_j(t) \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

де i – індекс діагностичного параметру $D_i(t)$ технічного стану систем і агрегатів;

j – індекс системи або агрегату P_j – ймовірність їх безвідмовної роботи.

Використовуючи правила знаходження критерію відносної чутливості та його властивості, використовуючи параметричні рівняння (14) можна отримати критерій відносної чутливості діагностичного параметру як функції напрацювання:

$$sen D_i(t) = \frac{P_j(t)'}{D_i(t)'} \cdot \frac{D_i(t)}{P_j(t)} = \frac{\frac{dP_j(t)}{dt} \cdot D_i(t)}{\frac{dD_i(t)}{dt} \cdot P_j(t)}. \quad (15)$$

Рівняння (15) описує залежність відносної чутливості діагностичних параметрів від функції надійності агрегатів, систем або машин в цілому. Разом з тим необхідно зазначити уточнення тенденції зміни функції діагностичного параметру $D_i(t)$ від напрацювання. Для цього використаємо метод екстраполяції, який у своїй основі має припущення про те, що процес зміни діагностичного параметра є поєднанням двох складових регулярної і випадкової:

$$D_i(t) = D_i(\bar{a}, t) + d_i(t). \quad (16)$$

Вважається, що регулярна складова діагностичного параметра $D(\bar{a}, t)$ – це функція від напрацювання, що описується вектором параметрів $\bar{a}$, які зберігають свої значення на екстраполяційний період. Ця складова є трендом або тенденцією. При цьому існує інтуїтивне уявлення про функцію, очищену від випадкових впливів шуму, перешкод, що впливають на сутність процесу зміни діагностичного параметру. В той час не можна однозначно відокремити тенденцію від випадкових впливів, оскільки випадкова складова $d_i(t)$ описує некорельовані процеси з нульовим математичним очікуванням. Її оцінка потрібна для подальшого визначення точності отриманої функції діагностичного параметру $D_i(t)$. Екстраполяційні методи дають можливість виділити найкращу тенденцію і при визначенні досліджуваних значень діагностичних параметрів шляхом їх екстраполяції. Попередня обробка наявних даних проводиться з метою перетворення їх до більш зручного виду для аналізу логіки і фізики процесу зміни діагностичного параметру. Це впливатиме на вибір виду екстраполюючої функції діагностичного параметру, а також і на визначення меж його зміни.

Отже, дослідження функції технічного стану систем, агрегатів і машин в цілому, ґрунтуються на основі дослідження діагностичних параметрів можливе за рахунок використання теорії відносної чутливості. Перевагою використання критерію відносної чутливості в аналізі технічного стану є те, що він є безрозмірною величиною і відображає фактичну відносну зміну діагностичного параметру відносно досліджуваної величини напрацювання та показника надійності систем, агрегатів і машин в цілому.

Виявлення напрямку розвитку технічного стану систем і агрегатів машин базується на використанні зазначеної методики та методів теорії чутливості й обчисленні критерію відносної чутливості (сенситив) з напрацюванням. Зміна кожного діагностичного параметра не є постійною величиною через те, що машини експлуатуються в різних умовах та режимах.

Аналіз динамічного розвитку діагностичних параметрів як функції напрацювання дав можливість запропонувати метод застосування її сенситиву і представити його у вигляді блок-схеми (рис.1).

Оскільки інтегральною характеристикою і оцінкою ресурсних показників машин є ймовірність безвідмовної роботи їх систем та агрегатів, то для того, щоб визначити напрямок розвитку інтегрального показника надійності, доцільно представити функцію надійності відносно діагностичних параметрів у параметричній формі (14). До даного представлення доцільно застосувати методи чутливості і визначити критерій відносної чутливості діагностичного параметру. Критерій не має розмірності і відображає характер розвитку диференціального діагностичного параметра системи і агрегатів машин відносно такого інтегрального показника як ймовірність безвідмовної роботи.

Можна бачити, що вирішення проблеми визначення розвитку технічного стану систем, агрегатів та машин в цілому за допомогою методів теорії чутливості і відповідного критерію відносної чутливості дає можливість розв'язати науково-технічної завдання удосконалення експлуатації машин.

Критерій відносної чутливості (синситив) діагностичних параметрів систем і агрегатів, спряжень їх деталей та машин в цілому відображає взаємозв'язок між показниками їх надійності та діагностичними параметрами технічного стану [21]. Враховуючи показники надійності систем і агрегатів машин та інформаційну базу значущих діагностичних параметрів, отримано залежності сенситивів досліджуваних діагностичних параметрів від напрацювання машин. Обробку даних проводили за допомогою пакетів прикладних програм на ПК. Отримані залежності сенситивів

діагностичних параметрів ЦПГ та системи мащення двигуна машин, що експлуатуються в умовах агропромислового виробництва, зведено в таблицю 1.



Рисунок 1 – Блок-схема методу визначення характеру динамічного розвитку діагностичних параметрів та показників надійності технічного стану систем і агрегатів машин

Джерело: розроблено автором

Таблиця 1 – Математичні моделі відносної чутливості (сенситивів) інформативно значущих діагностичних параметрів силових агрегатів машин з напрацювання

Циліндро-поршнева група	
Компресії в циліндрах силового агрегату	
КамАЗ-740	
$senD(t)_{КЦД.К.740} = \frac{(-5,5 \cdot 10^{-11}t + 1,3 \cdot 10^{-6})(-2,4 \cdot 10^{-5}t - 1,47 \cdot 10^{-10}t^2 + 29,91)}{(-2,94 \cdot 10^{-10}t - 2,4 \cdot 10^{-5})(1,31 \cdot 10^{-6}t - 2,75 \cdot 10^{-11}t^2 + 0,987)}$	1
ЯМЗ-236	
$senD(t)_{КЦД.Я.236} = \frac{(-5,5 \cdot 10^{-11}t + 1,3 \cdot 10^{-6})(-4,6 \cdot 10^{-2}t - 3,31 \cdot 10^{-6}t^2 + 28,89)}{(-6,62 \cdot 10^{-6}t - 4,6 \cdot 10^{-2})(1,31 \cdot 10^{-6}t - 2,75 \cdot 10^{-11}t^2 + 0,987)}$	2
Система мащення силового агрегату	
Масова частка механічних домішок в моторній оливі	
$senD(t)_{ДОД} = \frac{(1,3 \cdot 10^{-4}t - 8,5 \cdot 10^{-10}t^2 - 0,63)(-3,98 \cdot 10^{-10}t + 5,85 \cdot 10^{-15}t^2 + 21,9 \cdot 10^{-7})}{(-1,71 \cdot 10^{-9}t - 1,3 \cdot 10^{-4})(2,19 \cdot 10^{-6}t - 1,99 \cdot 10^{-10}t^2 + 1,95 \cdot 10^{-15}t^3 + 0,998)}$	3
Діелектрична проникність моторної оливи	
$senD(t)_{ДПОД} = \frac{(-3,98 \cdot 10^{-10}t + 5,85 \cdot 10^{-15}t^2 + 21,9 \cdot 10^{-7})(-3,78 \cdot 10^{-4}t + 1,14 \cdot 10^{-10}t^2 - 2,23)}{(2,28 \cdot 10^{-10}t + 3,78 \cdot 10^{-4})(2,19 \cdot 10^{-6}t - 1,99 \cdot 10^{-10}t^2 + 1,95 \cdot 10^{-15}t^3 + 0,998)}$	4
Температура спалаху моторної оливи	
$senD(t)_{СОД} = \frac{(-3,98 \cdot 10^{-10}t + 5,85 \cdot 10^{-15}t^2 + 21,9 \cdot 10^{-7})(-2,0 \cdot 10^{-5}t - 2,29 \cdot 10^{-8}t^2 - 223,4)}{(-4,58 \cdot 10^{-8}t - 2,0 \cdot 10^{-5})(2,19 \cdot 10^{-6}t - 1,99 \cdot 10^{-10}t^2 + 1,95 \cdot 10^{-15}t^3 + 0,998)}$	5
Лужне число моторної оливи	
$senD(t)_{ЛОД} = \frac{(-3,98 \cdot 10^{-10}t + 5,85 \cdot 10^{-15}t^2 + 21,9 \cdot 10^{-7})(-2,0 \cdot 10^{-5}t - 2,29 \cdot 10^{-8}t^2 - 223,4)}{(-4,58 \cdot 10^{-8}t - 2,0 \cdot 10^{-5})(2,19 \cdot 10^{-6}t - 1,99 \cdot 10^{-10}t^2 + 1,95 \cdot 10^{-15}t^3 + 0,998)}$	6

Джерело: розроблено автором

Отримані залежності відносної чутливості (сенситивів) діагностичних параметрів трансмісії машин, зведено в таблицю 2.

Таблиця 2 – Математичні моделі відносної чутливості (сенситивів) інформативно значущих діагностичних параметрів трансмісії машин з напрацюванням

Коробка переключення передач, головна передача	
Масова частка механічних домішок в трансмісійній оливі	
$senD(t)_{ДПОТ} = \frac{(4,59 \cdot 10^{-6}t + 3,28 \cdot 10^{-10}t^2 - 0,04)(-1,04 \cdot 10^{-9}t + 1,37 \cdot 10^{-14}t^2 + 14,1 \cdot 10^{-6})}{(6,56 \cdot 10^{-10}t + 45,9 \cdot 10^{-7})(1,14 \cdot 10^{-5}t - 5,21 \cdot 10^{-10}t^2 + 4,57 \cdot 10^{-15}t^3 + 0,884)}$	1
Діелектрична проникність трансмісійної оливи	
$senD(t)_{ДПОТ} = \frac{(-1,042 \cdot 10^{-9}t + 1,37 \cdot 10^{-14}t^2 + 14,1 \cdot 10^{-6})(2,19 \cdot 10^{-6}t + 3,64 \cdot 10^{-12}t^2 + 2,44)}{(7,28 \cdot 10^{-12}t + 21,9 \cdot 10^{-7})(1,41 \cdot 10^{-5}t - 5,21 \cdot 10^{-10}t^2 + 4,57 \cdot 10^{-15}t^3 + 0,884)}$	2
Лужне число трансмісійної оливи	
$senD(t)_{ЛОТ} = \frac{(1,11 \cdot 10^{-5}t - 5,1 \cdot 10^{-11}t^2 - 0,132)(-1,04 \cdot 10^{-9}t + 1,37 \cdot 10^{-14}t^2 + 14,1 \cdot 10^{-6})}{(-1,02 \cdot 10^{-10}t + 1,11 \cdot 10^{-6})(1,41 \cdot 10^{-5}t - 5,21 \cdot 10^{-10}t^2 + 4,57 \cdot 10^{-15}t^3 + 0,884)}$	3

Джерело: розроблено автором

Спираючись на математичні моделі відносної чутливості (сенситивів) інформативно значущих діагностичних параметрів (таблиці 1-2), отримаємо їх значення на діапазонах напрацювання машин. Оскільки значення сенситивів відображають відносну залежність і відсутність одиниць вимірювання, то це свідчить про можливість дослідження різнорідних діагностичних параметрів. Математичний апарат теорії відносної чутливості (сенситивів) у цьому напрямі є ефективним інструментом розв'язання прикладних технічних завдань.

Значення відносної чутливості (сенситивів) найбільш інформативних діагностичних параметрів технічного стану силового агрегату машин наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Оцінка локальних значень сенситивів інформативно значущих діагностичних параметрів систем та агрегатів машин

Напрацювання, тис.км	Сенситив компресії в циліндрах двигуна		Сенситив масової частки механічних домішок оливи	Сенситив діелектричної проникності оливи	Сенситив температури спалаху	Сенситив лужного числа оливи
	КамАЗ-740	ЯМЗ-236				
0	-1.654	$-8.335 \cdot 10^{-4}$	-0.011	-0.013	-24.516	-0.046
12	-0.567	$4.921 \cdot 10^{-3}$	-0.022	-0.018	0.743	0.037
24	0.207	$-3.823 \cdot 10^{-3}$	-0.131	-0.101	0.726	0.106
36	0.793	-0.024	-0.272	-0.17	0.446	-0.098
48	1.262	-0.056	-0.241	-0.103	0.122	-0.035
60	1.66	-0.103	1.455	0.223	-0.121	0.076

Джерело: розроблено автором

Аналіз отриманих значень відносної чутливості (сенситивів) діагностичних параметрів дав можливість оцінити та відібрати ті напрацювання, які за критерієм відносної чутливості, який є позитивним, на яких варто контролювати певні діагностичні параметри. Зазначимо, що розглядаються напрацювання машин, при значному впливі діагностичних параметрів на їх технічний стан. Проведеними дослідженнями виявлено, що при експлуатації силових агрегатів КамАЗ-740 компресію необхідно контролювати на діапазоні напрацювання 24...48 тис.км., а для ЯМЗ-236 – контрольне напрацювання буде на 12 тис.км. Контроль механічних домішок у моторній оливи та її діелектричну проникність варто проводити на 60 тис.км. Визначено, що температуру спалаху моторної оливи необхідно контролювати на інтервалі напрацювання 12...48 тис.км пробігу, а її лужне число – на 12...24 та 60 тис.км. Критерій відносної чутливості (сенситив) діагностичних параметрів силових агрегатів дає можливість виявити напрацювання, де планово-попереджувальна стратегія ТО не підтримує у своїх межах експлуатаційну надійність машин, але при цьому спостерігаються найбільші зміни технічного стану їх систем, агрегатів та машин в цілому.

Отримані значення сенситивів діагностичних параметрів технічного стану трансмісії ТМ наведені в таблиці 4.

Таблиця 4 – Оцінка відносної чутливості інформативно значущих діагностичних параметрів трансмісії з напрацюванням машин

Напрацювання, тис.км	Сенситив масової частки механічних домішок в оливі	Сенситив діелектричної проникності оливи	Сенситив лужного числа оливи
0	-0.139	-0.013	-0.046
12	0.014	-0.018	0.037
24	-0.067	-0.101	0.106
36	-0.139	-0.17	-0.098
48	-0.045	-0.103	-0.035
60	0.352	0.223	0.076

Джерело: розроблено автором

Аналізуючи отримані значення відносної чутливості (сенситивів) інформативно значущих діагностичних параметрів технічного стану трансмісії, можливо формувати такі діапазони напрацювань, на яких слід здійснювати контроль досліджуваних діагностичних параметрів. Проведеними дослідженнями виявлено, що контроль масової частки механічних домішок в трансмісійній оливи слід проводити на інтервалах напрацювання 0...12 та 48...60 тис.км, а її діелектричної проникності оливи на 48...60 тис.км. Що стосується контролю лужного числа трансмісійної оливи, то його потрібно проводити на інтервалі 12...24 та 48...60 тис. км.

Висновки.

1. Розроблений підхід дослідження і контролю технічного стану систем і агрегатів та машин в цілому, який полягає в тому, що використовуючи взаємозв'язок діагностичних параметрів і показників надійності та, визначаючи відносні чутливості (сенситиви), є реальна можливість виявлення і усунення слабких місць в планово-попереджувальній стратегії технічного обслуговування та ремонту.

2. Показано, що за критерієм відносної чутливості інформативно значущих діагностичних параметрів можливо визначити діапазони напрацювань, на який доцільно проводити контроль та регулювання технічного стану машин, на яких слід проводити відповідні технічні дії по його покращенню.

3. Отримані результати дають підстави стверджувати, що впровадження критеріїв відносної чутливості (сенситиву) в теорію експлуатаційної надійності машин сприяє її подальшому розвитку.

4. Запропонований підхід визначення критеріїв відносної чутливості (сенситиву) інформативнозначущих діагностичних параметрів силового агрегату та трансмісії машин є ефективним в подальшому розвитку теорії їх експлуатаційної надійності та удосконаленні системи технічного обслуговування та ремонту машин.

Список літератури

1. Бодэ Г. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью. М., Издательство иностр. лит, 1948. 112 с.
2. Бурков В.И., Егорышева А.В., Каргин Ю.Ф. Оптические и хиротропические свойства кристаллов со структурой силленита. *Кристаллография*. 2001. Т.46. № 2. С 356 - 380.
3. Гехер К. Теория чувствительности и допусков электронных цепей. М.: Сов. радио, 1973. 245 с.
4. Гриньків А.В., Аулін В.В., Лисенко С.В., Голуб Д.В., Мартиненко О.Д. Теоретико-фізичний підхід до діагностичної інформації про технічний стан агрегатів мобільної сільськогосподарської техніки. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. 2015. № 158. С. 252-262.
5. Кальянов В.П. Перспективный двигатель для транспортного средства. *Межвузовский научный сборник "Актуальные проблемы транспорта и пути их решения"*, Саратов, 2001. С.61-69.
6. Молодан А.А. Повышение надежности элементов трактора методами уравнивания их чувствительностей. *Вісник ХНАДУ*, 2005. С.95-100.
7. Tomovich R. Sensitivity analyses of dynamic systems. New York.: Mc.Graw. Hill. 1963. 313с.
8. Томович Р., Вукобратович М. Общая теория чувствительности М.: Советское радио, 1972. 240с.
9. Агафонов Е.Д., Кирик Е.С. Об учете начальных условий в задаче непараметрической идентификации нелинейных динамических процессов с использованием метода линеаризации. Идентификация систем и задачи управления: *Труды III международной конференции*. 28 - 30 января 2004. М., 2004.-С. 845-856.
10. Рубан А.И. Идентификация нелинейных динамических объектов на основе алгоритма чувствительности. Томск: Издательство ТУ, 1975. 271 с.
11. Петров Б.Н., Крутько П.Д. Применение теории чувствительности в задачах автоматического управления. *Техническая кибернетика*. 1970. №2. С.134 - 140.
12. Юсупов Р.М., Захарин Ф.М. Методы теории чувствительности в задачах идентификации динамических систем. Теория и применение адаптивных систем, 1971. С.145-158.
13. Городецкий В.К., Захарин Ф.М., Розенвассе Е.Н. Методы теории чувствительности в автоматическом управлении. Ленинград: Энергия, 1971. 179 с.
14. Спиди К., Браун Р., Гудвин Дж. Теория управления. М.: Мир, 1973. 248с.
15. Остов Ю.Я., Юсупов Р.М. Решение задачи наблюдения и идентификации возмущающих

- воздействий методом инверсной чувствительности. Вопросы кибернетики; Адаптивные системы, 1971. С. 175 - 186.
16. Рубан А.И. Идентификация распределенных динамических объектов на основе алгоритма чувствительности. Техническая кибернетика. Киев. АН СССР. 1971. №6. С.191-196.
 17. Теоретическая и экспериментальная трибология. Надежность узлов трения по прочности и износу: монография В 12т. / гол. ред. А.Г. Кузьменко Хмельницкий: ХНУ. 2011. Т.7. 391с.
 18. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах: Монографія. Кіровоград: Видавець Лисенко В.Ф. 2014. 370с.
 19. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лівіцький О.М. Математичний апарат для оцінки діагностичних параметрів та визначення оптимальної їх кількості. *Зб. матеріалів IV Міжнар. наук.-техн. інтернет-конф. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології* 17-19 листопада 2015 р., м. Харків: ХНАДУ, 2015. С.126-129.
 20. Аулін В.В., Гриньків А.В. Теоретичний аналіз діагностичних параметрів технічного стану систем та агрегатів засобів транспорту за допомогою методів теорії чутливості. *Науковий вісник НУБіПВ. Серія: техніка та енергетика АПК*. 2017. Вип. 262. С.227-239.
 21. Аулін В.В., Гриньків А.В. Методика вибору діагностичних параметрів технічного стану транспортних засобів на основі теорії сенситивів. *Науковий журнал "Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів"*. 2016. №5. С.109-117.

References

1. Bode, G. (1948). *Teoriya tsepey i proektirovanie usiliteley s obratnoy svyazu [Circuit theory and feedback amplifier design]*. M., Izdatelstvo inostr. lit. [in Russian].
2. Burkov, V.I., Egoryisheva, A.V. & Kargin, Yu.F. (2001). Opticheskie i hirotropicheskie svoystva kristallov so strukturoy sillenita [Optical and chirotopic properties of crystals with a sillenite structure]. *Kristallografiya - Crystallography, Vol.46, 2*, 356-380. [in Russian].
3. Geher, K. (1973). *Teoriya chuvstvitelnosti i dopuskov elektronnyih tsepey [Theory of sensitivity and tolerances of electronic circuits]*. Moscow : Sov. radio [in Russian].
4. Hryniv, A.V., Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Holub, D.V. & Martynenko, O.D. (2015) *Teoretyko-fizychnyi pidkhid do diahnostychnoi informatsii pro tekhnichniy stan ahrehativ mobilnoi silskohospodarskoi tekhniki [Theoretical and physical approach to diagnostic information about the technical camp of aggregates in mobile agricultural equipment]*. *Visnyk KhNTUSH im. P. Vasilenka - Bulletin of KhNTUSG im. P. Vasilenka*, 158, 252-262 [in Ukrainian].
5. Kalyanov, V.P. (2001). *Perspektivnyi dvigatel dlya transportnogo sredstva [A promising engine for a vehicle]*. *Mezhvuzovskiy nauchnyy sbornik "Aktualnyye problemy transporta i puti ih resheniya" - Interuniversity scientific collection "Actual problems of transport and ways to solve them"*, Saratov, 61-69 [in Russian].
6. Molodan, A.A. (2005). *Povyishenie nadezhnosti elementov traktora metodami uravneniya ih chuvstvitelnostey [Improving the reliability of tractor elements by methods of equating their sensitivities]*. *Visnik HNADU - Bulletin of the KhNADU*, 95-100 [in Russian].
7. Tomovich R. (1963). *Sensitivity analyses of dynamic systems*. New York.: Mc.Graw. Hill. [in English].
8. Tomovich, R. & Vukobratovich, M. (1972). *Obschaya teoriya chuvstvitelnosti [General theory of sensitivity]*. Moskwa: Sovetskoe radio [in Russian].
9. Agafonov, E.D. & Kirik, E.S. (2004). *Ob uchete nachalnyih usloviy v zadache neparametricheskoy identifikatsii nelineynyih dinamicheskikh protsessov s ispolzovaniem metoda linearizatsii [On taking into account the initial conditions in the problem of non-parametric identification of nonlinear dynamic processes using the linearization method]*. *Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya: Trudy III mezhdunarodnoy konferentsii - Identification of systems and control tasks: Proceedings of the III international conference*. 28 - 30 yanvarya 2004. M., S. 845-856 [in Russian].
10. Ruban, A.I. (1975). *Identifikatsiya nelineynyih dinamicheskikh ob'ektov na osnove algoritma chuvstvitelnosti [Identification of non-linear dynamic objects based on the sensitivity algorithm]*. Tomsk: Izdatelstvo TU [in Russian].
11. Petrov, B.N. & Krutko, P.D. (1970). *Primenenie teorii chuvstvitelnosti v zadachah avtomaticheskogo upravleniya [Application of sensitivity theory in automatic control problems]*. *Tekhnicheskaya kibernetika - Technical cybernetics*. №2. S.134-140 [in Russian].
12. Yusupov, P.M. & Zaharin, F.M. (1971). *Metodyi teorii chuvstvitelnosti v zadachah identifikatsii dinamicheskikh sistem [Methods of sensitivity theory in problems of identification of dynamical systems]*. *Teoriya i primeneniye adaptivnyih sistem - Theory and application of adaptive systems*, 145-158 [in Russian].
13. Gorodetskiy, V.K., Zaharin, F.M. & Rozenvasse, E.N. (1971). *Metodyi teorii chuvstvitelnosti v avtomaticheskoy upravlenii [Methods of sensitivity theory in automatic control]*. Leningrad: Energiya [in

- Russian].
14. Spidi, K., Braun, R. & Gudvin, Dzh. (1973). *Teoriya upravleniya [Control Theory]*. Moskva: Mir [in Russian].
 15. Ostov, Yu.Ya. & Yusupov, P.M. (1971). Reshenie zadachi nablyudeniya i identifikatsii vozmushchayushih vozdeystviy metodom inversnoy chuvstvitelnosti [Solution of the problem of observation and identification of disturbing influences by the method of inverse sensitivity]. *Voprosy kibernetiki. Adaptivnyie sistemy - Questions of cybernetics; adaptive systems*, 175-186 [in Russian].
 16. Ruban, A.I. (1971). Identifikatsiya raspredelennyih dinamicheskikh ob'ektov na osnove algoritma chuvstvitelnosti [Identification of distributed dynamic objects based on sensitivity algorithm]. *Tekhnicheskaya kibernetika - Technical cybernetics*, 6, 191-196 [in Russian].
 17. Kuzmenko, A.G. (2011). Teoreticheskaya i eksperimentalnaya tribologiya. Nadezhnost uzlov treniya po prochnosti i iznosu: monografiya [Theoretical and experimental tribology. Reliability of friction units in terms of strength and wear: monograph]. (Vols 12). A.G. Kuzmenko (Eds.). Hmel'niitskiy: HNU. Vol.7, 391 [in Russian].
 18. Aulin, V.V. (2014). *Fizichni osnovy protsesiv i staniv samoorhanizatsii v trybotekhnichnykh systemakh: Monografiya [Physical bases of processes and states of self-organization in tribotechnical systems: Monograph]*. Kirovohrad: Vydavets Lysenko V.F. [in Ukrainian].
 19. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V. & Livitskiy, O.M. (2015) Matematychnyi aparat dlia otsinky diahnostychnykh parametriv ta vyznachennia optymalnoi yikh kilkosti [Mathematical apparatus for estimating diagnostic parameters and determining their optimal number]. *Zb. materialiv IV Mizhnar. nauk.-tekhn. internet-konf. Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnologhii - Coll. materials IV International. scientific and technical internet conference Car and electronics. Modern technologies*, 17-19 lystopada 2015 r., m. Kharkiv: KhNADU, 2015. S.126-129 [in Ukrainian].
 20. Aulin, V.V. & Hrynkiv, A.V. (2017). Teoretychnyi analiz diahnostychnykh parametriv tekhnichnoho stanu system ta ahrehativ zasobiv transportu za dopomohoiu metodiv teorii chutlyvosti [Theoretical analysis of diagnostic parameters of technical condition of systems and units of vehicles using the methods of sensitivity theory]. *Naukovyi visnyk NUBiPU. Seriya: tekhnika ta enerhetyka APK - Scientific Bulletin of NULES. Series: machinery and energy of agro-industrial complex*, Issue. 262, 227-239 [in Ukrainian].
 21. Aulin, V.V. & Hrynkiv, A.V. (2016). Metodyka vyboru diahnostychnykh parametriv tekhnichnoho stanu transportnykh zasobiv na osnovi teorii sensytyviv [Methods of choosing diagnostic parameters of technical condition of vehicles based on the theory of sensitivities]. *Naukovyi zhurnal "Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv" – Scientific journal "Technical service of agro-industrial, forest and transport complexes"*, 5, 109-117 [in Ukrainian].

Viktor Aulin, Prof., DSc.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

The Use of Methods of Theory of Sensitivities in Solving Problems of Technical, Transport and Production Systems and Processes

The criterion of its relative sensitivity (sensitivity) is constructed on the example of the function of technical condition of systems and units of machines as a function of diagnostic parameters. The relative criterion of sensitivity (sensitivity) for each diagnostic parameter and function of the state of weighting factors and operating time is considered.

Using the properties of sensitivities and the method of realization of the theory of sensitivity of functions, partial criteria of relative sensitivity are obtained. Considering the set of functions of diagnostic parameters and reliability functions as functions of probability of trouble-free operation, it is shown that they are parametrically set. The connection of sensitivities of diagnostic parameters with the level of reliability of systems, units and machines in general is established.

The block diagram of a method of definition of character of dynamic development of diagnostic parameters and indicators of reliability of a technical condition of systems and units of cars is developed. Mathematical models of relative sensitivity (sensitivity) for the most informatively significant diagnostic parameters of power units and transmissions are built on the basis of experimental research data.

It is shown that mathematical models of sensitivity of diagnostic parameters allow to determine local values of sensitivity on operating ranges and are an effective tool for selection of operating ranges on which certain diagnostic parameters should be controlled to ensure proper reliability of systems, units and machines as a whole.

sensitivity, technical system, technical condition, diagnostic parameter, reliability function, power unit, transmission

Одержано (Received) 09.02.2022

Прорецензовано (Reviewed) 16.02.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

УДК 656.052

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.311-317](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.311-317)

О.Л. Ляшук, проф., д-р техн. наук, **О.П. Цьонь**, доц., канд. техн. наук, **В.О. Дзюра**, доц., канд. техн. наук, **М.В. Бабій**, канд. техн. наук

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна
e-mail: tson_oleg_@ukr.net*

М.Є. Кристопчук, доц., канд. техн. наук

*Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна
e-mail: m.ie.krystopchuk@nuwm.edu.ua*

С.В. Лисенко, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Ю.Д. Бодоряк

Науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України, м. Тернопіль, Україна

Дослідження безпеки дорожнього руху на автошляхах

Проаналізовано показники безпеки дорожнього руху на автошляхах України, на прикладі Тернопільської області. Встановлено, що на даний час у світі дорожньо-транспортні пригоди являються однією із основних причин смертності та інвалідності людей, та створюють щорічні втрати ВВП у розмірі від 1 до 3%. Досліджено, що за січень – липень 2021 року на вулично-дорожній мережі Тернопільської області зареєстровано 1509 дорожньо-транспортних пригод, що на 19% більше ніж за аналогічний період минулого року (2020 рік – 1271 ДТП). Запропоновано організаційні заходи для підвищення безпеки руху на вулично-дорожній мережі.

безпека руху, вулично-дорожня мережа, дорожньо-транспортні пригоди

Постановка проблеми. Транспорт є однією із найбільш розвинутих галузей народного господарства, що забезпечує реалізацію потреб населення та виробництва в усіх видах перевезень, а також виступає головним чинником функціонування матеріального виробництва та сфери обслуговування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Важлива роль у формуванні зовнішньоекономічних зв'язків України та Тернопільської області зокрема належить транспорту без якого неможлива інтеграція України у загальносвітову економічну систему [1, 2]. Негативними наслідком від збільшення кількості транспортних засобів на автошляхах є підвищення кількості дорожньо-транспортних пригод.

Постановка завдання. На даний час у світі дорожньо-транспортні пригоди являються однією із основних причин смертності та інвалідності людей, та створюють щорічні втрати ВВП у розмірі від 1 до 3%. Загальновідомою є інформація про те, що близько 75% усіх ДТП відбувається у містах, тому питання організації та безпеки дорожнього руху є головними містобудівними завданнями, що потребують вирішення [3].

Виклад основного матеріалу. Відповідно до статистичних даних за січень – липень 2021 року на вулично-дорожній мережі Тернопільської області зареєстровано 1509 дорожньо-транспортних пригод, що на 19% більше ніж за аналогічний період минулого року (2020 рік – 1271 ДТП). Динаміка ДТП та їх наслідків за останні три роки на автошляхах Тернопільської області подана на рисунку 1-4.

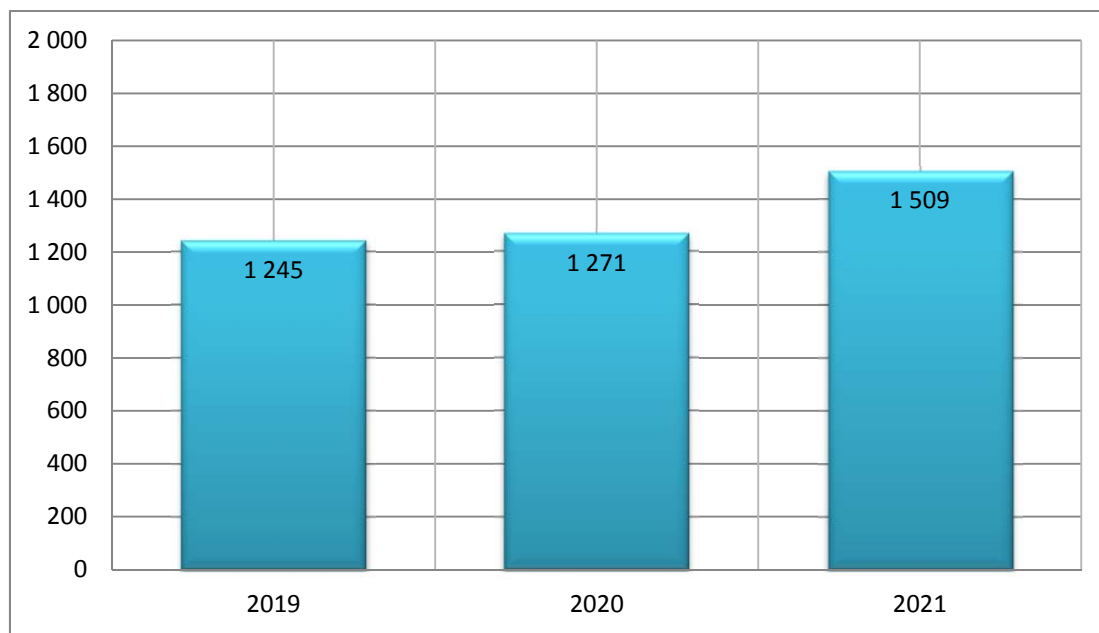


Рисунок 1 – Динаміка виникнення дорожньо-транспортних пригод на території Тернопільської області

Джерело: [3]

За вказаний період зареєстровано 323 ДТП з постраждалими, що на 23 % більше ніж за аналогічний період минулого року (рис. 2).

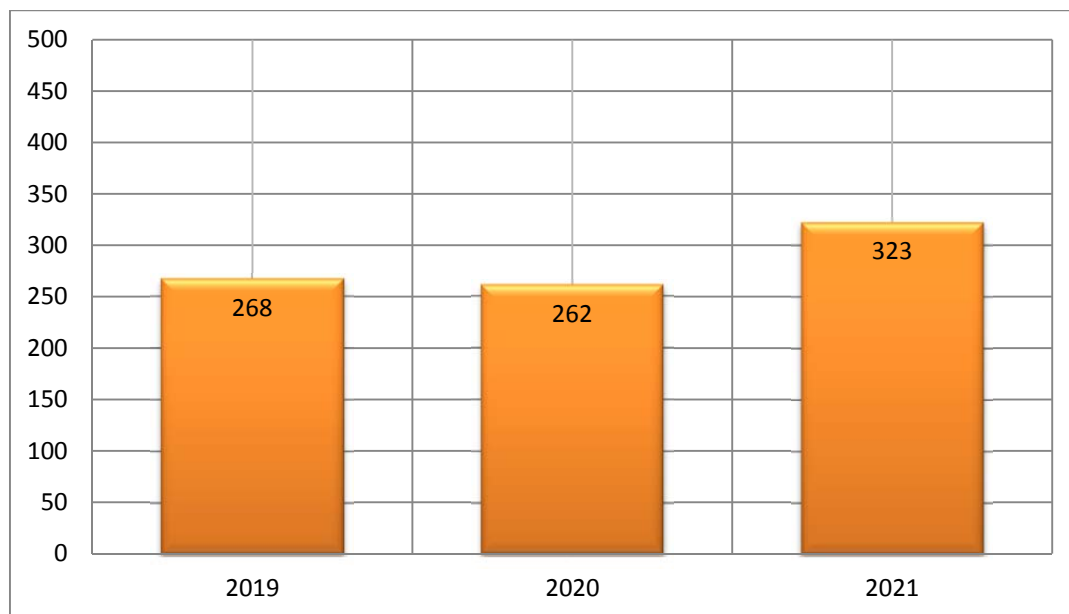


Рисунок 2 – Кількість ДТП з постраждалими на території Тернопільської області

Джерело: [3]

За сім місяців 2021 року загинуло у ДТП 37 осіб, що на 12 % більше ніж за аналогічний період минулого року (рис. 3).

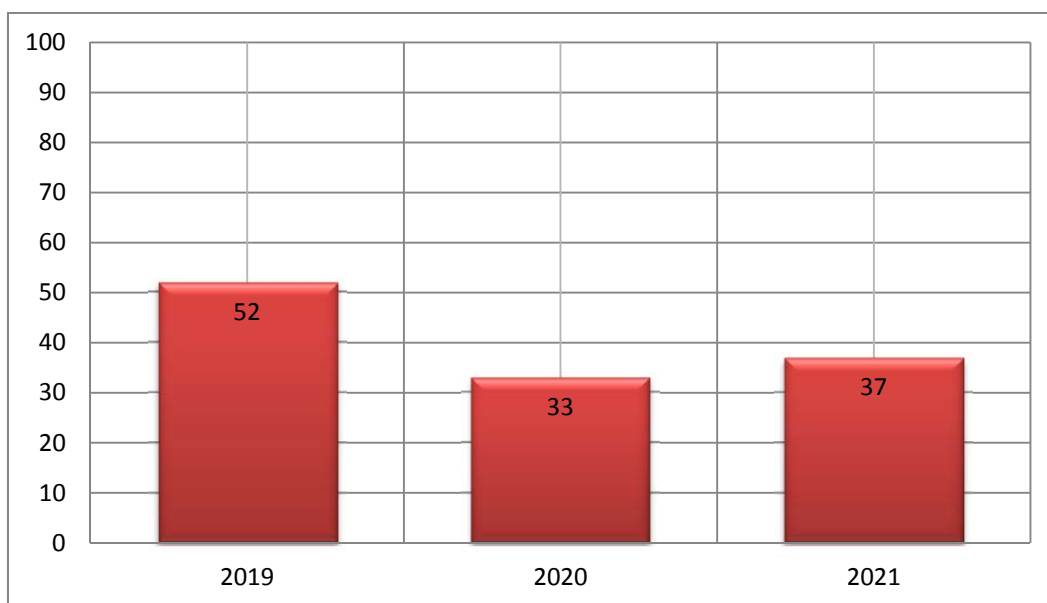


Рисунок 3 – Кількість загиблих у ДТП на території Тернопільської області

Джерело: розроблено авторами

За січень – липень 2021 року в ДТП травмовано 427 осіб, що на 32 % більше ніж за аналогічний період минулого року (рис. 4).

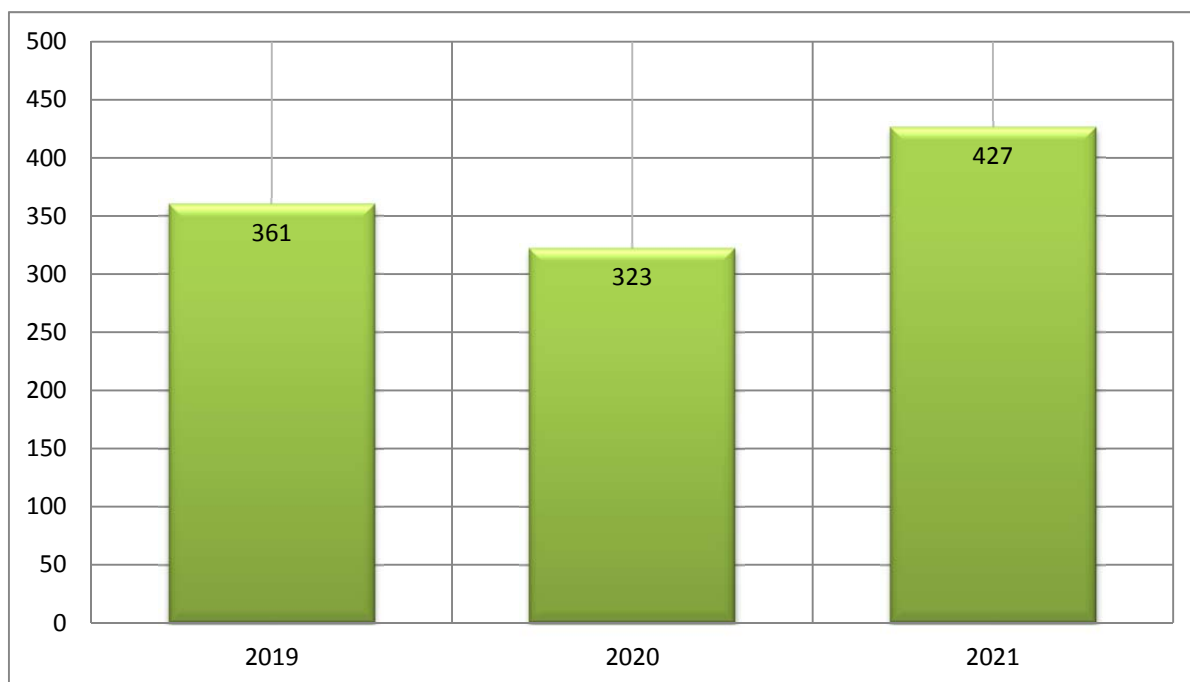


Рисунок 4 – Кількість травмованих у ДТП на території Тернопільської області

Джерело: розроблено авторами

Згідно статистичних даних підсистеми «ДТП» Інформаційно-телекомунікаційної системи Інформаційного порталу Національної поліції України найбільше людей померло в результаті ДТП:

- на місці ДТП – 62 % від загальної кількості загиблих (або 23 особи);
- у лікарні протягом 28 діб – 30 % від загальної кількості загиблих (або 11 осіб);

- по дорозі в лікарню – 8 % від загальної кількості загиблих (або 3 особи).

За січень – липень 2021 року найбільше ДТП зареєстровано у середу, четвер та п'ятницю (рис. 5).

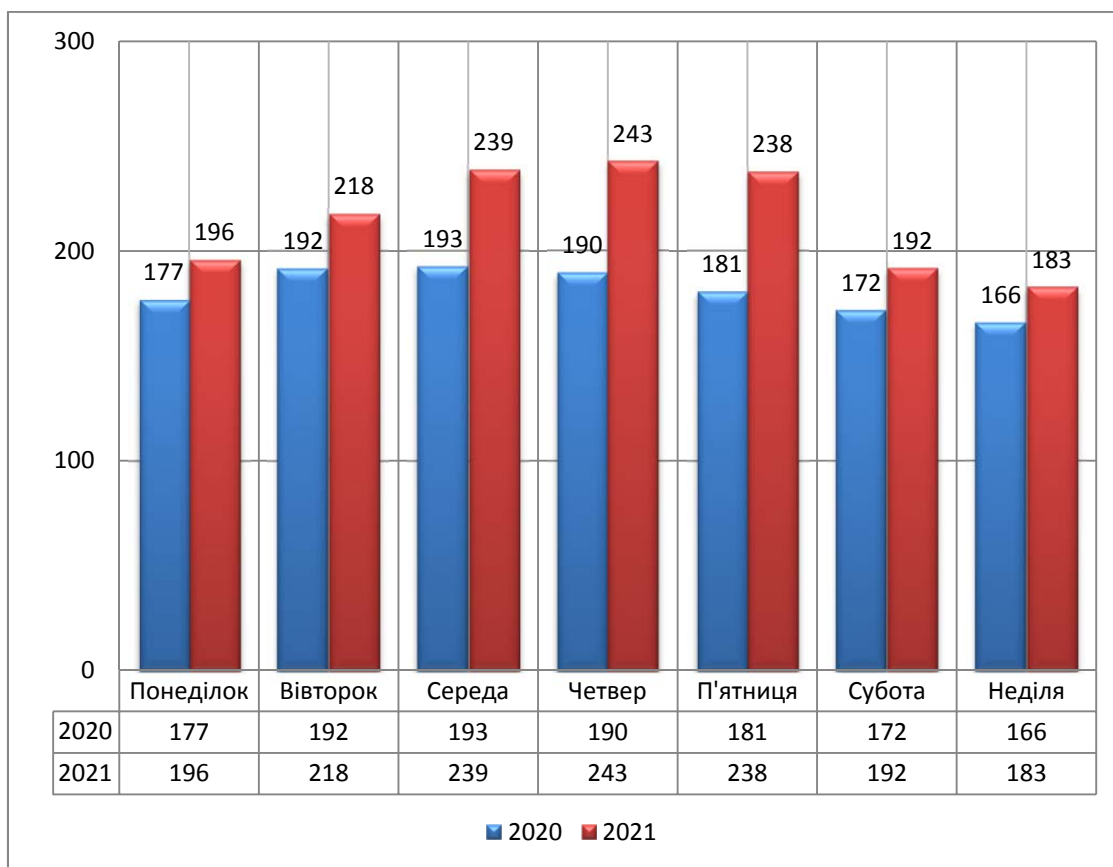


Рисунок 5 – Розподіл дорожньо-транспортних пригод по днях в порівнянні із попереднім періодом

Джерело: розроблено авторами

Найбільше автопригод з постраждалими за вказаний період відбулися у четвер та неділю (рис. 6).



Рисунок 6 – ДТП з постраждалими по днях в порівнянні з попереднім періодом

Джерело: розроблено авторами

Аналізуючи кількість ДТП за часом скоєння, слід відмітити пік аварійності, що припадає на 17 та 18 годину (в цей час було скоєно 15 % від усіх ДТП, рис.7).



Рисунок 7 – Загальна кількість ДТП за часом доби

Джерело: розроблено авторами

Найбільша кількість дорожньо-транспортних пригод з постраждалими припадає на 18, 19, та 20 годину (в цей час сталося 46 % від усіх ДТП з постраждалими, рис. 8).



Рисунок 8 – Кількість ДТП з постраждалими за часом

Джерело: розроблено авторами

Висновки.

1. На сьогоднішній день інфраструктура ділянок концентрації ДТП знаходиться не в ідеальному стані та потребує прийняття негайних рішень задля забезпечення безпеки дорожнього руху на вулично-дорожній мережі міста.

2. Для покращення безпеки руху на ВДМ необхідно:

- проведення негайних ремонтних робіт на деяких ділянках ВДМ;

- оновлення дорожньої розмітки, переважно на всіх вулицях міста;
- встановлення нових якісних світлодіодних світлофорів із відображенням зворотного відліку часу, як для пішоходів, так і для водіїв ТЗ;
- заміна старих дорожніх знаків на нові.

3. Заходи щодо підвищення безпеки руху на вулично-дорожньої мережі міста можна розділити на три основні напрями [4]. Перший напрямок полягає у організації руху безпосередньо на ВДМ, другий - у розвитку транспорту загального користування та надання пріоритету у проїзді. З точки зору безпеки руху прийнятним методом може служити побудова планів координації світлофорних об'єктів з урахуванням руху громадського транспорту [5]. Третім напрямком є безпосередній інформаційний вплив на водіїв ТЗ [6].

Список літератури

1. В. Муж, О. Цьонь. Правові механізми забезпечення безпеки пасажирських перевезень. *Матеріали XXI наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя*, Тернопіль, 2019. С. 42-43.
2. Гуменюк І.Д., Цьонь О.П. Характеристика автомобільної галузі України. *Актуальні задачі сучасних технологій* : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 17–18 листоп. 2016.) . М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. Тернопіль : ТНТУ, 2016. с. 345.
3. Ляшук О.Л., Бодоряк Ю.Д., Шмидюк Ю.А., Цьонь О.П. Стан аварійності на автошляхах України. *Транспортна безпека: правові та організаційні аспекти*: матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції (в авторській редакції), (м. Кривий Ріг, 13 листопада 2020 року). Кривий Ріг, 2020. С. 299.
4. Babii, M., Tson, O., Kuchvara, I., Chernii, V. (2021). Improving the efficiency of the road organization traffic at an unregulated crossroads. *Transport Development*, (1(8), 125-134.
5. Дослідження координованого управління транспортними потоками в центральній частині міста / М. Кристопчук, І. Хітров, О. Цьонь, О. Почужевський. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2021. Т. 1 № 16. С. 82-90.
6. Патент № 148177, Україна, МПК G08G 1/01. Світлофор / Цьонь О. П., Кристопчук М.Є., Сташків М.Я., Бабій М.В., Кучвара І.М., № у 2021 01128; заявл. 09.03.2021; опубл. 14.07.2021, Бюл.№ 28.

References

1. Muzh, V. & Tson, O. (2019). Pravovi mekhanizmy zabezpechennia bezpeky pasazhyrskykh perevezen. *Materialy XXI naukovoï konferentsii Ternopil'skoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu imeni Ivana Puliuia, Ternopil*. P. 42-43 [in Ukrainian].
2. I.D. Humeniuk & O.P. Tson. (2016). Kharakterystyka avtomobilnoi haluzi Ukrainy. *Aktualni zadachi suchasnykh tekhnolohii* : zb. tez dopovidei mizhnar. nauk.-tekhn. konf. Molodykh uchenykh ta studentiv, (Ternopil, 17–18 lystop. 2016.)/ M-vo osvity i nauky Ukrainy, Tern. natsion. tekhn. un-t im. I. Puliuia. – Ternopil : TNTU. – P. 345 [in Ukrainian].
3. Liashuk O.L., Bodoriak Yu.D., Shmyndiuk Yu.A. & Tson O.P. (2020.) Stan avariinosti na avtoshliakhakh Ukrainy. *Transportna bezpeka: pravovi ta orhanizatsiini aspekty: materialy KhV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (v avtorskii redaktsii)*, (m. Kryvyi Rih, 13 lystopada 2020 roku). Kryvyi Rih, P. 299 [in Ukrainian].
4. Babii, M., Tson, O., Kuchvara, I. & Chernii, V. (2021). Improving the efficiency of the road organization traffic at an unregulated crossroads. *Transport Development*, (1(8), 125-134 [in Ukrainian].
5. Krystopchuk, M., Khitrov, I., Tson, O. & Pochuzhevskiy, O. (2021). Doslidzhennia koordynovanoho upravlinnia transportnyimi potokamy v tsentralnii chastyni mista. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*, Vol. 1, 16, 82-90 [in Ukrainian].
6. Tson, O. P., Krystopchuk, M.Ie., Stashkiv, M.Ia., Babii, M.V. & Kuchvara, I.M. (2021). Patent № 148177, Ukraina, MPK G08G 1/01. Svitlofor, № u 2021 01128, Biul.№ 28 [in Ukrainian].

Oleg Lyashuk, Prof., DSc., **Oleg Tson**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Dzyura**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mariia Babii**, PhD tech. sci.

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

Mykhailo Krystopchuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine

Serhii Lysenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Yurii Bodoriak

Research Forensic Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine, Ternopil, Ukraine

Research of Road Safety on Highways of Ternopil Region

The indicators of road safety on the roads of Ukraine, on the example of Ternopil region are analyzed. It is established that currently in the world road accidents are one of the main causes of death and disability, and create annual GDP losses of 1 to 3%.

It is investigated that for January - July 2021 on the street and road network of Ternopil region 1509 road accidents were registered, which is 19% more than for the same period last year (2020 - 1271 accidents). Organizational measures to improve traffic safety on the road network are proposed.

Measures to improve traffic safety on the city's road network are divided into three main areas. The first direction was to organize traffic directly on the road network, the second - in the development of public transport and giving priority to travel.

From the point of view of traffic safety, the construction of plans for coordination of traffic light facilities taking into account the movement of public transport can be an acceptable method. The third direction is the direct informational impact on drivers of vehicles.

traffic safety, road network, traffic accidents

Одержано (Received) 21.03.2022

Прорецензовано (Reviewed) 28.03.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

УДК 656:338

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.317-327](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.317-327)

Д.В. Голуб, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: dimchik529@gmail.com

Методи та підходи до моделювання ефективності цілей операцій в транспортних системах

Наведено методи та підходи до моделювання цілей операцій в транспортних системах, що дає змогу отримати не лише цілеспрямовані, але і гнучко орієнтовані рішення при виборі стратегії прогнозування їх роботи. Визначені часткові завдання ухвалення рішень для структуризації початкової інформації з використанням методу відображень. Дано класифікацію факторів за характером невизначеності, що є одним з результатів рішення завдання аналізу невизначеності. Сформульовані завдання, що дозволяють оперативно отримувати, аналізувати і обробляти інформацію. Представлено формалізовану постановку завдання формування початкової множини стратегій моделі проблемної ситуації в транспортній системі. З'ясовано, що багато компонент завдання формування початкової множини стратегій явно не задані і евристично формуються особою, що приймає рішення. З урахуванням показника надійності транспортних систем визначено основні напрямки вирішення проблеми задоволення суперечливих вимог до множини початкових стратегій. Узагальнено сукупність ознак, що можуть бути покладені в основу класифікації завдань ухвалення рішень в транспортній системі за ознакою міри визначеності інформації про проблемну ситуацію.

транспортна система, модель, операція, стратегія, прогнозування, аналіз, завдання, ефективність, адаптивність

© Д.В. Голуб, 2022

Постановка проблеми. Для розв'язання проблеми, яка стоїть перед особою, що приймає рішення (ОПР), є необхідність її представлення у вигляді одного або декількох завдань [1]. При цьому перехідним етапом є проблемна ситуація, в ході якого вербальну мету розбивають на підцілі і встановлюють загальні обмеження [2].

Завдання, що ставляться можуть бути розв'язані різними способами, що утворюють множину стратегій, кожен з яких вважають чистою, якщо на її реалізацію витрачені усі можливі засоби [1, 3, 4]. Можливе ділення таких засобів в певних пропорціях між стратегіями, що входять у множину допустимих альтернативних рішень, які забезпечують різний рівень розв'язання поставлених завдань. Це означає, що при знаходженні рішень необхідне використання не тільки вказаної, але ще й додаткової інформації про переваги ОПР, а також її відношення до ризику з урахуванням невизначеності умов виконання операції та інтересів інших її суб'єктів.

Інформація щодо переваг і уявлень ОПР про «кращий» та «гірший» варіанти на множині цілей, умов, завдань, способів та результатів операцій може носити якісний або кількісний характер. Інформацію про відносну важливість показників ОПР можна віднести до якісної, якщо припускається, що збільшення одних показників вносить більш суттєвий вклад в досягнення мети операції у порівнянні зі зміною інших. До кількісної інформації можна віднести таку інформацію, на основі якої ОПР може здійснити оцінку зміни одного показника компенсацією зміни інших [5]. Або іншими словами ступінь важливості одного показника за іншого.

У загальному випадку результат операцій у транспортних системах є невизначеним, що викликано невизначеністю умов здійснення операції і дією чинників різноманітної природи [6, 7]. Отримання значень характерних показників конкретного результату операції, пов'язане з розв'язанням завдання моделювання операцій. Зазначене підтверджує необхідність розробки етапів дослідження ефективності виконання операцій в транспортних системах, процес отримання результатів якого, пов'язаний з формуванням її моделі і отриманням оцінок ефективності за результатами такого моделювання.

Модель проблемної ситуації в транспортних системах будується для охоплення проблематики розробки рішень в загалом, представлення її основних елементів, що формують отримання остаточного рішення щодо стратегії проведення такої операції та відображення взаємозв'язків основних елементів процесу розробки рішень і послідовності формування часткових завдань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Міру відповідності дійсного результату операцій у транспортних системах бажаному забезпечує показник ефективності $W(u)$ реалізації операції, залежний від стратегії u [8]. Його можна визначити на множині допустимих стратегій U : $u \in U$.

Дану залежність у загальному вигляді задають на основі відображення допустимих стратегій U за множиною значень показника ефективності W : $\Psi: U \rightarrow W$, при тому, що звичайне відображення T представляють у формі математичної моделі операцій [2].

Основною вимогою вибору показника ефективності є його відповідність меті операцій A_0 , які відображаються в бажаному результаті Y^{nb} . А отже даний показник повинен враховувати наступні вимоги: змістовність різної природи (фізичної, економічної та ін.); інтерпретуватися або мати пояснення математичних результатів і залежностей, що отримані у відповідності даних конкретних областей; вимірність; відповідність системі переваг ОПР [9].

Більш детальний розгляд даних вимог говорить, що показник ефективності можливо вимірювати в метричній і порядковій шкалах. Представлення відповідності

результатів операції, а саме реального результату Y до необхідного $Y^{нб}$ потребує формального введення певної числової функції - функції відповідності за множиною результатів операції:

$$p = p[Y(u), Y^{нб}] \quad (1)$$

За деякою шкалою дана функція може показувати міру реалізації необхідної мети операції, а її конкретний вид - залежати від мети операції, конкретного напрямку дослідження та інших чинників [10]. Оскільки $Y(u)$ може прийматися як випадкова змінна то функція відповідності може також приймати випадковий характер, тобто бути представлена як числова функція випадкового аргументу [11].

На основі моделі проблемної ситуації (1) можуть бути отримані різні постановки часткових завдань ухвалення рішень. Кожне таке завдання в математичних термінах узагальненого рівня може бути представлено у вигляді логічного висловлювання типу: (дано; визначити). В цьому випадку символ «;» розділяє дві сторони проблеми - те, що відомо, і те, що вимагається знайти.

Для етапу постановки завдання характерні наступні часткові завдання ухвалення рішень: структуризація початкової інформації, аналіз невизначеності формування початкової множини стратегій, моделювання результатів операції, моделювання цілей операції, моделювання переваг [12].

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка методів та підходів до моделювання ефективності цілей операцій в транспортних системах для отримання цілеспрямованих і гнучко орієнтованих рішень при виборі стратегії прогнозування їх роботи.

Виклад основного матеріалу. Оскільки проблемний аналіз являє структуризацію початкової інформації про проблему, то формально можна сформулювати наступне завдання:

$$\langle \theta; \theta_{A_0}, \theta_U, \theta_\Lambda, \theta_P = \{ \theta_{P_G}, \theta_{P_Y}, \theta_{P_U}, \theta_{P_\Lambda}, \theta_{P_K} \} \rangle, \quad (2)$$

де θ – решта інформації про проблемну ситуацію;

θ_{A_0} – інформація про ціль операції A_0 ;

θ_U – інформація про множину U ;

θ_Λ – інформація про множину Λ ;

θ_P – частина загальної інформації про проблему, що стосується переваг особи, що приймає рішення на множині;

θ_{P_G} – можливі результати G операції і відмінності їх по перевазі відносно мети A_0 операції;

θ_{P_Y} – істотні характеристики Y результату $g \in G$;

θ_{P_U} – можливі способи (стратегій) U досягнення мети операцій;

θ_{P_Λ} – Λ умов проведення операцій;

θ_{P_K} – концепції (гіпотези) раціональної поведінки системи для визначення надалі критерію ефективності.

Це завдання вирішується тільки евристичними методами. Класифікація факторів за характером невизначеності являється одним з результатів рішення завдання аналізу невизначеності виду:

$$\langle \theta_{A_0}, \theta_\Lambda, \Lambda \rangle, \quad (3)$$

де Λ – множина невизначених факторів.

Рішення завдання вимагає залучення і аналіз інформації, що отримується на основі: сили аналогій; історичного досвіду або еволюції розвитку; бази експериментальних і статистичних даних; результатів проведених експертиз та аудиту.

Зазначимо, що ці завдання можливо успішно реалізувати, якщо будуть створені потужні бази даних і бази знань, що дозволить оперативно отримувати, аналізувати і обробляти інформацію, яка стосується:

- природи невизначених чинників;
- діапазонів зміни невизначених чинників; апіорного розподілу ймовірностей на діапазонах зміни чинників;
- психологічних особливостей ухвалення рішень іншими суб'єктами досліджуваної транспортної системи;
- типів взаємодій між суб'єктами досліджуваної транспортної системи (нейтральна поведінка, сприяння, протидія) та ін.

До найважливіших завдань типу (3) відносяться завдання математичної статистики, що стосуються параметричного і непараметричного оцінювання, ідентифікації, кластеризації та прогнозування [3].

Клас вживаних методів рішення цих завдань є достатньо широким і добре розробленим. За існуючими оцінками тільки методів прогнозу налічується понад 150. До основних з них відносяться: морфологічний, кореляційний, регресійний, факторний та спектральний аналізи; апарат ланцюгів Маркова; методи групового урахування аргументів та розпізнавання образів та ін.

Формалізована постановка завдання формування початкової множини стратегій моделі проблемної ситуації виглядає таким чином:

$$\langle \theta_{A_0}, \theta_U, \theta_A, \theta_p, A, U \rangle. \quad (4)$$

З одного боку, множина альтернатив цілей операції U між бажаним результатом (цілі операції) і умовами реалізації, має бути по можливості ширшою. Це забезпечить надалі свободу вибору рішень ОПР і зведе до мінімуму можливість упустити оптимальне рішення $u^{opt} \in U$.

З іншого боку, початкова множина стратегій (цілей) U має бути осяжною і, досить вузькою, що дозволить ОПР надалі провести верифікацію альтернатив наявних в його розпорядженні моделі при обмеженнях на ресурси.

Верифікація являє собою перевірку, спосіб підтвердження яких-небудь теоретичних положень, алгоритмів, програм і процедур шляхом їх зіставлення з дослідними (еталонними або емпіричними) даними, алгоритмами і програмами). Верифікувати відповідність кінцевого продукту (транспортної послуги) зумовленим вимогам можливо, залежно від ситуації, по прямих і непрямих його характеристиках.

Багато компонент завдання формування початкової множини стратегій (цілей) явно не задані і евристично формуються ОПР. Проблема задоволення суперечливих вимог до множини початкових стратегій (цілей) U повинна вирішуватися по наступних основних напрямках, які диктуються показником надійності P_u транспортних систем.

Розглянемо більш детально ці напрями.

1. При вирішенні питання про включення тієї або іншої альтернативи стратегій (цілей) u у множину U слід орієнтуватися на цілі операцій, щоб отримати відповідь на питання: чи забезпечує цей варіант дій $u \in U$ досягнення бажаного результату в умовах Λ .

Цей етап дозволяє ОПР відсікти частину потенційної множини альтернатив (цілей) через їх очевидну непридатність з точки зору досягнення цілі операції. Відображається здатність ОПР побачити серед множини можливих цілей (якщо мета не задана екзогенно, ззовні) головну, а також передбачається можливі цілі на майбутнє.

Сформовану таким чином множину U_{A_0} можна назвати цільовою.

2. Серед усіх альтернативних рішень великої кількості множини U_{A_0} потрібне на підставі інформації θ_U виділити підмножину U_ϕ стратегій, що фізично реалізуються і відповідають вимозі: чи може бути ця альтернатива (цілі) $u \in U_{A_0}$ реалізована зараз або буде задане проведення операцій?

Вирішення цього питання пов'язане з рівнем загальнотеоретичних і методологічних розробок, з прогнозом розвитку транспортних систем.

Крім того, у множині цілей U_ϕ включаються тільки ті альтернативні цілі, які задовольняють обмеженням за витратами, якісно оцінюваним ОПР і експертами. Причому, ці витрати включають також засоби, що виділяються на додаткові дослідження, що забезпечують готовність альтернативних рішень до заданого терміну початку операції.

3. Множина цільових стратегій $U_\phi \subseteq U_{A_0}$, що фізично реалізуються, має бути перевірена на недомінуємість по повноті охоплення факторів, на Λ – інформацію θ_Λ .

Це означає, що при цьому ОПР повинне відповісти на питання:

- чи є серед множини U_ϕ такі стратегії U_A , які забезпечують свободу вибору рішень в ході операції?

- чи є ці стратегії гнучкими по відношенню до невизначеностей природного і поведінкового характеру, що змінюються?

Для подальшого розгляду залишаються лише ті стратегії $U_a \subseteq U_\phi$, які забезпечують: можливість ефективного коригування початкового наміченого плану операції при зміні умов її проведення; стратегії, інваріантні до умов.

Перше означає, що ризики або втрати, пов'язані з коригуванням плану в ході операції, будуть мінімальними. Друге - вибір стратегій на основі прогнозу поведінки інших суб'єктів операцій забезпечить вигідний хід реалізації операцій.

Процедура виділення початкової множини стратегій $U=U_a$ має циклічний характер, що припускає повернення до попереднього на більш високому рівні у разі виявлення протиріч на одному з приведених етапів. У рамках даних моделей проблемної ситуації формальний запис завдання моделювання результатів операції через побудову відображення H має вигляд:

$$\langle \theta_{A_0}, U, \Lambda, \theta_H, \rho_G, \rho_Y; Y, \{H_i\} \rangle, \quad (5)$$

де Y або $Y(G)$ – ознаки вихідних результатів;

G – вихідні результати;

$\{H_i\}$ – множина моделей, кожна з яких відображає моделі

$$H : U \cdot \Lambda \xrightarrow{\theta} Y(G). H : U \cdot \Lambda$$

Зазначимо, що в загальному випадку, розглядається не одна модель H_i , а багаторівнева їх ієрархія $\{H_i\}$, визначаються особливості схеми дослідження ефективності. При цьому опис більш високого рівня залежить від узагальнених і факторизованих змінних нижчого рівня.

Такий підхід при вирішенні завдань моделювання результатів (цілей) операцій дозволяє: структурувати процес моделювання операцій в цілому; істотно полегшити оцінювання ефективності операцій; виявити найбільш значимі фактори, що визначають ефективність операцій.

Зазначена методологія вирішення завдання моделювання у вигляді відображення (5) пред'являє цілком певні вимоги до моделей, використовуваних на різних рівнях ієрархії дослідження. Необхідна чітка формалізація цілей операцій для змістовності досліджень і отримання деяких кількісних оцінок щодо прийняття рішень. Формалізація цілей операцій, дослідження її ефективності змушує до використання кількісних шкал. Базування формалізації цілей операцій на концепції зовнішнього доповнення є необхідною умовою отримання обґрунтованого рішення.

Цілі і завдання операцій є гомоморфними і відображаються системою показників їх досягнення. Гомоморфізм є відображенням основної множини однієї системи на основну множину іншої, що зберігає основні операції і предикати (твердження). При цьому система «показник ефективності - критерій» утворює модель цілей операцій (рис. 1).

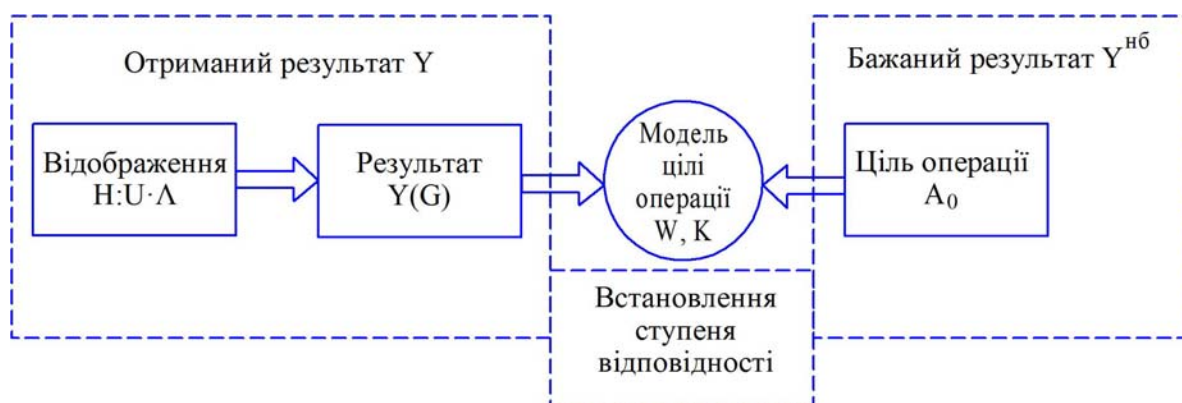


Рисунок 1 – Схематичне відображення моделі цілей операцій

Джерело: розроблено автором

Завдання моделювання цілей операцій формально описується відображенням:

$$\langle \theta_{A_0}, U, A, Y^{nb}, Y(G), \rho_W, \rho_K; W, K \rangle. \quad (6)$$

В деяких випадках ціль A_0 операцій задається вищестоящим органом у вигляді параметрів мети Y^{nb} . Ця обставина відображає множину (6) регулюванням Y^{nb} , що стоїть в лівій частині - «Дано». У загальному випадку параметри цілей є результатом вирішення завдання, подані у вигляді відображення:

$$\langle \theta_{A_0}, U, A, \rho_W; G, Y^{nb} \rangle. \quad (7)$$

Ціль операцій накладає цілком визначений відбиток на вигляд показника ефективності і на сам критерій або на принцип його вибору.

Числова функція, визначена на множині стратегій U , характеризує міру досягнення цілі A_0 операції і може розглядатися в якості показника ефективності лише при дотриманні певних вимог: відповідність цілі змістовність і інтерпретованість; вимірюваність; мінімальність числа використовуваних часткових показників; повнота.

ОПР, знаючи значення показника в тій або іншій ситуації, повністю уявляє собі, в якому ступені досягається ціль операції. Сам показник ефективності або його компоненти мають бути зрозумілі ОПР і мати чіткий фізичний зміст. Показники ефективності можна піддавати певним математичним перетворенням, що допускаються типом його шкали. Людина може досить легко оперувати з одним - трьома показниками без використання машинних методів обробки. Залежно від міри підготовленості ОПР верхня межа розмірності векторного показника визначається

величиною 7 ± 2 ; при цьому із зростанням числа показників збільшується час аналізу отримуваних результатів. Векторний показник ефективності повинен містити таку кількість часткових показників, яка дозволяла б враховувати усі визначальні ознаки Y , операції, що адекватно відображають результат. Аналіз зазначених вимог свідчить, що вони є суперечливими, і не можуть задовольнити усім вимогам відразу.

ОПР за значенням показника повинен повністю уявляти собі міру досягнення цілі та її відповідність. Це призводить до необхідності задоволення вимоги повноти, яка суперечить вимозі мінімальності. Вимога змістовності і інтерпретації входить в протиріччя з вимогою вимірності, оскільки показники ефективності можуть не мати адекватної фізичної шкали: оцінка естетичності, ергономічності, новизни і т. п. і їх доводиться описувати суб'єктивними оцінками.

Якщо операція проводиться в умовах істотної невизначеності (цільової, природної і поведінкової), то в якості критеріїв краще використати підхід до формування критеріїв, який заснований на концепції адаптації.

Цей підхід припускає прогнозування можливих умов A і способів U на основі не лише апіорної (статичної) інформації, а також і поточній динамічній та прогнозній (віртуальній) інформації. Використовуючи таку інформацію і застосовуючи принцип оптимальності на результуючій стадії операції, можна отримати не лише цілеспрямовані, але і гнучко орієнтовані рішення.

Символічно математичне формулювання критерію адаптивності при виборі рішень має вигляд:

$$u^{opt}(t, \tau): \sup_{u(t) \in U(t, \tau)} W'(u, t, \tau), \quad (8)$$

де u, U – зміст елемента множини стратегій управління рішеннями;

t – час;

T – попередження прогнозу;

$\sup$ – точна верхня межа великої кількості стратегій управління.

Функція ефективності $W'(u, t, \tau)$ свідчить, що цілі операції, а отже показники і критерії, можуть змінюватися в часі. Сам показник формується як деяке усереднювання по факторам $\lambda \in \Lambda_j$.

Використання критерію (8) дозволяє вибирати позитивну стратегію $u^{opt}(t, \tau)$ з точністю до помилок прогнозування на період прогнозу τ . Ця стратегія забезпечує найбільше значення функції ефективності W' на вибраній множині допустимих стратегій $U(t, \tau)$, яка формується до цього моменту часу t .

Дослідження свідчать, що принцип ухвалення рішень на основі концепції адаптивизації виявляється найбільш складним по рівню розробки управлінських дій, але в той же час й найбільш досконалим.

При рішенні усіх зазначених вище завдань перед ОПР стоїть проблема вибору об'єктів, що підлягають подальшому розгляду, з множини наявних. Здійснюючи такий вибір, ОПР керується своєю системою переваг. Система переваг може бути виявлена і виміряна в ході контрольного пред'явлення ОПР об'єктів з представленої сукупності. На цій основі будується модель переваг.

Спеціальні методи моделювання переваг ОПР використовують формальні і неформальні процедури. При цьому узагальнено постановка завдання моделювання переваг формально записується у вигляді відображення:

$$\langle D, \theta; P_D \rangle, \quad (9)$$

де $D = \{U, \Lambda, Y, G, W, K\}$ – множина варіантів початкових даних завдання.

Завдання (9) потрібно розуміти наступним чином: на основі наявної інформації і результатів контрольного пред'явлення об'єктів, що входять в підмножину множини D , слід виявити систему переваг P_D ОПР.

Побудова моделі P_D може бути здійснена за допомогою отримуваної від ЛПР спеціальної додаткової інформації, яка є інформацією $\Omega \subset \theta$ про переваги. Прикладами такої інформації є: незалежність часткових показників по перевазі; адитивна незалежність показників; якісна інформація про їх відносну важливість; коефіцієнти важливості та ін.

У основу класифікації завдань ухвалення рішень в транспортній системі можуть бути покладена різна сукупність ознак. Проте практика дослідження ефективності функціонування транспортних систем, що склалася, показує, що найбільш узагальненими і істотними ознаками класифікації є: число осіб, що приймають рішення; вид показника ефективності; міра визначеності інформації про проблемну ситуацію; залежність елементів моделі проблемної ситуації від часу.

За ознакою числа ОПР розрізняють завдання індивідуального і групового ухвалення рішень. Індивідуальні рішення приймаються однією особою, а групові - колективним органом (групою осіб). При груповому виборі рішень визначальну роль відіграє завдання узгодження індивідуальних переваг членів групи. Головним тут є об'єднання переваг окремих осіб в єдину думку (групова перевага).

Залежно від виду використовуваного показника ефективності завдання ухвалення рішень поділяються на завдання із скалярним і векторним показниками ефективності і відповідно скалярними і векторними завданнями ухвалення рішень.

За ознакою міри визначеності інформації про проблемну ситуацію розрізняють завдання ухвалення рішень в умовах визначеності і невизначеності. Завдання ухвалення рішень в умовах визначеності (детерміновані завдання) характеризуються наявністю повної і достовірної інформації про проблемну ситуацію, цілі, обмеження і наслідки рішень, що приймаються. У цих завданнях відносно кожної стратегії $u \in U$ заздалегідь, до проведення операції, відомо, що вона незмінно приводить до деякого конкретного результату. Завдання ухвалення рішень в умовах невизначеності поділяються у свою чергу на завдання в умовах стохастичної і нестохастичної невизначеності, а останні – на завдання ухвалення рішень в умовах природної і поведінкової невизначеності.

За способом опису невизначеностей нестохастичного характеру розрізняють завдання ухвалення рішень в чіткій і нечіткій постановці. Характерна особливість усіх завдань ухвалення рішень в умовах невизначеності полягає в тому, що результат операції залежить окрім стратегій оперуючої сторони і фіксованих чинників також від невизначених чинників, не підвладних оперуючій стороні і не відомих їй у момент ухвалення рішення(чи відомих з недостатньою точністю). В результаті впливу невизначених чинників кожна стратегія $u \in U$ виявляється пов'язаною з множиною можливих результатів операцій, що істотно ускладнює процес розробки рішень.

За ознакою залежності елементів моделі проблемної ситуації від часу розрізняють статичні і динамічні завдання ухвалення рішень. Динамічні завдання значно складніші за статичні, оскільки деякі елементи динамічних завдань ухвалення рішень залежать від функцій часу, динамічних об'єктів, що описують поведінку і беруть участь в операціях.

Класифікація завдань ухвалення рішень за перерахованими ознаками призводить до різних комбінацій типів завдань. Деякі завдання можуть бути класифіковані як

статичні векторне завдання групового ухвалення рішень в умовах визначеності. Можливі і інші комбінації.

Для вирішення різних типів завдань розроблені певні методи, основні з яких приведені в таблиці 1. Завдання, що не увійшли до таблиці, можуть бути вирішені приведеними в ній методами із залученням спеціальних прийомів.

Таблиця 1 – Методи розв'язку основних класів завдань

Множини факторів (критерії)	Методи визначення показника ефективності	
	Скалярний	Векторний
Визначені, Λ_F	Методи математичного програмування	Методи прийняття рішень в умовах визначеності
Випадкові, Λ_E	Методи стохастичного програмування	Методи прийняття рішень в умовах стохастичної невизначеності
Поведінкової невизначеності, Λ_J^B	Методи розв'язку матричних ігор	Методи розв'язку біматричних ігор з суворим і не суворим суперництвом
Змістовної невизначеності, Λ_J^N	Методи розв'язку ігор з "природою"	

Джерело: розроблено автором

Висновки.

1. Наведено формалізовану постановку завдання формування початкової множини стратегій моделі проблемної ситуації в транспортній системі методом відображень і методів її вирішення.

2. Визначено основні напрямки вирішення проблеми задоволення суперечливих вимог до множини початкових стратегій з урахуванням надійності та ефективності транспортних систем.

3. Дано математичне формулювання критерію адаптивності при виборі рішень.

4. Узагальнено сукупність ознак, що можуть бути покладені в основу класифікації завдань ухвалення рішень в транспортній системі.

Список літератури

1. Методологічні і теоретичні основи забезпечення та підвищення надійності функціонування автомобільних транспортних систем: монографія / Аулін В.В., Голуб Д.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В.; під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. Кропивницький: ТОВ "КОД", 2017. 370 с.
2. Побудова моделі проблемної ситуації в транспортних системах / Аулін В.В., Голуб Д.В., Біліченко В.В., Замуренко А.С. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2021. №2(14). С. 4-9.
3. Основы теории систем и системного анализа: учеб. пособ. / Бурименко Ю.И., Галан Л.В., Лебедева И.Ю., Щуровская А.Ю. Одесса: ОНАС им. А.С. Попова, 2015. 136 с.
4. Бочаров Д.И., Кравченя И.Н. Применение методов математического моделирования при решении производственных задач. Гомель: БелГУТ, 2009. 191 с.
5. Аулін В.В., Голуб Д.В. Реалізація фізико-інформаційного підходу дослідження проблеми підвищення надійності та ефективності функціонування транспортних систем. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2018. Вип. 81. С. 3-10.
6. Дзюбан І. Ю., Жиров О. Л., Охріменко О. Г. Методи дослідження операцій. Київ: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2005. 108 с.
7. Кунда Н.Т. Дослідження операцій у транспортних системах. Київ: Слово, 2008. 400 с.
8. Флейшман Б.С. Элементы теории потенциальной эффективности сложных систем. Изд. 2-е перераб. Смоленск: Изд-во «Ойкумена», 2008. 228 с.

9. Wanghong Lia, Wade D. Cooka, Zhepeng Lia and Joe Zhu Efficiency measurement for hierarchical situations. *Journal of the operational research society*. 2019. Vol. 72 (3). P. 654 - 662.
10. Формування показників оцінки ефективності транспортного процесу перевезень. /Аулін В.В., Голуб Д.В., Біліченко В.В., Замуренко А.С. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2020. №1(11). С.5-10.
11. Дивак М.П., Порплиця Н.П., Дивак Т.М. Ідентифікація дискретних моделей динамічних систем з інтервальними даними: монографія. Тернопіль: ВПЦ «Економічна думка ТНЕУ», 2018. 220 с.
12. Методологія підходів до дослідження шляхів і сукупності факторів забезпечення належного рівня ефективності і надійності транспортних систем / Аулін В.В., Голуб Д.В., Біліченко В.В., Великодний Д.О. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2017. №2. С. 4-14.

References

1. Aulin, V.V., Golub, D.V., Grinkiv, A.V. & Lisenko, S.V. (2017). Metodologichni i teoretichni osnovi zabezpechennya ta pidvishennya nadijnosti funkcionuvannya avtomobilnih transportnih sistem [Methodological and theoretical bases of maintenance and increase of reliability of functioning of automobile transport systems] . V.V. Aulin (Eds.). Kropivnickij: Vidavnictvo TOV "KOD" [in Ukrainian].
2. Aulin, V.V., Golub, D.V., Bilichenko, V.V. & Zamurenko, A.S. (2021). Pobudova modeli problemnoyi situaciyi v transportnih sistemah [Building a model of the problem situation in transport systems]. *Visnik mashinobuduvannya ta transport – Herald of mechanical engineering and transport*, 2(14), 4-9 [in Ukrainian].
3. Burimenko, Ju.I., Galan, L.V., Lebedeva, I.Ju. & Shhurovskaja, A.Ju. (2015). *Osnovy teorii sistem i sistemnogo analiza* [Fundamentals of systems theory and systems analysis] . Odessa: ONAS im. A.S. Popova [in Russian].
4. Bocharov, D.I. & Kravchenya, I.N. (2009). *Primenenie metodov matematicheskogo modelirovaniya pri reshenii proizvodstvennyh zadach* [Application of methods of mathematical modeling in solving production problems]. Gomel: BelGUT [in Russian].
5. Aulin, V.V. & Holub, D.V. (2018). Realizatsiia fizyko-informatsijnoho pidkhodu doslidzhennia problemy pidvyschennia nadijnosti ta efektyvnosti funktsionuvannya transportnykh system [Implementation of a physical-information approach to the study of the problem of improving the reliability and efficiency of transport systems] . *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho avtomobil'no-dorozhn'oho universytetu – Bulletin of Kharkiv National Automobile and Road University*, Vol. 81, 3-10 [in Ukrainian].
6. Dzyuban, I. YU., Zhirov, O. L. & Ohrimenko, O. G. (2005). *Metodi doslidzhennya operacij* [Operations research methods]. Kiyiv: IVC «Vidavnictvo «Politehnika»» [in Ukrainian].
7. Kunda, N.T. (2008). *Doslidzhennya operacij u transportnih sistemah* [Research of operations in transport systems]. Kiyiv: Slovo [in Ukrainian].
8. Flejshman, B.S. (2008). *Jelementy teorii potencial'noj jeffektivnosti slozhnyh sistem. Izdanie vtoroje pererabotannoe* [Elements of the theory of potential efficiency of complex systems]. Smolensk: Izd-vo «Ojkumena» [in Russian].
9. Wanghong Lia, Wade D. Cooka & Zhepeng Lia and Joe Zhu (2019). Efficiency measurement for hierarchical situations. *Journal of the operational research society*, Vol. 72 (3), 654 - 662 [in English].
10. Aulin, V.V., Holub, D.V., Bilichenko, V.V. & Zamurenko, A.S. (2020). Formuvannya pokaznykiv otsinky efektyvnosti transportnoho protsesu perevezen [Formation of indicators for assessing the efficiency of the transport process]. *Visnyk mashynobuduvannya ta transport – Herald of mechanical engineering and transport*, 1(11), 5-10 [in Ukrainian].
11. Divak, M.P., Porplicya, N.P. & Divak, T.M. (2018). *Identifikaciya diskretnih modelej dinamichnih sistem z intervalnimi danimi* [Identification of discrete models of dynamic systems with interval data]. Ternopil: VPC «Ekonomiczna dumka TNEU» [in Ukrainian].
12. Aulin, V.V., Holub, D.V., Bilichenko, V.V. & Velykodnyj, D.O. (2017). Metodolohiia pidkhodiv do doslidzhennia shliakhiv i sukupnosti faktoriv zabezpechennia nalezhnoho rivnia efektyvnosti i nadijnosti transportnykh system [Methodology of coming to the end of the road and success factors in securing the proper level of efficiency and reliability of transport systems]. *Visnyk mashynobuduvannya ta transportu – Herald of mechanical engineering and transport*, 2, 4-14 [in Ukrainian].

Dmytro Holub, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Methods and Approaches to Modeling the Effectiveness of Operational Objectives in Transport Systems

Methods and approaches to modeling the goals of operations in transport systems are given, which allows to obtain not only purposeful, but also flexibly oriented solutions when choosing a strategy for forecasting their work. Partial decision-making tasks for structuring the initial information using the mapping method are defined. The classification of factors by the nature of uncertainty is given, which is one of the results of solving the problem of uncertainty analysis. Tasks are formulated that allow to quickly receive, analyze and process information.

A formalized formulation of the problem of forming the initial set of strategies for modeling the problem situation in the transport system is presented. It was found that on the one hand, the set of alternatives between the desired result and the conditions of its implementation should be as wide as possible, which will ensure freedom of choice of the decision-maker and minimize the possibility of missing the optimal decision. It is determined that the initial set of strategies should be comprehensive and, therefore, quite narrow, which will allow the decision-maker to verify the alternatives on the available models with resource constraints.

It was found that many components of the task of forming the initial set of strategies are clearly not set and are heuristically formed by the decision maker. Taking into account the indicator of reliability of transport systems, the main directions of solving the problem of satisfying conflicting requirements for many initial strategies are identified.

It is found that the need, in the general case, to consider not one model, but their multilevel hierarchy is determined by the peculiarity of the efficiency study scheme, in which the description of the higher level depends on generalized and factorized lower level variables. The mathematical formula of the criterion of adaptability in the choice of solutions is given.

The set of features that can be used as a basis for the classification of decision-making tasks in the transport system on the basis of the degree of certainty of information about the problem situation is generalized.
transport system, model, operation, strategy, forecasting, analysis, tasks, efficiency, adaptability

Одержано (Received) 16.02.2022

Прорецензовано (Reviewed) 25.02.2022

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

ЗМІСТ

Галузеве машинобудування

<i>В.О. Дзюра, П.О. Марущак, Д.Л. Радик, М.Б. Сокіл</i> Динаміка відносних крутильних коливань при формуванні регулярного мікрорельєфу на внутрішніх циліндричних поверхнях	3
<i>Я.Б. Немировський, І.В. Шепеленко, М.В. Красота</i> Оцінка міцності поршневих пальців, відновлених за рахунок роздачі внутрішнього отвору	14
<i>А.Є. Чернай</i> Формування еквідистантних робочих поверхонь прецизійних спряжень деталей машин	23
<i>М.І. Денисенко</i> Підвищення технічного ресурсу і довговічності робочих органів ґрунтообробних сільськогосподарських машин	40
<i>М.В. Босий, В.М. Кропивний, О.В. Кузик, А.В. Кропивна, Л.А. Молокост</i> Термодинамічна енергоефективність парокompресійного теплового насоса на ґрунтових водах	47
<i>В.В. Аулін, А.В. Гриньків, С.В. Лисенко, О.М. Лівіцький, А.В. Бабій</i> Закономірності впливу високомодульних наповнювачів на розподіл полів напружень в поверхневих шарах деталей машин, виготовлених з полімерних композитних матеріалів	55
<i>А.О. Головатий</i> Підвищення ефективності роботи машинобудівного підприємства на основі логістично-спрямованого підходу	71
<i>Г. Д. Портнов, А.А. Тихий, В.В. Дарієнко, В.В. Пукалов</i> Підвищення ефективності конструкції кованого дворогого гака	86
Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології	
<i>О.С. Улічев, К.О. Буравченко, Л.І. Поліщук</i> Об'єктно-орієнтований підхід в програмуванні. Композиційна взаємодія об'єктів	98
<i>Н.М. Посторонко, Д.В. Трушаков, О.А. Козловський, М.О. Федотова</i> Створення ІКС «Чиста Україна» для моніторингу забруднення територій	105
<i>А. І. Котиш, В. В. Зінзура, Н. Ю. Гарасьова, О. І. Сіріков, В. П. Солдатенко</i> Підвищення точності визначення місця виникнення короткого замикання в електричних мережах номінальною напругою 110-150 кВ	111

Комп'ютерна інженерія*К.М. Марченко, О.В. Оришака, А.К. Марченко, А.М. Мельник*

Ризики впровадження штучного інтелекту в комп'ютерні системи 119

В.В. Босько, Л.В. Константинова, О.К. Коноплицька-Слободенюк, Д.В. Фесечко

Аналіз та дослідження фреймворку AngularJS як засобу розробки вебсайтів 124

Прикладна механіка*Ю.А. Невдаха, В.О. Дубовик, В.В. Пукалов, Н.А. Невдаха, Д.В. Можейко*

Уточнений розрахунок котків фрикційних механізмів 135

Матеріалознавство*Л. М. Кривоблоцька*

Напружений стан гнучких пластин з отвором 144

*В.О. Дубовик, О.Л. Пузирьов, Ю.А. Невдаха, В.В. Пукалов*Експериментальні дослідження двоструменевого способу захисту
розплавленого металу при наплавленні в середовищі CO₂ 154**Будівництво та цивільна інженерія***В.А. Настоящий, В.А. Пашинський, М.В. Пашинський, М. С.Якименко*Методика розрахунку несучої здатності сонячних панелей як елемента
забезпечення енергоефективності будівель 161*В.А. Пашинський, А.А. Тихий, М.В. Пашинський, С.О. Карпушин, В.В. Яцун*Порівняння методів розрахунку плитних фундаментів з урахуванням
результатів інженерно-геологічних вишукувань та геодезичних
спостережень за процесом просідання 168*В.А. Пашинський, М.В. Пашинський, В.В. Дарієнко*Метрологічне забезпечення контролю технічних характеристик
будівельних матеріалів і виробів 176*О.В. Лізунков*

Організація контролю викидів шкідливих речовин цементного заводу 183

*Вол. Вол. Яцун, В. В. Яцун, В. Ю. Данілов*Експериментальне дослідження універсальної будівельної вібромашини
широкого застосування 188**Агроінженерія***Ю.В. Кулешков, М.В. Красота, Т.В. Руденко, О.Л. Пузирьов, К.В.Зворигін*Підвищення подачі шестеренних насосів засобів транспорту та
сільськогосподарської техніки 197*А.С. Лімонт, З.А. Лімонт*

Коренева система рослин і характеристики стебел льону-довгунця 204

А.В. Бабій, В.О.Дзюра, І.В. Головецький

Дослідження впливу вертикальних коливань штанги обприскувача на рівномірність обприскування..... 216

В.Ф. Дідух, В.В. Буснюк, М.В. Бодак

Обґрунтування обладнання для збирання льону олійного зернозбиральним комбайном..... 226

А.С. Лімонт, З.А. Лімонт

Прогнозування параметрів кузовних машин для внесення твердих органічних добрив..... 236

Автомобільний транспорт

В.П. Сахно, С.М. Шарай, І.С. Мурований, В.П. Онищук, І.В. Човча

Вплив конструктивних і експлуатаційних факторів на стійкість руху автопоїзда з причепом категорії О1 244

О.Л. Ляшук, У.М. Плекан, О.П. Цьонь, Т.Б. Пиндус

Планування діяльності автотранспортного підприємства. Методичні аспекти. 256

А.В. Гриньків

Елементно-модульний метод системи технічного сервісу транспортних машин..... 263

С.В. Лисенко

Системно-спрямований підхід підвищення експлуатаційної надійності транспортних машин на етапах їх життєвого циклу..... 278

О.Л. Просяк

Системи управління тиском повітря в шинах транспортних засобів: їх конструктивні та функціональні особливості 289

Транспортні технології (за видами)

В.В. Аулін

Використання методів теорії сенситивів при розв'язанні завдань технічних, транспортних і виробничих систем і процесів 299

О.Л. Ляшук, О.П. Цьонь, В.О. Дзюра, М.В. Бабій, М.Є. Кристончук,

С.В. Лисенко, Ю.Д. Бодоряк

Дослідження безпеки дорожнього руху на автошляхах..... 311

Д.В. Голуб

Методи та підходи до моделювання ефективності цілей операцій в транспортних системах..... 317

CONTENT

Industrial Engineering

<i>Volodymyr Dzyura, Pavlo Maruschak, Dmytro Radyk, Mariya Sokil</i> Dynamics of Relative Torsional Oscillations During the Formation of a Regular Microrelief on Internal Cylindrical Surfaces	3
<i>Yakiv Nemyrovskiy, Ihor Shepelenko, Michael Krasota</i> Evaluation of the Strength of Piston Pins Restored by Deforming Broaching	14
<i>Andrii Chernai</i> Formation of Equidistant Working surfaces of Precision Conjugations of Machine parts.....	23
<i>Mykola Denisenko</i> Improving the Technical Resource and Durability of the Working Bodies of Tillage Agricultural Machines	40
<i>Mykola Bosiy, Volodymyr Kropivnyi, Olexandr Kuzyk, Alena Kropivna, Ludmyla Molokost</i> Thermodynamic Energy Efficiency of a Groundwater Heat Pump	47
<i>Viktor Aulin, ., Andrey Hrinkiv, Serhii Lysenko, Oleksandr Livitskyi, Andrii Babii</i> Regularities of Influence of High-modulus Fillers on the Distribution of Stress Fields in the Surface Layers of Machine Parts Made of Polymer Composite Materials	55
<i>Artem Holovatyi</i> Improving the Efficiency of the Machine-building Enterprise on the Basis of Logistics-Oriented.....	71
<i>Gennadii Portnov, Andrii Tykhyi, Viktor Dariienko, Viktor Pukalov</i> Improving the Efficiency of the Forged Two-horned Hook Design	86
Automation and Computer Integrated Technologies	
<i>Oleksandr Ulichev, Kostiantyn Buravchenko, Liudmyla Polishchuk</i> Object-oriented Approach in Programming. Compositional in Teraction of Objects	98
<i>Nazar Postoronko, Dmytro Trushakov, Oleksandr Kozlovskyi, Marianna Fedotova</i> Creation of an Information and Communication System «Clean Ukraine» for Monitoring Territory Pollution.....	105
<i>Andrii Kotysh, Vasyl Zinzura, Nataliia Harasova, Oleksandr Sirikov, Valentyn Soldatenko</i> Improving the Accuracy of Determining the Location of Short Circuits in Electrical Networks with a Nominal Voltage of 110-150 kV	111

Computer Engineering*Konstantyn Marchenko, Oleh Oryshaka, Anzhelyka Marchenko, Anna Melnick*

Risks of Implementing Artificial Intelligence in Computer Systems 119

Virtor Bosko, Liliia Konstantynova, Oksana Konoplitska-Slobodeniuk, Denis Fesechko

Analysis and Research of the angularJS Framework as a Website Development Tool..... 124

Applied Mechanics*Yuriy Nevdakha, Viktor Dubovyk, Viktor Pukalov, Natalia Nevdakha, D. Mozheiko*

The Calculation of Rollers of Friction Mechanisms is Specified 135

Materials Science*Larysa Kryvoblotska*

Stress State of Flexible Plates with a Hole..... 144

*Viktor Dubovyk, Olexandr Puzyrov, Yuriy Nevdakha, Viktor Pukalov*Experimental Studies of a Two-jet Method of Protection of Molten Metal
During Surfacing in CO₂ 154**Construction and Civil Engineering***Vladyslav Nastoyashchii, Viktor Pashynskiy, Mykola Pashynskiy, Serhii Yakimenko*Method for Calculating the Bearing Capacity of Solar Panels as an Element
of Ensuring the Energy Efficiency of Buildings 161*Viktor Pashynskiy, Andrii Tykhyi, Mykola Pashynskiy, Serhii Karpushyn, Volodymyr Yatsun*Comparison of Methods for Calculating Slab Foundations, Taking Into
Account the Results of Geotechnical Surveys and Geodetic Observations
of the Subsidence Process 168*Viktor Pashynskiy, Mykola Pashynskiy, Viktor Darienko*Metrological Control of Technical Characteristics Evaluation of Building
Materials and Products 176*Oleksandr Lizunkov*

Organization of Control of Emissions of Harmful Substances of a Cement Plant 183

*Volodymyr Yatsun, Volodymyr Yatsun, Vladislav Danilov*Experimental Study of a Universal Construction Vibrating Machine of Wide
Application 188**Agricultural Engineering***Yuriy Kuleshkov, Mykhailo Krasota, Timofey Rudenko, Olexandr Puzyrov, Kyrylo. Zvoryhin*

Increasing the Supply of Gear Pumps for Vehicles and Agricultural Machinery..... 197

Anatoliy Limont, Zlata Limont

Root System of Plants and Characteristics of Stalks of Flax 204

Andrii Babii, Volodymyr Dzyura, Ivan Holovetskyi

Investigation of the Effect of Vertical Oscillations of the Sprayer Boom on the Uniformity of Spraying 216

Volodymyr Didukh, Vitalij Busyijk, Maksym Bodak

Substantiation of Equipment for Harvesting Oil Flax with a Combine Harvester..... 226

Anatoliy Limont, Zlata Limont

Forecasting the Parameters of Body Machines for Solid Organic Fertilizers..... 236

Road Transport

Volodymyr Sakhno, Svitlana Sharay, Igor Murovany, Vasyl Onyshchuk,

Igor Chovcha

Influence of Constructive and Operational Factors on Stability of Movement of a Road Train with the Trailer of the O1 Category 244

Oleg Lyashuk, Uliana Plekan, Oleg Tson, Tetyana Pyndus

Planning the Activities of the Motor Transport Enterprise. Methodological Aspects..... 256

Andrey Hrinkiv

Element-modular Method of the System of Technical Service of Transport Machines..... 263

Serhii Lysenko

System-oriented Approach to Improving the Operational Reliability of Transport Vehicles at the Stages of Their Life Cycle..... 278

Alexey Prosyak

Air Pressure Control Systems in Vehicle Tires: Their Constructional and Functional Features 289

Transport Technologies (by types)

Viktor Aulin

The Use of Methods of Theory of Sensitivities in Solving Problems of Technical, Transport and Production Systems and Processes 299

Oleg Lyashuk, Oleg Tson, Volodymyr Dzyura, Mariia Babii, Mykhailo Krystopchuk,

Serhii Lysenko, Yurii Bodoriak

Research of Road Safety on Highways of Ternopil Region 311

Dmytro Holub

Methods and Approaches to Modeling the Effectiveness of Operational Objectives in Transport Systems 317

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 мовами – 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: stat_kntu@ukr.net, aulinvv@gmail.com

ДОВІДКА ПРО АВТОРА
українською та англійською мовами

	Українською	Англійською
Прізвище, ім'я, по-батькові:		
Місце роботи (повна назва, без аббревіатур), місто, країна:		
Посада (повна назва, без аббревіатур):		
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 5(36)
Частина I

Відповідальний за випуск І.М. Березюк, О.М. Кузик

Комп'ютерна верстка І.М. Каліч

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 31.03.2022р. Формат 60х84/8. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Офсетний друк. Умов. друк. арк. 42
Тираж 300 прим. Зам. № 0752