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 1(32)

Кропивницький • 2019

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 1(32)

Kropyvnytskyi • 2019

УДК 62:631.3

Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. Вип. 1(32). Кропивницький: ЦНТУ. 2019. 250 с.

У науковому віснику представлені статті, присвячені проблемам проектування та експлуатації сільськогосподарської техніки, технології виробництва, експлуатації і ремонту засобів транспорту, транспортних технологій і логістики, будівництва, матеріалознавства, електротехнічних комплексів, енергозбереження, 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 та докторантів університету, а також науковців інших навчальних закладів 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 № 11 від 4 червня 2019 року.

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 (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», 14 «Електрична інженерія», 15 «Автоматизація та приладобудування», 17 «Електроніка та телекомунікації»); Березюк І.А., канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 12 «Інформаційні технології», 14 «Електрична інженерія», 15 «Автоматизація та приладобудування», 17 «Електроніка та телекомунікації»); Бєлоцерковський М.А., д-р техн. наук, проф. (Білорусь); Боков В.М., канд. техн. наук, доц.; Варума Аріфа, Dr PhD (Нігер); Віхрова Л.Г., канд. техн. наук, проф.; Гамалій В.Ф., д-р ф.-м. наук, проф.; Гасенко А.В., канд. техн. наук, доц.; Жорнік В.І., д-р техн. наук (Білорусь); Зоценко М.Л., д-р техн. наук, проф.; Іващук В.В., д-р техн. наук, доц.; Кириченко А.М., д-р техн. наук, проф.; Клименко В.В., д-р техн. наук, проф.; Немировський Я.Б., д-р техн. наук; Павленко І.І., д-р техн. наук, проф.; Сало В. М., д-р техн. наук, проф.; Смірнов О.А., д-р техн. наук, проф.; Солових Є.К., д-р техн. наук, проф.; Сторчак М.Г. д-р техн. наук, ст. наук. співр. (Німеччина); Філімоніхін Г.Б., д-р техн. наук, проф.

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 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).

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

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

ISSN 2664-262X (p) DOI: 10.32515/2664-262X

© Центральноукраїнський національний технічний університет, 2019

МАШИНІ І ЗАСОБИ МЕХАНІЗАЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ПЕРЕРОБНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 631.363.2 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).3-10

Р.В. Кісільов, канд. техн. наук, **П.Г. Лузан,** доц., канд. техн. наук, **І.П. Сисоліна,** доц., канд. техн. наук, **О.Р. Лузан**, канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: ruslan_vik@ukr.net

Вдосконалення конструкції дозатора кормів грабельного типу

В статі проведений аналіз літературних досліджень і наукових публікацій по дозуванню кормів та запропонована нова конструкція вертикального транспортерного бункерного відокремлюючого дозатора, який обладнаний круглоланковим ланцюгом і гребінками з пальцями. Теоретично обґрунтовано конструктивні параметри, функціонально-технологічна схема на базі бункера-дозатора БДК-Ф-70-20, режими роботи робочих органів, крок встановлення гребінок, довжина пальців гребінки та приведені особливості розвантаження кормів дозатором на поперечний горизонтальний транспортер-дозатор (друга ступінь дозування).
дозатор кормів, бітер, транспортер, гребінка, пальці, кормосуміш, бункер, ланцюг

Р.В. Кисилев, канд. техн. наук, **П.Г. Лузан,** доц., канд. техн. наук, **И.П. Сысолина,** доц., канд. техн. наук, **Е.Р. Лузан,** канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина
Усовершенствование конструкции дозатора кормов грабельного типа
В статье проведен анализ литературных исследований и научных публикаций по дозированию кормов и предложена новая конструкция вертикального транспортерного бункерного отделяющего дозатора, который оборудован круглозвенной цепью и гребенками с пальцами. Теоретически обоснованы конструктивные параметры, функционально-технологическая схема на основе бункера-дозатора БДК-Ф-70-20, режимы рабочих органов, шаг установки гребенок, длина пальцев гребенки и приведены особенности разгрузки кормов дозатором на поперечный горизонтальный транспортер-дозатор (вторая ступень дозирования)
дозатор кормов, битер, транспортер, гребенка, пальцы, кормосмесь, бункер, цепь

Постановка проблеми. Слабкі темпи виробництва продуктів тваринництва, які спостерігаються останнім часом в Україні, обумовлені незадовільним станом розвитку кормової бази. Недостатня забезпеченість тваринництва кормами, низька їх якість та порушення вимог технології підготовки їх до згодовування призводить до того, що генетичний потенціал тварин реалізується лише на 40…60%. Корми значною мірою є визначальними серед складових економічних показників, оскільки в структурі собівартості тваринницької продукції на їх частку припадає до 70% витрат [1, 4, 5].

Досвід застосування інтенсивних повносистемних технологій виробництва продукції скотарства показує, що поряд з надійним і збалансованим забезпеченням господарств якісними кормами вдосконалюються традиційні системи годування, які направлені на розробку економічно ефективних механізованих технологій переробки кормів і приготування повнораціонних та збалансованих кормосумішей з різних кормів і поживних компонентів, що задовольняє нові сучасні підвищені технологічні вимоги та особливості фізіології годування тварин, помітно сприяє підвищенню

© Р.В. Кісільов, П.Г. Лузан, І.П. Сисоліна, О.Р. Лузан, 2019

продуктивності їх та дозволяє довести потенційні можливості цих факторів до 65% у продуктивності тварин [2, 6, 7]. Крім того добре підготовлені корми і кормосуміші сприяють підвищенню продуктивності тварин, поліпшують їх стан і вгодованість, зменшують витрати кормів та покращують якість продукції [8, 9].

Однією з найбільш відповідальних і складних операцій приготування кормів до згодовування і збалансованих кормових сумішей є дозування кормів і компонентів суворо встановленої кількості за рецептом добових раціонів технологічних груп тварин. Порушення співвідношення компонентів в суміші призводить до зниження або підвищення поживності її і в кінцевому рахунку до перевитрат кормів та недобору продукції. Ці функції виконують накопичувальні бункери, кормопереробні машини, транспортери, регулювальні засоби та спеціальні відокремлюючі дозуючі і вирівнюючі пристрої [3, 9, 10, 11].

В практиці кормоприготування і роздавання кормів застосовують масове або об'ємне дозування, кожне з яких може бути порційним або безперервним [3, 4, 5, 6, 10]. В системі використання механізованих кормоцехів, кормороздавачів і кормопереробних машин за кордоном і в Україні найбільш широко застосовують для дозування малосипучих грубих, соковитих і стебельних кормів ланцюгово-планкові бункерні живильники з транспортерними і бітерними дозуючими засобами різного конструктивного виконання. Вони відрізняються між собою конструкцією робочих органів подаючих конвеєрів, транспортерів-відокремлювачів і бітерів, їх кількістю і розташуванням, кутом нахилу транспортерних живильників до горизонту, принципом роботи і приймальною частиною [3, 10, 11]. Вивчення й узагальнюючий аналіз застосування механізованих кормоцехів, кормороздавачів і кормопереробних машин в фермерських господарствах різних типорозмірів свідчить, що дозування грубих, соковитих і стебельних кормів не задовольняє зоотехнічним і технологічним вимогам, технічне обладнання має складну конструкцію, велику металомісткість і енергомісткість, а процеси не автоматизовані, що призводить до значних витрат, зниження ефективності та якості приготування кормів і кормосумішей. До цього часу не виявлені раціональні параметри робочих органів і режимів їх роботи.

У зв'язку з цим розробка нових, модернізація і удосконалення традиційних технологій і класичних конструкцій дозаторів кормів для приготування високоефективних кормових сумішей до згодовування і роздавання кормів має актуальне питання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як свідчать літературні джерела, практика виробництва дозаторів і наукові дослідження великий фундаментальний вклад у створення і розвиток засобів комплексної механізації приготування кормових сумішей, дозування і змішування кормів зробили відомі зарубіжні і вітчизняні вчені Кукта Г.М., Кулаковський І.В., Кірпічніков Ф.С., Ревенко І.І. [5], Резнік Є.І., Мельніков С.В., Сечкін В.С., Омельяненко А.А., Рижов С.В., Борісовець К.Ф., Дев'яткін А.І., Зельнер В.Р., Завражнов А.І., Ніколаєв Д.І., Земсков В.І., Єгорченков М.І., Шамов М.Г., Лобановський Г.А., Вагін Є.А., Сироватка В.І. та багато інших. В результаті наукових досліджень сформульовані основні положення теорії дозування і змішування кормів, встановлені загальні залежності між факторами, що впливають на процеси, і основними конструктивно-режимними параметрами дозаторів та змішувачів, розроблені основи технології дозування і приготування кормових сумішок та удосконалення технологічного обладнання.

Технологічний процес дозування малосипучих кормів відбувається із застосуванням одно- і двоступеневої системи подачі. Моноліт кормової сировини в бункері подається головним ланцюгово-планковим конвеєром до відокремлюючого дозуючого пристрою, який складається з ротаційних бітерів з горизонтальним чи

вертикальним розташуванням та з похилих або вертикальних зчісуючих транспортерів. Найбільш повно представлений аналіз робочого процесу бункерних дозаторів з транспортерно-бітерними дозуючо-вивантажувальними технічними засобами в наукових роботах В.Г. Коби, Г.А. Лобановського і Г.М. Кукти. Доведено, що бітерні дозатори гребінчатого типу з радіальними пальцями при мінімальній, середній і максимальній подачі нерівномірно дозують матеріал, на привід їх витрачається багато енергії на стискання корму моноліта. Так, у бітерних дозаторів ПЗМ-1,5, АВМ, КТУ-20.000, ПДК-Ф-3 з одностадійним дозуванням силосу і подрібненої соломи нерівномірність подачі маси складає 30…50%, а потужність встановлених двигунів – 8…10 кВт (табл. 1).

Проведений аналітичний аналіз процесу дозування ротаційними бітерами показує, що транспортерно-бітерний дозуючий робочий орган штифтового типу має істотні недоліки, які обумовлені недосконалістю конструкції його, негативними діями відцентрових сил і кругових зусиль пальців гребінок, нерівномірністю подачі транспортером, щільністю та поверхні завантаженого бурта в бункері, відставанням або проковзуванням корма відносно конвеєра, зменшенням поперечної площі моноліту при вивантаженні корма з бункера тощо [7].

Таблиця 1 – Технічна характеристика об’ємних живильників і бункерів-дозаторів грубих, соковитих і стебельних подрібнених кормів

Показники роботи і параметри	КТУ-10А КТУ-20.000	ПЗМ-1,5	Бункер-живильник АВМ	ДСК-30	КПГ-10.46.15 (ПДК-10)	КП-10	БДК-Ф-70-20	С-120 Супер F (Італія)	Н.10 ФРН
Продуктив-ність, т/год	4-30	2,6-14	3-5	5-20	3,6-10	0,5-5	5-20	3-10	3-10
Місткість бункера, $м^3$	8-10	до 22	15	-	30	5	20	30	30
Тип дозатора	Одно-стадій-ний бітер-ний	Одно-стадій-ний зчісую-чими бітерами	Одно-стадій-ний зчісую-чими бітерами	2-х стадій-ний бітерний зчісую-чий з дозато-ром КТУ-10А	Одно-стадій-ний зчісу-ючий бітер-ний	Відбій-ний зчісую-чий транс-портер одно-стадій-ний	2-х стадій-ний бітерний і бара-банний зчісу-ючий	Одно-стадійний горизон-тальні відбійні бітери	Одно-стадій-ний відбійні бітери
Нерівно-мірність подачі кормів, %	35-47	35-59	30-40	±10-15	30-40	30-40	±10-15	25-30	25-30
Потужність приводу, кВт	7,5	7,7	11,26	3	8,5	5,2	10	-	-
Маса, кг	2585	4610	4610	400 (без КТУ-10А) 2585	5246	1550	3900	-	-

Джерело: [5]

Постановка завдання. Метою досліджень є підвищення якості і ефективності приготування кормів і виготовлення кормових сумішей для ВРХ шляхом розробки і удосконалення вертикального ланцюгового транспортерного дозатора з застосуванням гребінок грабельного типу з пальцями та визначення конструктивних і технологічних параметрів робочих органів бункерного дозатора.

Виклад основного матеріалу. Недоліки бітерних дозаторів можуть бути усунені, якщо обертальний рух пальцевих гребінок в моноліті корму замінити поступальним рухом вертикального ланцюгового відокремлюючого транспортера. При застосуванні такого дозатора підвищується якість дозування, зменшується енергомісткість процесу, а небажані негативні сили інерції і кругового зусилля пальців бітерного дозатора повністю виключаються.

Для цього запропонована технологічна схема дозатора з вертикальним транспортером грабельного типу на базі бункера-дозатора БДК-Ф-70-20, який обладнаний ведучим і веденим валами, гребінками з пальцями, круглоланковими ланцюгами, верхнім вирівнюючим бітером та поздовжнім горизонтальним транспортером (перша ступінь дозування) і поперечним транспортером зі зчісуючим бітерним дозатором (друга ступінь дозування).

Пропускна здатність транспортерної системи дозування обумовлюється параметрами вертикального транспортерного дозатора і поздовжнього подаючого конвеєра. Нормальна робота дозуючого механізму забезпечується при умові

$$\lambda_{кв} = \frac{\vartheta_{кв}}{\vartheta_{п}} \geq 1, \qquad (1)$$

де $\lambda_{êâ}$ - коефіцієнт, що характеризує сипучість матеріалу;

$\vartheta_{кв}$ – швидкість руху робочого елемента кормовідокремлювача, м/с;

$\vartheta_{п}$ – швидкість подачі матеріалу, м/с.

При русі ланцюгів з гребінками транспортерного дозатора, кінці пальців переміщуються за складною траєкторією (рис. 1). Витрати дозуючого пристрою визначаються за формулою:

$$Q_{кв} = \frac{BH\rho_{к}\Delta X_0 \vartheta_{кв}}{\pi R + L_0}, \qquad (2)$$

де *B, H* – відповідно ширина і висота бункера-накопичувача, м;

ΔX_0 – величина проникнення кінця пальців гребінки в моноліт при переміщенні їх за один оберт транспортера, м;

R – радіус зірочки транспортера, м;

$\rho_к$ – щільність корма на кормовідокремлювачі, кг/м^3;

L_0 – міжцентрова відстань валів транспортера, м.

За час руху кінця пальців граблини з нижнього положення A_0 в верхнє $A_0^{'}$ пальці входять в моноліт корма на глибину ΔX_0, яка визначається з виразу:

$$\Delta X_0 = K_0 \vartheta_п \left(\frac{\pi}{\omega} + \frac{L_0}{\vartheta_{кв}}\right) = \frac{K_0}{\lambda_{кв}}\left(\pi R + L_0\right), \qquad (3)$$

де K_0 – коефіцієнт, який враховує відставання моноліту корму від подаючого транспортера;

ω – кутова швидкість гребінок, с$^{-1}$.

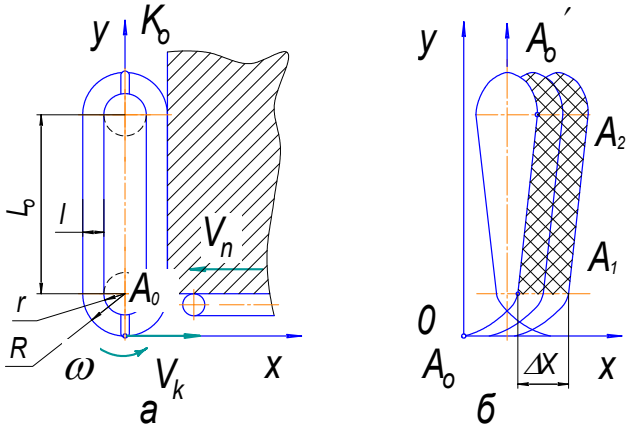


Рисунок 1 – Кінематична схема роботи транспортерного дозатора і взаємодія його з кормовим, монолітом (а); траєкторія руху пальців граблини (б)

Джерело: [1]

Для нормальної роботи дозатора необхідно, щоб витрати кормовідокремлювача були більшими або рівними витратам подаючого транспортера:

$$BH\rho\vartheta_n K_0 \le Bl_n\vartheta_{кв}\rho_к\varphi_к, \tag{4}$$

де l_n – довжина пальців граблини, м;

$\varphi_к$ – коефіцієнт, який враховує ступінь заповнення простору між граблинами дозатора;

ρ – щільність корма в моноліті, кг/м^3.

Таким чином витрати бункерного дозатора транспортерного типу визначається за формулою:

$$Q_{кв} = \frac{BH\vartheta_{кв}\rho_к K_0}{\lambda_{кв}}. \tag{5}$$

Крок граблин вертикального дозатора приймається за формулою:

$$t_{гр} \ge (2...4)l_n \ . \tag{6}$$

Для забезпечення рівномірного розвантаження корму по ширині поперечного транспортера при двоступеневому дозуванні проведений аналіз технологічного процесу розвантаження корму з гребінчастої планки вертикального транспортерного дозатора (рис. 2).

В залежності від величини полюсної відстані h виникають три режими розвантаження кормів: відцентровий, відцентрово-самопливний і самопливний. Відцентрове розвантаження характеризується невеликою величиною полюсної відстані $h \le R$. Відцентрово-самопливне розвантаження кормів відбувається в межах $R<h<R_л$, а самопливне – при $h \ge R_л$.

Поведінку частки корму m при розвантаженні можна записати рівнянням

$$T\cos\varphi = fT\sin\varphi + 2fm\omega x' + mx'',$$

де T – рівнодіюча сила від відцентрової сили $mR\omega^2$ і сили ваги mg.

φ – кут між напрямком гребінки і силою T;

f – коефіцієнт тертя насипного матеріалу.

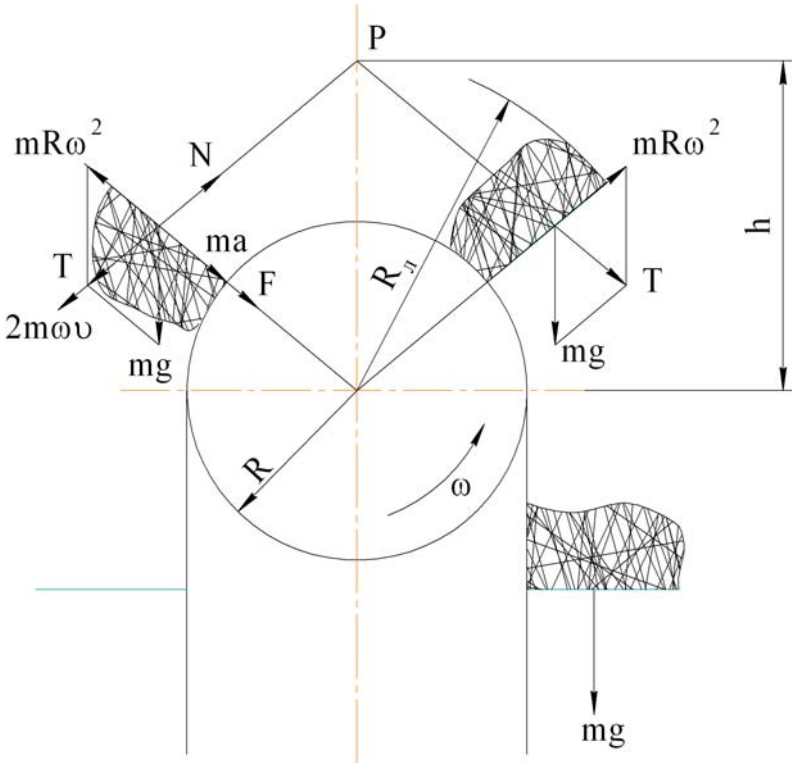


Рисунок 2 – Процес розвантаження корма з гребінчастої планки вертикального транспортерного дозатора

Джерело: [1]

Абсолютна швидкість відриву часток від гребінки визначається геометричною сумою відносної і переносної швидкостей

$$\vartheta = \vartheta_к + u\,, \tag{7}$$

де $\vartheta_ê$ – кругова швидкість руху;

u – відносна швидкість руху.

Величина відносної швидкості руху частки

$$u = -\frac{R\omega}{2f}\cdot e^{-2f\omega t} + \frac{g(\sin\varphi + f\cos\varphi)}{2f}\cdot e^{-2f\omega t} + \frac{R\omega}{2f} - \frac{g(\sin\varphi + f\cos\varphi)}{2f\omega}\,, \tag{8}$$

Полюсна відстань від горизонтальної вісі до точки Р визначається з рівняння

$$n_0 = \frac{g}{\omega^2} = \frac{895}{n^2}\,, \tag{9}$$

де *n* – частота обертання ведучого вала транспортера, об/хв.

Висновки. Проведені теоретичні дослідження процесу дозування кормів дозволили визначити конструктивні та режимні параметри розробленої конструкції вертикального ланцюгово-планчатого транспортерного дозатора гребінчастого типу. При цьому підвищилась його пропускна здатність та рівномірність подачі корма у порівнянні з бітерними дозаторами, що задовольняє необхідне дозування об’єма подачі корма поздовжнім конвеєром.

Список літератури

1. Кравчук В.І., Луценко М.М., Мечта М.П. Прогресивні технології заготівлі, приготування і роздавання кормів. Киев: Фенікс, 2008. 104 с.
2. Лазаревич А. П. Однотипові кормосуміші для молочної худоби. *Тваринництво України*. 2007. № 4. С. 33-35.
3. Adgidzi D., Mu'azu A., Olorunsogo S.T. and Shiawoya E.L. Design considerations ofmixer-pelleting machine for processing animal feeds. 7th annual engineering conference, School of Engineering and Engineering Technology, FUT Minna. 28-30 June 2006. URL: http://www.insikapub.com/Vol-01/No-03/IJBAS(1)(3).pdf (дата обращения: 10.10.2018)
4. Хмельовський В.С. Оцінка рівномірності змішування кормів. *Збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-практичної конференції,* Київ НУБІП України. 2017. С. 77–78. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/_obuhovski_chitannya_2017.pdf#page=77 (дата обращения: 10.12.2017)
5. Ревенко И., Ревенко Ю. Качество приготовления и эффективность использования концентрированных и комбинированных кормов. *MOTROL*. Lublin-Rzeszow. 2013. Вип. 15, № 3. С. 356–361. URL: http://agro.icm.edu.pl/agro/element/bwmeta1.element.agro-5bafa802-c1cc-4705-acd3-e3af4d984d88/c/356-361.pdf (дата обращения: 19.10.2018)
6. Шевченко І.А., Павліченко В. М., Лиходід В. В., Забудченко В. М. Аналіз конструкцій технічних засобів для виробництва вологих високозасвоюваних кормів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб*., 2013. Вип. 43, ч.І, С. 179–185. URL: http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/2701 (дата обращения: 19. 09.2018)
7. Ревенко І.І., Брагінець М.В., Ребенко В.І. Машини та обладнання для тваринництва: посібник-практикум. Київ: Кондор. 2009. 730 с. URL: http://www.twirpx.com/file/2085032/ (дата обращения: 19.10.2018)
8. Шацький В.В., Мілько Д.А., Болтянський Б.В.,. Коломієць С.М., Семенцов В.І. Якість змішування компонентів раціону – основа підвищення продуктивності тварин. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2013. Вип. 1, т. 3. С. 43–50. URL: http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/310/1/266.pdf (дата обращения: 19.10.2018)
9. Завражнов А.И. Механизация приготовления и хранения кормов. Москва: Агропромиздат. 1990. 336 с.
10. Шацкий В.В. Математическое моделирование динамичности плотности и качества кормовой смеси для животных. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету.* Мелітополь. 2012. Вип.2, т.2. С. 3–19. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Vkhdtusg_2014_144_32.pdf (дата обращения: 12.11.2018)
11. Шабельник Б.П. Теорія та розрахунок машин для тваринництва: монографія. Харків: ХДТУСГ. 2002. 216 с.

References

1. Kravchuk V.I., Lutsenko M.M., Mechta M.P. (2008). *Prohresyvni tekhnolohii zahotivli, pryhotuvannia i rozdavannia kormiv [Progressive harvesting technologies, preparation and distribution of feed]*. Kyev: Feniks, 104 [in Ukrainian].
2. Lazarevych, A. P. (2007). Odnotypovi kormosumishi dlia molochnoi khudoby [Preparation of feed mixtures by the combined blender]. *Tvarynnytstvo Ukrainy – Bulletin of Agricultural Science,* isse *4,* 33-35 [in Ukrainian].
3. Adgidzi, D., Mu'azu, A., Olorunsogo, S.T. & Shiawoya, E.L. (2006). Design considerations ofmixer-pelleting machine for processing animal feeds. *7th annual engineering conference,* School of Engineering and Engineering Technology, FUT Minna. 28-30 June 2006. Retrieved from http://www.insikapub.com/Vol-01/No-03/IJBAS(1)(3).pdf [in English].
4. Khmel'ovs'kyj, V.S. (2017). Otsinka rivnomirnosti zmishuvannia kormiv [Assessment of the uniformity of feed mixing]. *XII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsia – 12th International Scientific and Practial Conference* (pp.77-78). Kyiv: NUBIP Ukrainy. Retrieved from https://nubip.edu.ua/sites/default/files/_obuhovski_chitannya_2017.pdf#page=77 [in Ukrainian].
5. Revenko, I. & Revenko, Ju. (2013). Kachestvo prigotovlenija i jeffektivnost' ispol'zovanija koncentrirovannyh i kombinirovannyh kormov [Quality of preparation and efficiency of using of concentrated and combined fodder]. *Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. MOTROL. Lublin-Rzeszow. *Vol. 15, 3*, 356–361. Retrieved from

http://agro.icm.edu.pl/agro/element/bwmeta1.element.agro-5bafa802-c1cc-4705-acd3-e3af4d984d88/c/356-361.pdf [in Russian].

6. Shevchenko, I.A., Pavlichenko, V.M., Lykhodid, V.V. & Zabudchenko, V.M. (2013). Analiz konstruktsij tekhnichnykh zasobiv dlia vyrobnytstva volohykh vysokozasvoiuvanykh kormiv [Analysis of the constructions of the technical means to produce wet highly digestible food]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil's'kohospodars'kykh mashyn: zahal'noderzh. mizhvid. nauk.-tekhn. zb. – National Interagency Scientific and Technical Collection of Works. Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines*, *Vol. 43*, *1*, 179–185. Retrieved from http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/2701 [in Ukrainian].
7. Revenko, I.I., Brahinets', M.V. & Rebenko, V.I. (2009). Mashyny ta obladnannia dlia tvarynnytstva [Livestock machinery and equipment]. Kyiv: Kondor. *twirpx.com.* Retrieved from http://www.twirpx.com/file/2085032/ [in Ukrainian].
8. Shats'kyj, V.V., Mil'ko, D.A., Boltians'kyj, B.V.,. Kolomiiets', S.M. & Sementsov, V.I. (2013). Yakist' zmishuvannia komponentiv ratsionu – osnova pidvyschennia produktyvnosti tvaryn [Quality of ration components mixing is basis of increase of the animals productivity]. *Naukovyj visnyk Tavrijs'koho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu – Scientific Bulletin of the Tavrida State Agrotechnological University*, *Vol. 1*, *3*, 43–50. Retrieved from http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdatu/pdf1t3/11SVVIAP.pdf [in Ukrainian].
9. Zavrazhnov, A.I. (1990). *Mehanizacija prigotovlenija i hranenija kormov [Mechanization of preparation and storage of feed]*. Moskow: Agropromizdat [in Russian].
10. Shackij, V.V. (2012). Matematicheskoe modelirovanie dinamichnosti plotnosti i kachestva kormovoj smesi dlja zhivotnyh [Mathematical modeling of the dynamics of density and quality of the feed mixture for animals]. *Naukovyj visnyk Tavrijs'koho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu – Scientific Bulletin of the Tavrida State Agrotechnological University*, *Vol. 2*, *2*, 3–19. Retrieved from http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Vkhdtusg_2014_144_32.pdf [in Russian].
11. Shabel'nyk, B.P. (2002). *Teoriia ta rozrakhunok mashyn dlia tvarynnytstva [Theory and calculation of livestock machinery]*. Kharkiv: KhDTUSH [in Ukrainian].

Ruslan Kisilyov, PhD tech. sci**., Petro Luzan**, Assoc. Prof., PhD tech. sci**., Iryna Sysolina,** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olena Luzan**, PhD tech. sci
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Improvement of the Rake-type Feed Metering Unit

The experience of using intensive full-system technologies for livestock production shows that, along with reliable and balanced provision of farms with high quality feeds, traditional feeding systems are being improved, which are aimed at the development of economically efficient mechanized feed processing technologies and the preparation of full-range and balanced feed mixtures.

In the article, an analysis of literary research and scientific publications on the dosage of feed by rotary biota. This process showed that the transporter-bitumen dosing working element of the type-type has significant drawbacks, which are due to the imperfection of its construction, the negative effects of centrifugal forces and the circular efforts of the fingers of the comb, the unevenness of the conveyor supply, the density and the surface of the loaded bark in the bunker, the lagging or slipping of the feed relative to conveyor, by reducing the transverse area of the monolith when unloading feed from the bunker.

Disadvantages of bitumen dispensers can be eliminated if the rotary motion of the comb edges in the feed monolith is replaced by the translational motion of the vertical chain separating conveyor. When using such a dispenser, the quality of the dosage increases, the energy intensity of the process decreases, and the unwanted negative forces of inertia and the circular effort of the fingers of the bitumen dispenser are completely excluded.

In the article the analysis of literary researches and scientific publications is conducted on the dosage of forages and the new construction of vertical conveyer bunker separating metering device which is equipped chain and combs with fingers is offered. Structural parameters, functionally-technological chart on the basis of bunker-metering device of BDK-F-70-20, modes of workings organs, step of setting of combs, are grounded in theory, length of fingers of comb and the features of unloading of forages a metering device are resulted on a transversal horizontal conveyer-metering device (second stage of dosage)

The theoretical studies of the feed dosing process have confirmed the advantage of the developed design of the improved vertical chain-flat conveyor feeder of the comb type and improved the quality of the separation of the feed monolith by the working bodies of the conveyor.

feed rationer, beater, transporter, chaser, fingers , feed mixtures, tanker, chain

Одержано (Received) 27.02.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 14.03.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

УДК 631.362.3 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).11-16

І.О. Пісарькова, інженер
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e–mail: pisarkovairyna@i.ua

Травмування зерна пшениці зерноочисною машиною ОВУ–25 та шляхи його зниження

Проведені дослідження з визначення рівня механічного травмування зерна при первинному очищенні машиною ОВУ–25. Отримана залежність коефіцієнта пошкодження (Кп, %) зерна від вологості (W, %) в різних зонах машини. Данні служать для вибору геометрії поверхонь робочих органів очисника вороху з метою зниження травмування зерна.
травмування, удар, тертя, зерно, вологість, контрольні зони

И.А. Писарькова, инженер
Центральноукраинский национальний технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Травмирование зерна пшеницы зерноочистной машиной ОВУ–25 и пути его снижения

Проведены исследования для определения уровня механического травмирования зерна при первичной очистке на машине ОВУ–25. Полученны зависимости коэффициента повреждения (Кп,%) зерна от влажности (W,%) в разных зонах машины. Данные служат для выбора геометрии поверхностей рабочих органов очистителя вороха с целью снижения травмирования зерна.
травмирование, удар, трение, зерно, влажность, контрольные зоны

Постановка проблеми. Підготовка зібраного зерна передбачає багаторазовий його обробіток різними машинами та обладнанням, внаслідок взаємодії з робочими органами яких воно може травмуватися чи пошкодитися. Тому сучасні технічні засоби та технологічні лінії не повною мірою забезпечують отримання якісного зерна та насіння після проходження різних технологічних процесів, рівень травмування зернівок на них майже такий, як і при збиранні, а інколи і більший.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідники Дерев´янко Д.А. [2–5], Тарасенко А.П. [8–10], Гімадієв А.М. [1], Кирпа М.Я. [6], Кузнецов В.В. [7] та інші вважають, що, залежно від агрозон і умов вирощування, кожен відсоток травмованого насіння озимих приводить до значного зниження урожаю.

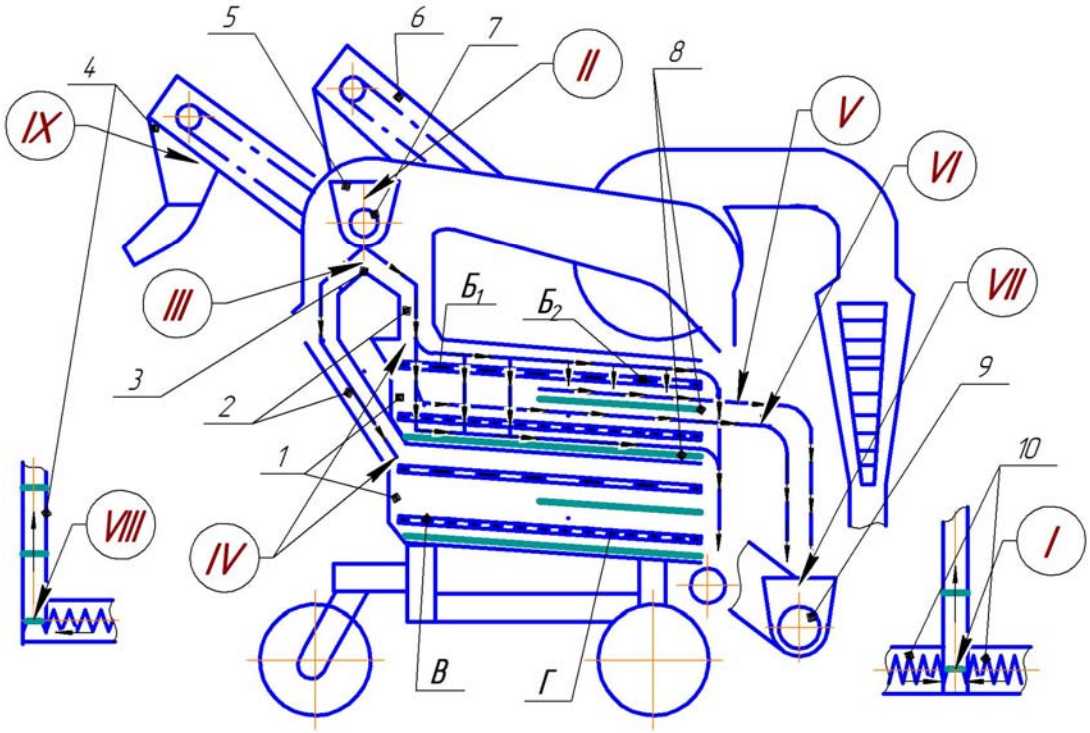
Постановка завдання. Дослідити вплив робочих і транспортуючих органів очисника вороху універсального на травмування і якість насіння з метою забезпечення мінімального впливу робочих органів технічних засобів на зерновий матеріал.

Виклад основного матеріалу. Травмування зернівок у зерноочисній машині відбувається по ланцюжку транспортування і очищення зернового матеріалу, умовно розділеного на контрольні зони визначення видів і рівнів травм.

Експериментальні дослідження виконувалися у виробничих умовах із використанням технічних засобів за стандартними методиками. Починається травмування в контрольній зоні *I* під час захоплення і транспортування зернового матеріалу двома Т–подібно розташованими шнековими живильниками (10) (рис. 1) і підведення його до нижньої частини похилого скребкового транспортера (6) завантажувача (за рахунок ударів і тертя зерна по поверхням току і шнеків). Далі у зоні *II* зернівки травмує похилий скребковий транспортер, який переміщує матеріал в

© І.О. Пісарькова, 2019

приймальний лоток (5) пристрою живлення (за рахунок ударів і тертя зерна по нижній частині кожуха транспортера, ланцюгу і скребкам). У зоні *III* розподільний шнек пристрою живлення (7) травмує зерно при розподіленні його по ширині камер із повітряними робочими каналами (удари і тертя зернівок по поверхням розподільного шнеку і клапана–живильника). Зернівки продовжують травмуватися при проході зони *IV* після контакту з розподільником (3) і руху зернового матеріалу в повітряних каналах (2). Потім матеріал травмується на верхньому і нижньому решітних станах (1) за рахунок ударів і тертя зерна по решетах $Б_1$, $Б_2$, В, Г, боковинам решітних станів, скатних дошках (8) та під час видавлювання зерна, що застрягло в отворах решіт, щітковими очисниками. Наступні контрольні зони: *V* (більш крупне зерно) – схід з решета $Б_2$ і *VI* (дрібніше зерно) – схід з решета Г. Сходи (чисте зерно) з решіт $Б_2$ і Г об'єднуються (зона *VII*) і надходять до шнекового транспортера (10) відвантажувача чистого зерна, який травмує зерно, переміщуючи його до нижньої головки відвантажувача (5) (зона *VIII*). Похилий скребковий транспортер (4) підіймає чисте зерно, травмуючи його аналогічно похилому скребковому транспортеру, до поворотного жолоба (зона *IX*) і направляє його або в транспортний пристрій, або утворює за машиною бурт очищеного зерна.



$Б_1$, $Б_2$, В, Г – решета; I–IX – зони взяття проб; 1 – решітні стани, 2 – повітряні канали, 3 – розподільник, 4 – скребковий транспортер відвантажувача, 5– приймальний лоток, 6 – скребковий транспортер завантажувача, 7 – шнек–розподільник, , 8 – скатні дошки, 9 – шнек відвантажувала; 10 – шнекові живильники завантажувача

Рисунок 1 – Схема ОВУ–25

Джерело: Розроблено автором на базі технологічної схеми роботи машини ОВУ-25

Таблиця 1 – Травмування зернівок пшениці при первинному очищенні на машині ОВУ–25

Зони взяття проб	% пошкоджених зернівок різних партій зерна для різних вологості W(%) і травмованості K (%) зерна після комбайна							
	Партія зерна 1 W=22,4% K=18,16%	Партія зерна 2 W=17,9% K=19,58%	Партія зерна 3 W=16,1% K=21,43%	Партія зерна 4 W=14,2% K=24,62%	Партія зерна 5 W=13,8% K=25,74%	Партія зерна 6 W=12,9% K=28,35%	Партія зерна 7 W=12,2% K=30,06%	Партія зерна 8 W=11,7% K=34,41%
I	1,65	1,92	2,32	2,81	2,93	3,25	3,42	3,91
II	8,64	9,03	9,51	9,84	10,12	10,83	11,18	12,28
III	1,41	1,68	1,91	2,14	2,34	2,54	2,72	3,08
IV	0,71	0,78	0,84	0,93	0,98	1,01	1,06	1,10
V	2,89	3,18	3,51	3,84	4,12	4,46	4,54	4,95
VI	3,82	4,11	4,34	4,61	4,83	4,92	5,12	5,44
VII	3,60	3,86	4,12	4,38	4,58	4,81	4,94	5,28
VIII	1,81	1,92	2,05	2,18	2,26	2,51	2,67	3,18
IX	8,42	8,76	9,08	9,42	9,73	10,18	10,64	11,73
Сума (I–IX)	***32,95***	***35,24***	***37,68***	***40,15***	***41,89***	***44,51***	***46,32***	***50,95***

Джерело: Розроблено автором

Партії зерна 1–3 – після двофазного збирання (роздільний спосіб); партії зерна 4–8 – після однофазного збирання (пряме комбайнування).

Проби зерна брали в зонах *I–IX* при наступних характеристиках роботи машини:

- номінальна продуктивність за годину основного часу на пшениці «Миронівська 65» на первинному очищенні при вологості матеріалу на вході 11,7 – 14,2%, з вмістом домішок до 9%, не менше 12 т/год;
- решітний стан: амплітуда коливань станів (1) (рис. 1) – 7,5 мм; частота коливань станів – 460 кол./хв.; кут нахилу решіт – $8^{o} \pm 1^{o}$; кількість щіток для очищення решіт – 24 шт; амплітуда коливання щіток – 128–148 мм; частота коливань щіток – 40 кол./хв; кількість решіт, встановлених в машині – по 4 штуки в кожному решітному стані; довжина решітного полотна – 790 мм; ширина решітного полотна – 990 мм. Використані решітні полотна з продовгуватими отворами: $Б_1$ – ширина отвора 2,8 мм; $Б_2$ – 3,5 мм; В – 2,0 мм; Г – 2,2 мм;

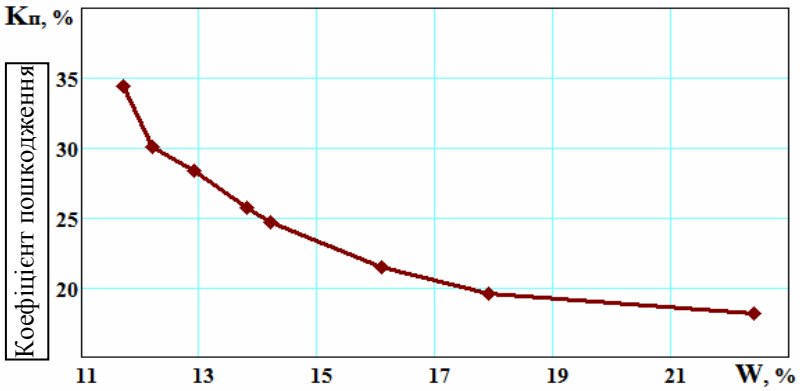


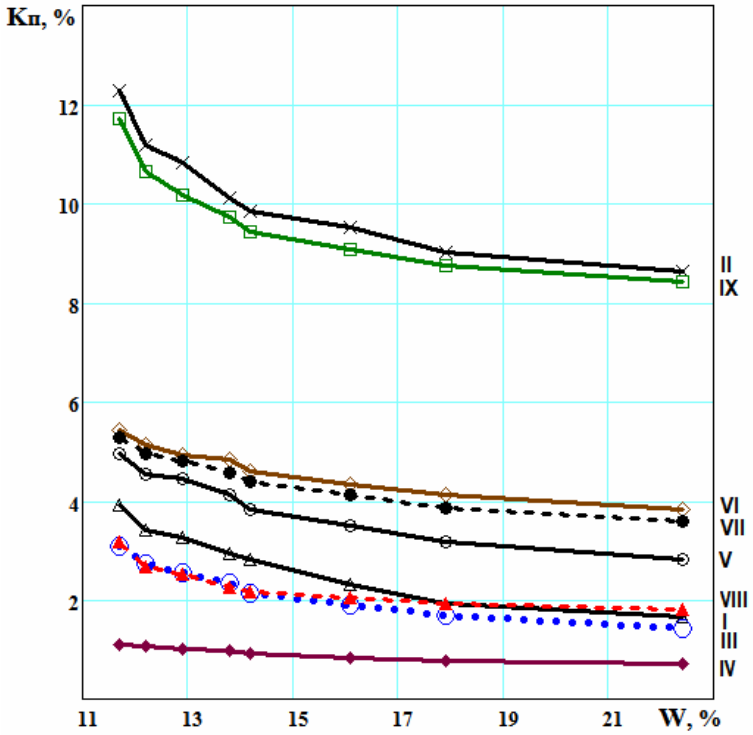
Рисунок 2 – зерна комбайном Кейс 2366 і транспортними засобами

Джерело: Розроблено автором

- завантажувальний транспортер: кількість скребків – 28 шт; частота обертання головки вала – 360 хв$^{-1}$; кількість живильників – 2 шт; ширина захвату живильників – 4500 мм;
- відвантажувальний транспортер: кількість скребків – 28 шт; частота обертання шківа – 360 хв$^{-1}$.

При проведенні експериментальних досліджень використовували пшеницю «Миронівська 65» (м'яка). Маса 1000 зерен – 41 г.

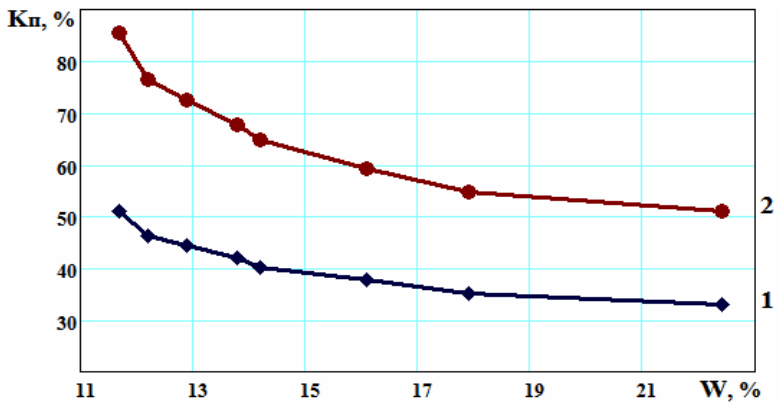
При визначенні рівня механічного травмування зерна пшениці (табл. 1) враховували бите зерно, зерно з макро- та мікротравмами.



I–IX зони взяття проб на машині ОВУ – 25

Рисунок 2 – Залежність коефіцієнту пошкодження (Кп, %) різних зернових партій зерна від вологості (W, %) при первинному очищенні на машині ОВУ–25

Джерело: Розроблено автором



1 – коефіцієнт травмування зерна при обробці на машині ОВУ–25; 2 – коефіцієнт травмування зерна технічними засобами: комбайн Кейс 2366, транспорт, зерноочисна машина ОВУ–25

Рисунок 3 – Залежність коефіцієнту пошкодження (Кп, %) зерна від вологості (W, %)

Джерело: Розроблено автором

Висновки. Експериментальні дослідження показали, що в процесі первинного очищення зерна на машині ОВУ–25 травмування зерна досягає майже 50,95% (за вологості 11,7%). Найбільше травмування зернівок пшениці відбувається під час переміщення зерна по поверхнях скребкових транспортерів завантажувача (Кп=8,64%–12,28%) і відвантажувача (Кп=8,42%–11,73%) внаслідок ударів і тертя матеріалу по нижній частині кожуха транспортера, ланцюгу і скребкам. Також значно пошкоджуються зернівки пшениці після проходу через решета і сходу з них за рахунок ударів і тертя матеріалу по перфорованим поверхням, боковинах решітних станів, скатних дошках та під час видавлювання зерна щітковими очисниками. *Прохід решета Б2: Кп=(2,89%–4,95%); схід з решета Г: Кп=(3,82%–5,44%).*

Встановлено, що на пошкодження зернівок впливають умови їх контактування з поверхнями, характеристики контактних поверхонь, довжина шляху переміщення матеріалу, швидкостей його переміщення і ударів в процесі очищення. Всі ці спостереження дають можливість виявити недоліки технологічних схем аналогічних зерноочисних машин і обґрунтувати пропозиції щодо змін конструкцій робочих і транспортуючих органів, матеріалів і геометрії контактних поверхонь.

Список літератури

1. Гимадиев А.М. Травмирование семян. URL: http://www.agroinform.ru/2010/06/travm.htm
2. Грабар І.Г., Дерев’янко Д.А., Герук С.М. Вплив чинників післязбиральної обробки зерна на якість насіннєвого матеріалу. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодержав. міжвід. наук.–техн. зб.* 2010. Вип. 40, ч. 1, С. 3–5.
3. Дерев’янко Д.А. Поліпшення технології післязбирального дороблення зерна. *Техніка і технології АПК.* 2011, № 1, С. 34–35.
4. Дерев'янко Д.А., Тарасенко О.П., Оробінський В.І. Вплив травмування на якість насіння зернових культур: монографія . Житомир: Нілан–ЛТД, 2012. 440 с.
5. Дерев’янко Д.А. Тарасенко О.П., Оробінській В.І., Синявська А.І. Вплив сортувальних решіт на травмування та якість насіння озимої пшениці . *Техніка і технології АПК*. 2013. № 10. С. 27–29.
6. Кирпа М.Я., Базілєва Ю.С. Вплив різних типів травмування на якість насіння гібридів кукурудзи: наук. пр. ПФ «КАТУ» НАУ. – Сімферополь, 2008. Вип. 107. С. 68–71.
7. Кузнецов В.В., Манойлина С.З. Совершенствование методики оценки микроповреждения зерновок . Вестник ВГАУ. 2007. №14. С. 121–135.
8. Влияние современных зерноочистительных машин и оборудования на качество семян и выбор наиболее перспективных для разработки или реконструкции семяочистительных линий / А.П. Тарасенко [и др.]. Воронеж, 2008. 16 с.
9. Тарасенко А.П. Мерчалова М.Э., Мироненко Д.Н. Совершенствование средств механизации послеуборочной обработки семян . *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2006. № 1. С. 50–52.
10. Тарасенко А.П. Снижение травмирования семян при уборке и послеуборочной обработке . Воронеж : ФГОУ ВПО ВТАУ, 2003. 331 с.
11. Очиститель вороха универсальный ОВУ – 25: Техн. опис. и инстр. по экспл. URL: https://ua.orehovselmash.com/userfiles/files/Instructions/OVU_25.pdf (дата обращения: 19.02.2019).

References

1. Gimadiev, A.M. (2010). Travmirovanie semjan [Grains Damage]. *agroinform.ru.* Retrieved from http://www.agroinform.ru/2010/06/travm.htm [in Russian].
2. Hrabar, I.H., Derev'ianko, D.A., Heruk, S.M. (2010). Vplyv chynnykiv pisliazbyral'noi obrobky zerna na iakist' nasinnievoho materialu [Influence of the factors post-harvest grain processing on seed quality]. *National Interagency Scientific and Technical Collection of Works. Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines, Vol.. 40, 1*, 3–5 [in Ukrainian].
3. Derev'ianko D.A. (2011). Polipshennia tekhnolohii pisliazbyral'noho doroblennia zerna [Improvement of grain harvesting technology. Machines and technology of agro-industrial complex]. *Machines and technology of AIC*, *1*, 34–35 [in Ukrainian].

4. Derevyanko, D.A., Tarasenko, O.P., Orobinskiy, V.I. (2012). *Vplyv travmuvannia na iakist' nasinnia zernovykh kul'tur* [*Influence of Damage on the Quality of Seeds of Grain Crops*]. Zhytomyr: Nilan LTD [in Ukrainian].
5. Derev'ianko D.A., Tarasenko, O. P., Orobins'kij, V. I., Syniavs'ka, A. I. (2013). Vplyv sortuval'nykh reshit na travmuvannia ta iakist' nasinnia ozymoi pshenytsi [Influence of sorting screens on damaging and quality of winter wheat seeds]. *Machines and technology of AIC*, *10,* 27–29 [in Ukrainian].
6. Kyrpa, M.Ya., Bazileva, Yu.S. (2008). Vplyv riznykh typiv travmuvannia na iakist' nasinnia hibrydiv kukurudzy [Effect of Different types of Damage on the Quality of Maize Hybrid Seeds]. *Scientiifc Works of PF "KATU" NAU*, *Issue 107*, 68-71. [in Ukrainian].
7. Kuznetsov, V.V., Manoylina, S.Z. (2007). Sovershenstvovanie metodiki ocenki mikropovrezhdenija zernovok [Improvement of Methodology of Grain Micro-Damage Assessment]. *Bulletin of Voronezh State Agrarian University*, *14*, 121-135 [in Russian].
8. Tarasenko A.P. [et al]. (2008). *Vlijanie sovremennyh zernoochistitel'nyh mashin i oborudovanija na kachestvo semjan i vybor naibolee perspektivnyh dlja razrabotki ili rekonstrukcii semjaochistitel'nyh linij* [*Influence of modern grain cleaning machines and equipment on the quality of seeds and the choice of the most promising for the development or reconstruction of seed processing lines*], Voronezh [in Russian].
9. Tarasenko, A.P., Merchalova, M.Je., Mironenko, D. N. (2006). Sovershenstvovanie sredstv mehanizacii posleuborochnoj obrabotki semjan [Improving the means of mechanization of post-harvest seed processing]. *Traktory i sel'skohozjajstvennye mashiny – Tractors and agricultural machinery*, *1,* 50–52 [in Russian].
10. Tarasenko A.P. (2003). *Snizhenie travmirovanija semjan pri uborke i posleuborochnoj obrabotke* [*Reducing seed damage during harvesting and post-harvest processing*]. Voronezh : FGOU VPO VTAU` [in Russian].
11. Universal heap cleaner OVU-25: Technical description and operation manual. *en.orehovselmash.com.* Retrieved from https://en.orehovselmash.com/userfiles/files/Instructions/OVU_25.pdf

Iryna Pisarkova, design engineer
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Wheat Grain Damage by Grain Cleaning Machines and the Ways of its Reducing

Investigation of the influence of the operating and transporting parts of the universal heap cleaner OVU-25 on damage and seed quality in order to ensure minimal influence of the operating parts of technical means on grain material in preparation for long-term storage due to repeated processing on technological equipment.

The zones of greatest influence of the operating parts of grain cleaning machine OVU-25 in contact with the particles of the processed material are determined. Experimental studies were conducted to identify the level of mechanical damage of the grain during the initial cleaning by this machine. The quantitative composition of the operating parts and their technological characteristics were determined. The experimental data of the damage factor (Kp,%) of grain from humidity (W,%) in different operating zones of the machine on the basis of which graphical dependences were obtained. The influence of technological parameters of the operating parts on damage of grains was also identified. It has been established that the maximum damage of grain occurs in contact with the scrapers of conveyors, and the least damage occurs in the aspiration channels of the air purification system. Factors affecting the damage to the particles of the treated material were also investigated and identified.

It is established that the damage of grains is influenced by the conditions of their contact with the surfaces, the characteristics of the contact surfaces, the length of the path of movement of the material, the speed of its movement and strokes during the cleaning process. All these observations make it possible to identify the drawbacks of the technological schemes of similar grain-cleaning machines and to substantiate proposals for changes in the structures of operating and transporting parts, materials and geometry of contact surfaces. The data are used to select the geometry of the surfaces of the operating parts of the heap cleaner in order to reduce grain damage.

damage, stroke, friction, grain, humidity, control zones

Одержано (Received) 19.03.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 24.04.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

УДК 621.798.38 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).17-24

О.В. Оришака, доц., канд. техн. наук, **В.І. Гуцул,** доц., канд. ф.-м. наук,
А.М. Артюхов, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна
e-mail: oryhsaka@gmail.com

Теоретичне дослідження руху сипкого матеріалу в постачальному пристрої установок безперервної дії

Отримані залежності швидкості руху сипкого матеріалу в постачальному пристрої установок безперервної дії від геометричних параметрів постачального пристрою, а також визначено діапазон зміни швидкості руху сипкого матеріалу в постачальному пристрої.
постачальній пристрій, сипкий матеріал

О.В. Орышака, доц., канд. техн. наук, **В.И. Гуцул,** доц., канд. ф.-м. наук, **А.Н. Артюхов, доц., канд.** техн. наук
Центральноукраинский национальний технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Теоретическое исследование движения сыпучего материала в подающем устройстве установок непрерывного действия

Полученны зависимости скорости истечения сыпучего материала в подающем устройстве установок непрерывного действия от геометрических параметров питающего устройства, а также определён диапазон изменения скорости истечения сыпучего материала в подающем устройстве.
питающее устройство, сыпучий материал

Постановка проблеми. Установки безперервної дії мають ряд переваг перед установками з циклічною подачею (низькі енергетичні витрати, висока продуктивність, менша матеріалоємність тощо) [1,2], тому вдосконалення установок безперервної дії є актуальною задачею. Постачальний пристрій сипкого матеріалу, як складова частина установок безперервної дії, потребує відповідних досліджень для обґрунтування та оптимізації параметрів конструкції установки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами проведено дослідження конусного стабілізатора потоку сипкого матеріалу установки безперервної дії для завантаження сипких матеріалів [1] та регулятора витоку сипкого матеріалу [2].

Також авторами були проведені дослідження основних робочих органів установок безперервної дії, які дали можливість обґрунтувати: стабілізатор потоку сипкого матеріалу, регулятор витоку сипкого матеріалу, постачальний пристрій. Було визначено, що швидкість руху сипкого матеріалу в каналах патрубків постачального пристрою при його обертанні збільшується відносно його стаціонарного положення, що зменшує вірогідність утворення склепів і, таким чином, поліпшує технологічний процес завантаження сипкого матеріалу .

Результати досліджень процесу витоку сипкого матеріалу із бункера, як складової частини установки для завантаження сипких матеріалів, викладені у роботах дослідників [3-9].

Нові, перспективні конструкції постачальних пристроїв установок безперервної дії для завантаження сипких матеріалів можуть включати так званий стабілізуючий

© О.В. Оришака, В.І. Гуцул, А.М. Артюхов, 2019

скат, геометричні параметри якого впливають на швидкість руху сипкого матеріалу і, таким чином, на технологічний процес роботи установки для завантаження сипких матеріалів.

Постановка завдання. Таким чином, метою роботи є дослідження впливу геометричних параметрів стабілізуючого скату постачальних пристроїв установок безперервної дії для завантаження сипких матеріалів на швидкость руху сипкого матеріалу і, таким чином, на технологічний процес роботи установки для завантаження сипких матеріалів..

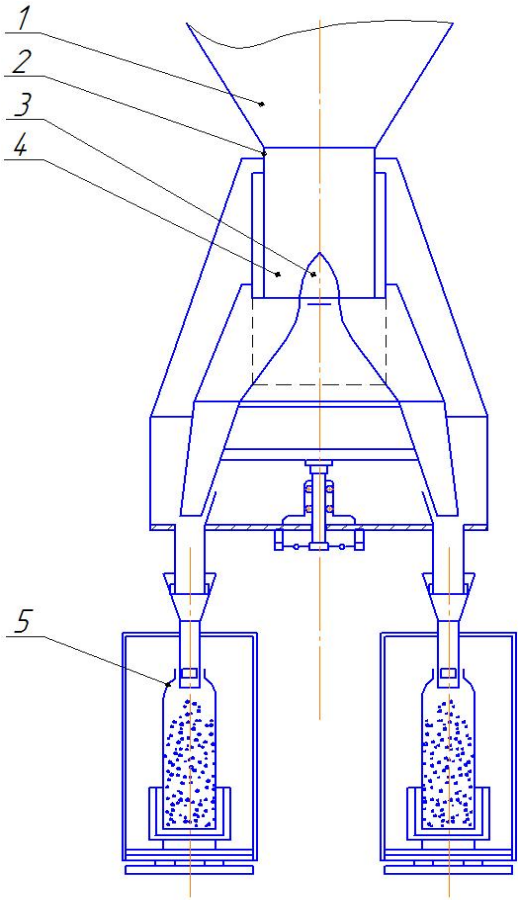
Виклад основного матеріалу. Постачальний пристрій установки безперервної дії (рис. 1) може включати так званий стабілізуючий скат, розрахункова схема якого зображена на рис. 2. Він представляє собою частину поверхні обертання дуги кола навколо хорди, яка відтинає цю дугу. В декартовій прямокутній системі координат Oxyz рівняння вказаної поверхні можна представити у вигляді:

$$(\pm\sqrt{x^2 + y^2} + c)^2 + z^2 = R^2 \tag{1}$$

при умові, що

$$|x| \le R - c,\ |y| \le R - c,\ 0 \le z \le \sqrt{R^2 - c^2}, \tag{2}$$

де x,y,z – координати поверхні стабілізуючого скату по відповідним осям; $R = O_1B$, $R_1 = OB$, $c = O_1O = R - R_1$.



1 – бункер; 2 – матеріалопровід; 3 – стабілізуючий скат; 4 – кільцевий зазор; 3 – клапанний мішок

Рисунок 1 – Схема установки безперервної дії

Джерело: розроблено автором

Враховуючи умови (2) формулу (1) можна переписати наступним чином

$$\sqrt{x^2 + y^2} + c = \sqrt{R^2 - z^2}\ . \tag{3}$$

Нехай частинка матеріалу торкнулась поверхні стабілізуючого ската в точці M_0, положення якої визначається кутом γ_0 (рис.2). Визначимо швидкість даної частинки в довільній точці M, яка характеризується кутом γ .

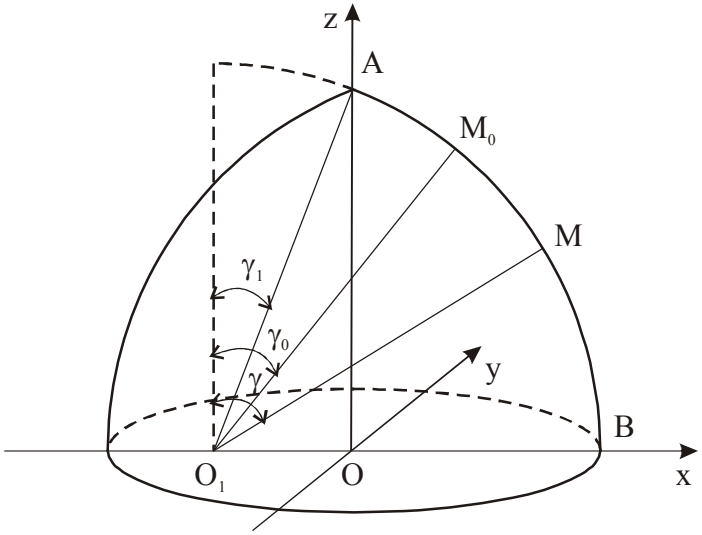


Рисунок 2 – Розрахункова схема стабілізуючого ската

Джерело: розроблено автором

Будемо вважати, що відцентрова сила при русі частинки матеріалу по поверхні стабілізуючого скату компенсуються дією стовпа матеріалу. Рух частинки у цьому випадку описується наступним диференціальним рівнянням:

$$m\frac{dV}{dt} = mg\sin\gamma - fmg\cos\gamma\,, \tag{4}$$

де V – швидкість;
m – маса частинки;
f – коефіцієнт тертя;
g – прискорення вільного падіння.
Останнє рівняння можна переписати у вигляді:

$$V\frac{dV}{d\gamma} = Rg\,(\sin\gamma - f\cos\gamma)\,. \tag{5}$$

Диференціальне рівняння (5) розв'язується при граничній умові $V(\gamma_0) = V_0$, де V_0 – дотична складова вхідної швидкості сипкого матеріалу. Маємо:

$$V = \sqrt{V_0^2 + 2Rg\,[(\cos\gamma_0 - \cos\gamma + f\,(\sin\gamma_0 - \sin\gamma)]}\,. \tag{6}$$

Величина V_0 визначається наступним чином:

$$V_0 = \sqrt{V_б^2 + 2g(H - R\cos\gamma_0)}\sin\gamma_0, \tag{7}$$

де $V_б$ – швидкість витікання матеріалу з бункера.

Розглянемо спочатку випадок, коли радіус вихідного отвору бункера r менший за радіус основи стабілізуючого скату R_1 (рис. 3). Найменше та найбільше значення кута γ_0 позначимо відповідно через γ_1 і γ_2. Вказані величини визначаються за формулами:

$$\gamma_1 = \arcsin\frac{c}{R}, \quad \gamma_2 = \arcsin\frac{c+r}{R}. \tag{8}$$

Використовуючи залежність (6) можемо знайти швидкість частинок в точці С (рис. 3)

$$V_C = \sqrt{V_0^2 + 2Rg[(\cos\gamma_0 - \cos\gamma_2 + f(\sin\gamma_0 - \sin\gamma_2)]}. \tag{9}$$

Ця швидкість залежить від місця падіння частинки на поверхню стабілізуючого ската, тобто $V_C = V_C(\gamma_0)$. Усереднене значення швидкості V_C по усіх точках, що попадають на поверхню стабілізуючого скату, яке позначимо як V_{Cy}, може бути знайдено за формулою

$$V_{Cy} = \frac{2}{r^2}\int_0^r x_0 V_C(x_0)dx_0. \tag{10}$$

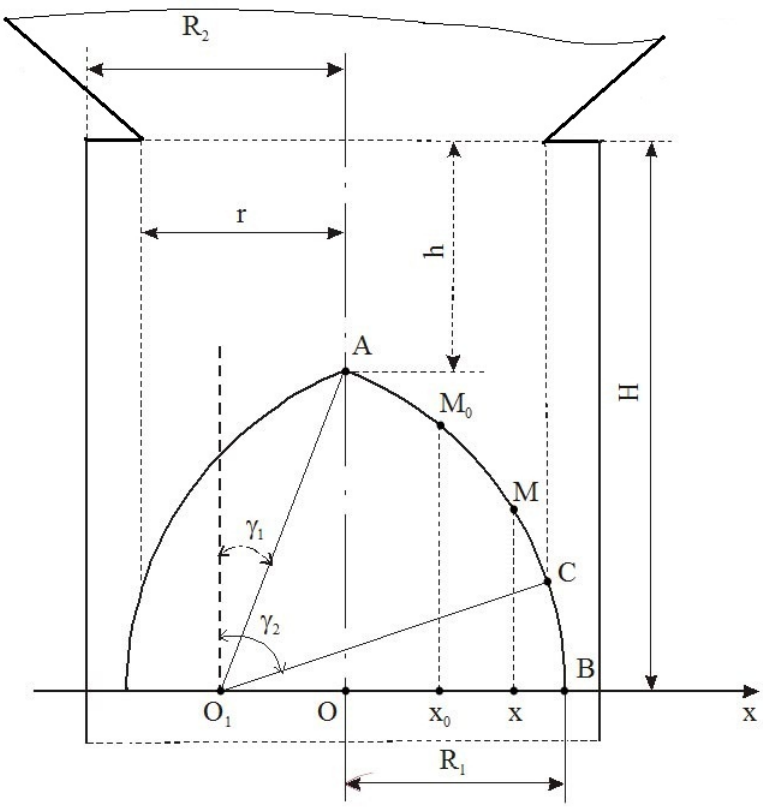


Рисунок 3 – Схема постачального пристрою установки безперервної дії
Джерело: розроблено автором

З врахуванням того, що $x_0 = R\sin\gamma_0 - c$, отримуємо

$$V_{Cy} = \frac{2R}{r^2}\int_{\gamma_1}^{\gamma_2}\cos\gamma_0(R\sin\gamma_0 - c)\sqrt{V_0^2 + 2Rg[(\cos\gamma_0 - \cos\gamma_2 + f(\sin\gamma_0 - \sin\gamma_2)]}d\gamma_0 . \quad (11)$$

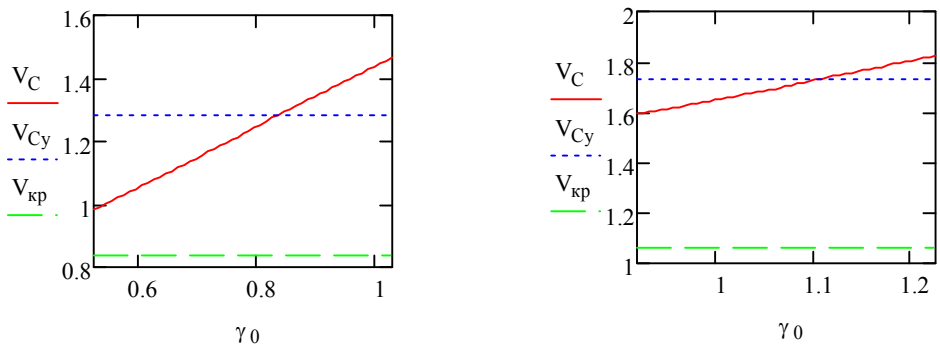
Відмітимо, що інтеграл у правій частині останньої формули в аналітичній формі не визначається. Чисельні розрахунки, які наведені нижче, виконані в системі MathCAD.

При русі частинки за межами ділянки АС (рис. 3), де немає стовпа падаючого матеріалу, необхідно враховувати дію відцентрової сили. Якщо $V^2/R < g\cos\gamma$, то частинка продовжує рух по поверхні, а якщо $V^2/R > g\cos\gamma$, то відцентрова сила відриває частинку від поверхні. Введемо позначення:

$$V_{кр} = \sqrt{Rg\cos\gamma_2} . \quad (12)$$

Якщо $V_{Cy} > V_{кр}$, то частинка злітає з поверхні.

На рис. 4 наведені результати обчислень, зроблених за формулами (9), (11) і (12). В обох випадках $V_{Cy} > V_{кр}$, тобто в точці С частинки відриваються від поверхні.



а) б)

Рисунок 4 – Залежність швидкості V_C від величини кута γ_0 та значення швидкості V_{Cy} і $V_{кр}$ при $R_1 = 0{,}07$ *м*; $r = 0{,}05$ *м*; $f = 0{,}5$; $h = 0{,}1$ *м*; $V_б = 0$ *м/с*; а) $R = 0{,}14$ *м*; б) $R = 0{,}34$ *м*

Джерело: розроблено автором

Розглянемо далі випадок, коли $R_1 \le r \le R_2$ (рис. 3). Величина γ_0 при вказаних умовах може змінюватися від γ_1 до $\pi/2$. На основі (6) отримуємо швидкість частинок в точці В

$$V_B = \sqrt{V_0^2 + 2Rg[(\cos\gamma_0 + f(\sin\gamma_0 - 1)]} . \quad (13)$$

Знайдемо усереднена значення швидкості V_B по усіх точках поверхні стабілізуючого ската

$$V_{B1} = \frac{2R}{R_1^2}\int_{\gamma_1}^{\pi/2}\cos\gamma_0(R\sin\gamma_0 - c)\sqrt{V_0^2 + 2Rg[(\cos\gamma_0 + f(\sin\gamma_0 - 1)]}d\gamma_0 . \quad (14)$$

Швидкість частини сипкого матеріалу, який не попав на приймаючу поверхню стабілізуючого ската і знаходиться в одній горизонтальній площині з точкою В ($R_1 < x \le r$)

$$V_{B2} = \sqrt{V_б^2 + 2gH} \quad . \tag{15}$$

Усереднене значення швидкості усього матеріалу, який рухається зі швидкостями V_{B1} і V_{B2} може бути знайдене за формулою

$$V_{By} = \frac{R_1^2}{r^2} V_{B1} + \frac{r^2 - R_1^2}{r^2} V_{B2} \, . \tag{16}$$

На рис. 5 наведені результати обчислень, зроблених за формулами (13) - (16). Збільшення радіуса r прогнозовано тягне за собою зміщення усередненої швидкості V_{By} від V_{B1} до V_{B2} .

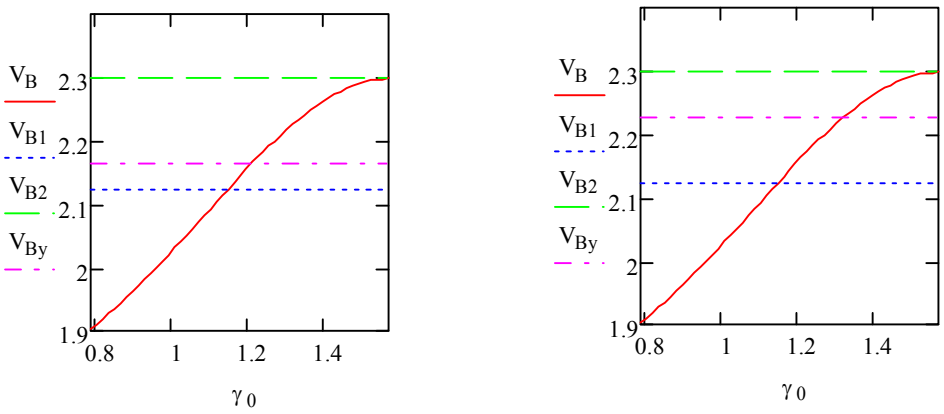


Рисунок 5 – Залежність швидкості V_B від величини кута γ_0 та значення швидкості V_{B1} , V_{B2} і V_{By} при $R_1 = 0{,}07$ *м;* $R = 0{,}24$ *м;* $f = 0{,}5$ *;* $h = 0{,}1$ *м;* $V_б = 0$ *м / с;* а) $r = 0{,}08$ *м;* б) $r = 0{,}11$ *м*

Джерело: розроблено автором

Висновки:

1. Швидкість сипкого матеріалу збільшується при збільшенні радіуса r (рис. 3) та кута γ_0 (рис. 2).

2. Визначено діапазон зміни швидкості *(мінливості, межі варіювання)* швидкості руху сипкого матеріалу в постачальному пристрої. При $R_1 = 0{,}07$ *м;* $R = 0{,}24$ *м;* $f = 0{,}5$ *;* $h = 0{,}1$ *м;* $V_б = 0$ *м / с;* $r = 0{,}08...0{,}1$ 1 *м*. швидкість сипкого матеріалу змінюється в межах 2,11…2,3 м/с.

3. Отримані результати дозволяють визначити значення основних геометричних параметрів стабілізуючого скату постачальних пристроїв установок безперервної дії для забезпечення потрібних вихідних показників.

Список літератури

1. Оришака О.В., Гуцул В.І., Артюхов А.М. Теоретичне дослідження конусного стабілізатора потоку сипкого матеріалу установки безперервної дії для завантаження сипких матеріалів. *Конструювання, виробництво та експлуатація с.-г. машин: Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник.* Кіровоград: КНТУ. 2016. Вип. 46. С. 175-181.

2. Оришака О.В., Гуцул В.І., Артюхов А.М. Теоретичне дослідження регулятора витоку сипкого матеріалу. *Техніка в с-г виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Збірник наукових праць КНТУ*. Кропивницький: КНТУ. 2017. Вип. 30. С. 22-28.
3. Любин Н.В., Токарчук А.А. Закономерности истечения сыпучего материала через бункерные скребки трубчатых конвейеров на вертикальных участках трассы. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету*. Вінниця: ВНАУ. 2014. Вип. 85. С. 164-169.
4. Кирия Р.В., Максютенко В.Ю., Брагинец Д.Д., Мостовой Б.И. К вопросу об истечении сыпучего груза из бункера со щелевым отверстием. *Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр.* Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. 2008. Вып. 80. С. 351–362.
5. Кирия Р.В., Брагинец Д.Д., Мостовой Б.И. Истечение сыпучего груза из бункера с боковым щелевым отверстием. *Сборник научных трудов НГУ*. Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. 2009. Вып. 32. С. 114–122.
6. Кирия Р.В. О коэффициенте внутренних потерь при движении сыпучей среды по элементам перегрузочных узлов ленточных конвейеров. *Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр.* Днепропетровск: ИГТМ НАНУ. 2003. Вып. 41. С. 159–167.
7. Кирия Р.В., Брагинец Д.Д., Мищенко Т.Ф. Истечение сыпучего груза из бункера с регулируемой боковой заслонкой. *Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр.* Днепропетровск: ИГТМ НАНУ. 2012. Вып. 101. С. 130-138.
8. Попков В.М. Основы теории расчета времени истечения сыпучих грузов из бункерных устройств. *Известия Петербургского университета путей сообщения*: Спб.: ФГБОУВО. 2005. Вып.2. С. 22-26.
9. Скудина А.А. Влияние сводоразрушающего устройства на работу бункера наибольшей пропускной способности. *ООО ИЦ Науковедение.* 2015. Том 7, №6. URL: http://naukovedenie.ru/PDF/66TVN615.pdf (дата обращения: 11.12.2018).

References

1. Oryshaka, O.V., Hutsul, V.I. & Artiukhov, A.M. (2016). Teoretychne doslidzhennia konusnoho stabilizatora potoku sypkoho materialu ustanovky bezperervnoi dii dlia zavantazhennia sypkykh materialiv [Theoretical study of a conical stabilizer of flow of bulk material of installation of continuous action for loading of bulk materials]. *Zaghaljnoderzhavnyj mizhvidomchyj naukovo-tekhnichnyj zbirnyk. Konstrujuvannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija siljsjkoghospodarsjkykh mashyn – National Interagency Scientific and Technical Collection of Works. Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines, 46*. 175-181 [in Ukrainian].
2. Oryshaka, O.V., Hutsul, V.I. & Artiukhov, A.M. (2017). Teoretychne doslidzhennia rehuliatora vytoku sypkoho materialu [*Theoretical study of the regulator of leakage of bulk material]. Tekhnika v s-h vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Zbirnyk naukovykh prats' KNTU – Collected works of Kirovohrad National Technical University. Machinery in agricultural production, industry, machine building, automation, 30.* 22-28 [in Ukrainian].
3. Ljubin, N.V. & Tokarchuk, A.A. (2014). Zakonomernosti istechenija sypuchego materiala cherez bunkernye skrebki trubchatyh konvejerov na vertikal'nyh uchastkah trassy [Patterns of the outflow of bulk material through hopper scrapers of tubular conveyors on vertical sections of the route]. *Zbirnyk naukovykh prats' Vinnyts'koho natsional'noho ahrarnoho universytetu – Collection of scientific works of Vinnytsia National Agrarian University, 85.* 164-169 [in Russian].
4. Kirija, R.V., Maksjutenko, V.Ju., Braginec, D.D., & Mostovoj, B.I. (2008). K voprosu ob istechenii sypuchego gruza iz bunkera so shhelevym otverstiem [On the issue of the expiration of bulk cargo from a hopper with a slot hole]. *Geotehnicheskaja mehanika: Mezhved. sb. nauch. tr. Dnepropetrovsk: IGTM NAN Ukrainy – Geotechnical mechanics: Bear. Sat. scientific tr. Dnepropetrovsk: IGTM NAS of Ukraine, 80.* 351–362 [in Russian].
5. Kirija, R.V., Braginec, D.D. & Mostovoj, B.I. (2009). Istechenie sypuchego gruza iz bunkera s bokovym shhelevym otverstiem [The flow of bulk cargo from the hopper with a side slotted hole]. *Sbornik nauchnyh trudov NGU. Dnepropetrovsk: IGTM NAN Ukrainy – Collection of scientific works of NSU. Dnepropetrovsk: IGTM NAS of Ukraine, 32*. 114–122 [in Russian].
6. Kirija, R.V. (2003). O kojefficiente vnutrennih poter' pri dvizhenii sypuchej sredy po jelementam peregruzochnyh uzlov lentochnyh konvejerov [On the coefficient of internal losses during the movement of granular medium along the elements of reloading units of belt conveyors]. *Geotehnicheskaja mehanika: Mezhved. sb. nauchn. tr. Dnepropetrovsk: IGTM NANU – Geotechnical mechanics: Bear. Sat. scientific tr. Dnepropetrovsk: IGTM NAS of Ukraine, 41.* 159–167 [in Russian].

7. Kirija, R.V., Braginec, D.D. & Mishhenko, T.F. (2012). Istechenie sypuchego gruza iz bunkera s reguliruemoj bokovoj zaslonkoj [Bulk cargo outflow from hopper with adjustable side flap]. *Geotehnicheskaja mehanika: Mezhved. sb. nauchn. tr. Dnepropetrovsk: IGTM NANU – Geotechnical mechanics: Bear. Sat. scientific tr. Dnepropetrovsk: IGTM NAS of Ukraine, 101.* 130-138 [in Russian].
8. Popkov, V.M. (2005). Osnovy teorii rascheta vremeni istechenija sypuchih gruzov iz bunkernyh ustrojstv [Fundamentals of the theory of calculating the time of expiration of bulk cargo from bunker devices.]. *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija: Spb.: FGBOUVO – Proceedings of St. Petersburg University of Railway Transport: St. Petersburg: FGBOUVO, 2.* 22-26 [in Russian].
9. Skudina, A.A. (2015). Vlijanie svodorazrushajushhego ustrojstva na rabotu bunkera naibol'shej propusknoj sposobnosti [The influence of a demolition device on the operation of the bunker with the highest throughput]. *OOO IC Naukovedenie – Internet journal "Science of Science", Vol. 7, 6.* Retrieved from: http://naukovedenie.ru/PDF/66TVN615.pdf [in Russian].

Oleh Oryshaka, Assos. Prof., PhD tech. sci., **Vasily Gutsul,** Assos. Prof., PhD phys.&math. sci., **Anatoly Artiuhov,** Assos. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Theoretical Investigation of the Movement of Free-flowing Material in the Supply Device of Continuous Operation

Continuous-action plants have several advantages over cycle-feed units (low energy costs, high productivity, lower material consumption, etc.), so improving continuous-action installations is an urgent task. The bulk material feeder, as an integral part of the continuous-action plants, requires appropriate research to substantiate and optimize the design parameters of the installation.

The purpose of this work is to investigate the influence of the geometrical parameters of the stabilizing slope of the delivery devices of the continuous-action installations for loading free-flowing materials on the speed of movement of the bulk material and, thus, the technological process of the installation for loading bulk materials.

The dependences of the velocity of the free-flowing material in the delivery device of the continuous devices on the geometric parameters of the supply device are determined, as well as the range of velocity variation of the bulk material movement in the feed device is determined.

Research findings.

– The velocity of loose material increases with increasing radius r (fig. 3) and angle (fig. 2).

– The range of variation in speed (variability, boundary limits) of the velocity of free-flowing material in the supplying device is determined. At $R_1 = 0{,}07\,m$; $R = 0{,}24\,m$; $f = 0{,}5$; $h = 0{,}1\,m$; $V_б = 0\,m/s$; $r = 0{,}08 \ldots 0{,}11\ m$., the velocity of the free-flowing material varies between 2,11 ... 2,3 m / s.

– The obtained results allow to determine the values of the main geometric parameters of the supply device of the continuous devices to provide the required output indicators

– The results obtained allow us to determine the values of the basic geometric parameters of the stabilizing slope of the delivery devices of the continuous operation installations to provide the required output indicators.

feed device, free-flowing material

Одержано (Received) 22.01.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 23.05.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

УДК 62-9; 637.07 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).25-35

С.Б. Вербицький, канд. техн. наук
Інститут продовольчих ресурсів НААН, м. Київ, Україна, e-mail: verb@ipr.net.ua
О.В. Батраченко, доц., канд. техн. наук
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна
e-mail: avbatrachenko1980@gmail.com
Н.В. Філімонова, канд. техн. наук
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна
e-mail: nvfilimonova2015@gmail.com

Удосконалення математичної моделі подрібнення м'ясної сировини на роторному емульситаторі

Виконано аналіз існуючих технічних засобів безперервної дії для тонкого подрібнення м'ясної сировини і особливості математичного моделювання зазначеного процесу. Наведено формулу розрахунку інтегрованої потужності і розглянута можливість її уточнення шляхом урахування технічних характеристик живильних бункерів. Запропоновано доповнити формулу інтегрованої потужності коефіцієнтом стабільності подачі, обґрунтовано чисельні значення зазначеного коефіцієнта для живильних бункерів різної конструкції.
м'ясна сировина, тонке подрібнення, роторний емульситатор, потужність, живильний бункер, математична модель

С.Б. Вербицкий, канд. техн. наук
Институт продовольственных ресурсов НААН,г. Киев, Украина
А.В. Батраченко, доц., канд. техн. наук
Черкасский государственный технологический университет, г. Черкассы, Украина
Н.В. Филимонова, канд. техн. наук
Черкасский государственный технологический университет, г. Черкассы, Украина

Совершенствование математической модели измельчения мясного сырья на эмульситаторе

Выполнен анализ существующих технических средств непрерывного действия для тонкого измельчения мясного сырья и особенности математического моделирования указанного процесса. Приведена формула расчета интегрированной мощности и рассмотрена возможность ее уточнения путем учета технических характеристик питающих бункеров. Предложено дополнить формулу интегрированной мощностью коэффициентом стабильности подачи, обоснованы численные значения указанного коэффициента для питающих бункеров разной конструкции.
мясное сырье, тонкое измельчение, роторный эмульситатор, мощность, питающий бункер, математическая модель

Постановка проблеми. Зазвичай моделювання складних технічних систем, їхню поведінку в динаміці, здійснюють із залученням простих взаємопов'язаних рівнянь, які повністю описують зазначену поведінку систем, розв'язуючи ці рівняння за різних значень вхідних параметрів. Такий підхід дозволяє дослідити область значень залежної змінної та співвідношення між величинами на вході та на виході будь-якої технічної системи [1]. У цьому сенсі, не є винятком відомі технологічні процеси харчової промисловості, щодо яких запропоновано [2] трирівневу систему класифікації математичних моделей технологічних процесів. Перший рівень складають моделі, що містять графічні або аналітичні залежності між параметрами, отриманими в результаті експериментальних досліджень на певному обладнанні, і являють собою дискретні

© С.Б. Вербицький, О.В. Батраченко, Н.В. Філімонова, 2019

набори параметрів, які, для одержання аналітичних залежностей, піддають математичній обробці. Моделі другого рівня представляють технологічний процес через добре відомі технологічні процеси, проте з долученням експериментальних або аналітичних поправочних коефіцієнтів. Попри велику трудомісткість складення, ці моделі дозволяють проаналізувати вплив обладнання на конкретний процес. У моделях третього рівня параметри процесу зв'язують відомими законами природничих наук, тому ці моделі несуть ознаки еталоном технологічного процесу можуть бути застосовані щодо будь-яких геометрично подібних установок, що відрізняються лише габаритами. Третій, зі згаданих, тип математичних моделей було обрано [3] для моделювання процесу тонкого подрібнення м'ясного фаршу на роторному емульситаторі. Із зазначеною метою процес було розкладено на складові процеси, що послідовно відбуваються з кожним елементарним об'ємом робочого середовища всередині установки. Разом з тим, запропонована у [3] математична модель потребує свого подальшого вдосконалення з належним урахуванням останніх досліджень процесів тонкого подрібнення м'ясної сировини на емульситаторах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Серед численних типів обладнання, наразі використовуваних для тонкого подрібнення м'ясної сировини, своє належне місце посідають емульситатори м'яса – подрібнювачі безперервної дії, які дозволяють якісно та ефективно здійснювати оброблення первинного фаршу в потоці, будучи, водночас, простішими за конструкцією та менш металомісткими, ніж кутери з чашею, що обертається, які зазвичай використовують для виконання зазначеної технологічної операції. Вживаний в українській і російській фаховій літературі термін «емульситатор» і німецькомовний термін «Brätautomat», не настільки точно відображають принцип дії цих машини, як англомовний термін «flow cutter», німецькомовний «Durchlaufkutter» або польський «kuter przelotowy», що означають «проточний кутер», тобто кутер безперервної дії [4, 5].

У світовій практиці м'ясопереробки найбільш розповсюдженими є дві конструктивні схеми машин безперервної дії для тонкого подрібнення м'ясної сировини: з робочими органами типу «ніж-решітка» або типу «багатозубчастий ротор - багатозубчастий статор». Застосування різальної пари «ніж-решітка» є досить ефективним з точки зору якості подрібнення, а робочі органи є досить простими для виконання, проте тонке подрібнення за такою конструктивною схемою спричиняє суттєвий перегрів маси через тертя ножів поверхнею різальної решітки та створює ризик потрапляння частинок металу до фаршу. Машинам типу «ніж-решітка» також притаманне інтенсивне закупорювання циліндричних отворів решітки, тому виникає необхідність частих технологічних зупинок з метою очищення робочих органів подрібнення. Для мінімізації шкідливих впливів активного контакту робочих органів, сучасні емульсітатори типу «ніж-решітка» оснащують спеціальними механізмами регулювання зазору і зусилля притискання ножів до різальних решіток [5-11].

Емульситатори з робочими органами «ротор-статор» є не менш ефективними, оскільки забезпечують і ударне, і різальне подрібнення [12], до того ж їх конструкція виключає забивання, а робочі органи не вимагають додаткового регулювання, забезпечують постійну ступінь подрібнення і стабільну якість обробленої маси. Ротор являє собою зубчастий вінець, зуби якого нахилені відносно основи ножа, а статор виконано у формі зубчастого кільця, зубці якого нахилені в напрямку, протилежному щодо напрямку нахилу зубців ротора. На сучасних подрібнювачах «ротор-статор» температура отриманої після подрібнення емульсії перевищує температуру вихідної сировини не більше, ніж на 2 °С – 4 °С. Кутери безперервної дії дають змогу отримати стабільні емульсії в двох фазах: «тверда – рідка» (м'ясо та вода) і «тверда – тверда»

(м’ясо та жир). Впродовж робочого циклу ротора відбувається тонке подрібнення, емульгування, гомогенізація і розпилення сировини без її надмірного нагрівання [5, 9, 11, 13]. Залежно від потужності та продуктивності, емульситатори обох описаних вище конструктивних схем можуть мати одноступеневі або багатоступеневі робочі органи. Більшість цих машин має горизонтальне компонування, проте деякі малогабаритні емульситатори з робочими органами «ротор-статор» виконують у вертикальному компонуванні, подібному до компонування колоїдних млинів [5-11, 13].

У цілому, конструктивні рішення емульситаторів є належним чином відпрацьованими у теоретичному та практичному сенсі, втім науковці і фахівці продовжують роботи [3, 5, 6, 10, 14], спрямовані на удосконалення зазначених технічних засобів з метою підвищення ефективності та якості реалізації процесу тонкого подрібнення м’ясної сировини.

Постановка завдання. Метою цієї статті є оцінювання можливості та доцільності вдосконалення відомої математичної моделі тонкого подрібнення м’ясної сировини на роторному емульситаторі з відповідним доопрацюванням формули для визначання потужності зазначеного пристрою.

Виклад основного матеріалу. За результатами експериментальних досліджень тонкого подрібнення м’ясної сировини на емульситаторах було створено математичну модель третього рівня, що зв’язує фізичні та реологічні параметри робочого середовища з геометричними параметрами залученого для реалізації процесу технологічного пристрою [3]. Зазначене дає змогу враховувати всі ці параметри для проектування технологічного процесу та конструювання емульситаторів, оснащених багатозубчастими роторами та статорами. Об’єктом математичного моделювання було обрано інтегровану потужність емульситатора роторного типу при тонкому подрібненні м’ясної сировини. Розрахункову схему емульситатора наведено на рис. 1 і 2.

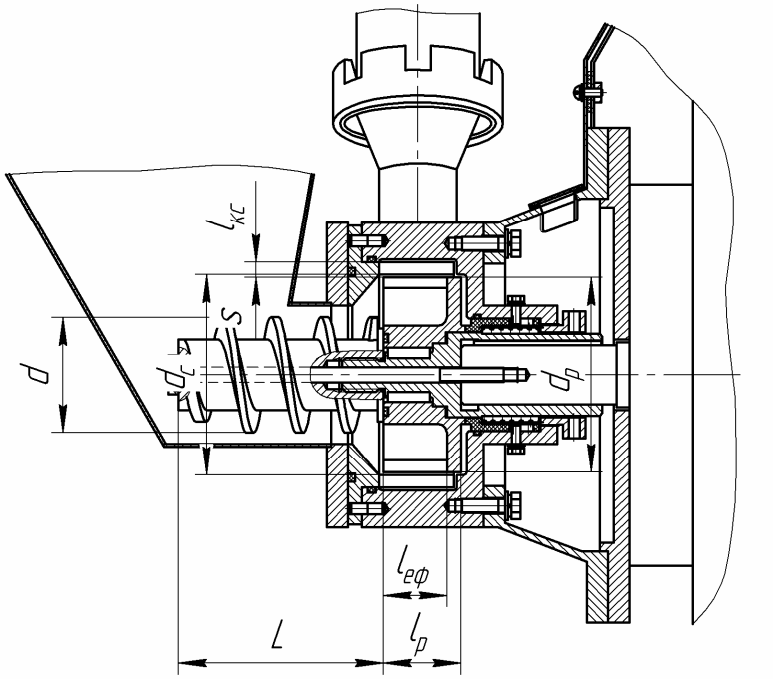


Рисунок 1 – Схема до розрахунку інтегрованої потужності емульситатора: основні елементи робочої порожнини

Джерело: [3]

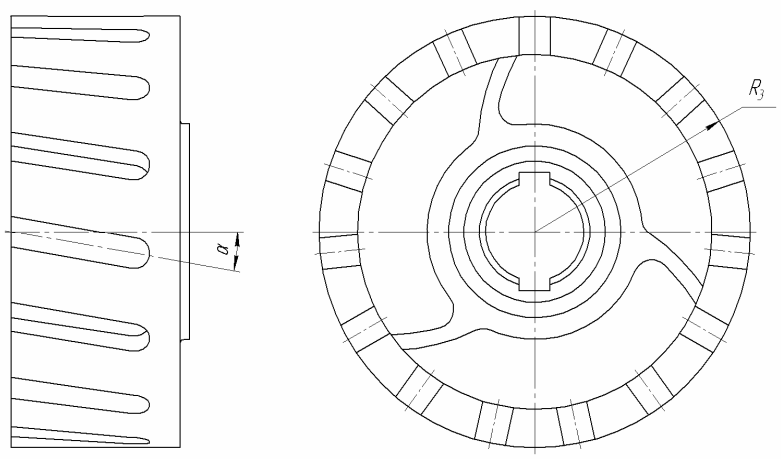


Рисунок 2 – Схема до розрахунку інтегрованої потужності емульситатора: багатозубчастий ротор
Джерело: [3]

З урахуванням всіх значущих чинників було складено формулу інтегрованої потужності $N_{інт}$, необхідної для здійснення процесу тонкого подрібнення м'ясної сировини:

$$N_{інт} = N_п + N_{ош} + N_{пш} + N_{ор} + N_п + N_з + N_с + N_в + N_м \text{, Вт} \quad (1)$$

де $N_д$ – потужність, що витрачається на доправлення сировини до робочої порожнини емульситатора;

$N_{ош}$ – потужність, яка витрачається на обтікання подавального шнеку;

$N_{пш}$ – потужність, витрата якої пов'язана з подаванням сировини шнеком;

$N_{ор}$ – потужність, яка витрачається на обтікання ротора;

$N_п$ – потужність, необхідна для подрібнення сировини;

$N_з$ – потужність, яка витрачається в зазорі між ротором і статором;

$N_с$ – потужність, необхідна для просування подрібненої маси крізь щілини статора;

$N_в$ – потужність, витрата якої пов'язана з виведенням подрібненої маси з робочої порожнини емульситатора;

$N_м$ – потужність, витрачувана на подолання механічних опорів у вузлах емульситатора.

Оскільки досліди з практичними зразками емульситаторів показали, що потужність, яка витрачається на виведення подрібненої маси з робочої порожнини емульситатора прямує до нуля, доданком $N_в$ було визнано за доцільне знехтувати. У рамках запропонованої розрахункової схеми, доданок $N_м$ характеризує потужність, що витрачається подолання механічних опорів у вузлах емульситатора. Цей доданок можна визначити лише практично, оскільки його визначають конструкція та технічний стан подрібнювача. Діапазон значень $N_м$ становить 10 – 15 % від загальної потужності – для великих промислових емульситаторів, і до 70 % – для маломасштабних дослідних установок. Із зазначених міркувань до результуючої формули було, замість доданку $N_м$, введено коефіцієнт механічних втрат $k_м$ у діапазоні від 1,1 до 1,7. Також при формуванні результуючої формули дотримувалися думки, що гідростатичний напір сировини в бункері сприяє її просуванню всередину робочої порожнини емульситатора, тому першим доданком $N_д$ було вирішено знехтувати. Завдяки докладному

аналізуванню фізичного змісту всіх складників формули 1, визнаних за значущі, було запропоновано [3] інтегровану формулу потужності роторного емульситатора:

$$N_{інт}=k_м\cdot\rho\cdot n^3\cdot\left[C\cdot \mathrm{Re}^A\cdot P^B\cdot Г_ш\cdot d_ш^5+F\cdot \mathrm{Re}^D\cdot P^E\cdot Г_p\cdot d_p^5+J\cdot\left(\frac{4\cdot\rho\cdot V_{пр}\cdot z\cdot l_{кс}\cdot s}{\mu_a\cdot p_з}\right)^G\cdot P^H\cdot Г_c\cdot d_c^5\right]+$$

$$+k_м\cdot\left[k_c\cdot k_0\cdot M\cdot L+\frac{K_н\cdot\sigma_p\cdot l_{еф}\cdot s^2\cdot\omega\cdot z}{2\cdot\pi\cdot\cos\alpha}+\frac{2\cdot(\mathrm{Re}+2)\cdot\pi\cdot l_p\cdot\mu\cdot\omega^2\cdot R_з^4\cdot R_c^{\mathrm{Re}+2}}{R_c^{\mathrm{Re}+2}-R_з^{\mathrm{Re}+2}}\right], Вт \qquad (2)$$

де $k_м$ – коефіцієнт механічних втрат;

ρ – густина робочого середовища, кг/м^3;

n – швидкість обертання привідного валу емульситатора, об./с;

Re – критерій Рейнольдса;

A, B, C, D, E, F, G, H, J – емпіричні коефіцієнти;

$Г_ш$ – симплекс геометричної подібності для шнека;

$d_ш$ – діаметр шнека, м;

$Г_p$ – симплекс геометричної подібності для ротора;

d_p – діаметр ротора, м;

$V_{пр}$ – лінійна швидкість на поверхні ротора, м/с;

μ_a – уявна в'язкість, Па·с;

z – кількість каналів;

$l_{кс}$ – довжина каналу статора, м;

$p_з$ – змочений периметр каналу статора, м;

$Г_c$ – симплекс геометричної подібності для статора;

d_c – діаметр статора, м;

k_c – системний коефіцієнт , $k_c = 102^{-1}$;

k_0 – коефіцієнт опору, $k_0 = 4 \div 8$;

M – продуктивність шнека, кг/с;

L – довжина шнека, м;

$K_н$ – коефіцієнт, що враховує технічний стан ножів та величину зазору між рухомими та нерухомими ножами;

σ_p – напруження руйнації, Па;

$l_{еф}$ – висота різальної корони ротора, м;

s – товщина шару подрібнюваного матеріалу, м;

ω – кутова швидкість, с$^{-1}$;

z – кількість каналів;

α – кут нахилу зубців ротора відносно осі його обертання, град;

l_p – висота ротора, м;

μ – динамічна в'язкість, Па·с;

$R_з$ – зовнішній радіус ротора, м;

R_c – внутрішній радіус статора, м.

Комплекс реологічних властивостей сировини P визначається за наступною формулою:

$$P=\frac{\Theta\cdot l}{\eta_{пл}\cdot v}, \qquad (3)$$

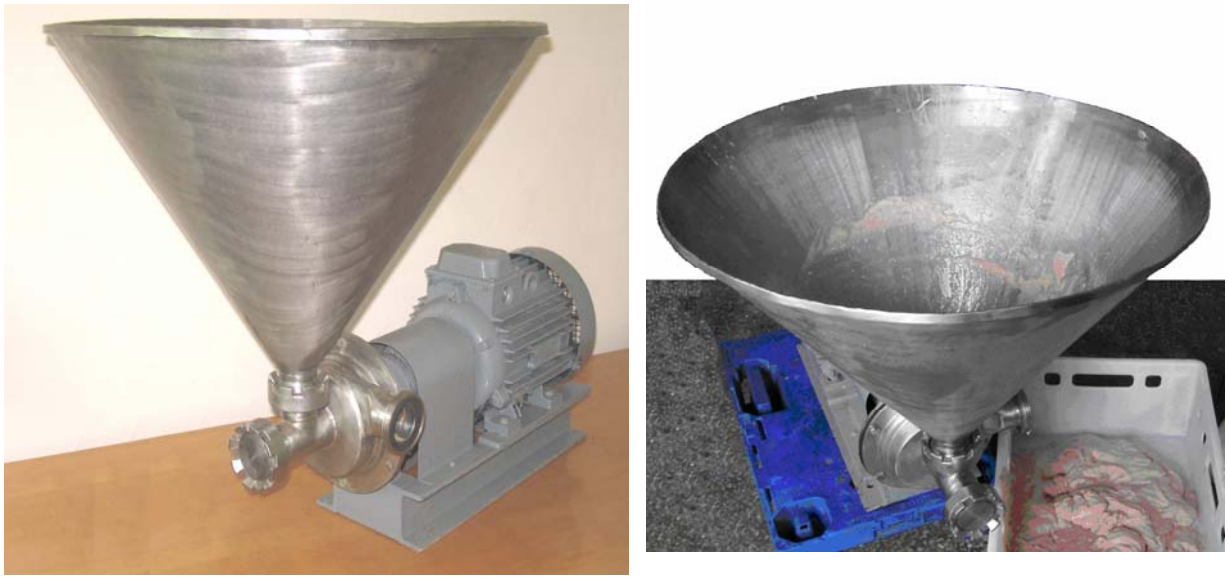
де Θ – напруження зсуву, Па;

l – визначальний геометричний розмір, м;

$\eta_{пл}$ – пластична в'язкість робочого середовища, Па·с;

v – швидкість руху робочого середовища, м/с.

Як зазначалося вище, виходячи з конструкції емульситатора (рис. 3), використаного для проведення експериментів з тонкого подрібнення м'ясної сировини було прийнято рішення знехтувати доданком $N_д$ у формулі інтегрованої потужності 1. Дослідження, результати яких викладено у [14], дають змогу врахувати у зазначеній формулі вплив геометричних параметрів живильного бункера на інтегровану потужність емульситатора.



Технічна характеристика: продуктивність – 300 кг/год; частота обертання ротора – від 0 до 3000 об/хв (застосовано частотний перетворювач); потужність двигуна – 5,5 кВт; довжина – 950 мм; ширина – 600 мм; висота – 670 мм; маса – 64 кг.

Рисунок 3 – Установка Я5-ФП2Ф для тонкого подрібнення харчової сировини: без продукту (ліворуч) та під час дослідної виробки (праворуч)

Джерело: [9]

У ході досліджень, описаних у [14], було визначено витратні характеристики живильних бункерів, прилаштованих до емульситаторів типу «ніж-решітка». Було визначено витратні характеристики п'яти типових конструкцій живильних бункерів, зображених на рис. 4-8. Оскільки дія різального комплекту емульситаторів типу «ніж-решітка», що складається з масиву ножів, кожний з яких оснащено багатьма лезами, подібна до дії подавального шнека, яким закінчується складальний вузол різального ротора емульситаторів типу «ротор-статор», в обох випадках маємо справу зі своєрідними аналогами фаршевих насосів. Отже, закономірності щодо залежності витратних характеристик живильних бункерів емульситаторів м'яса від їх конструкції поширюються на обидва описані види обладнання такого призначення.

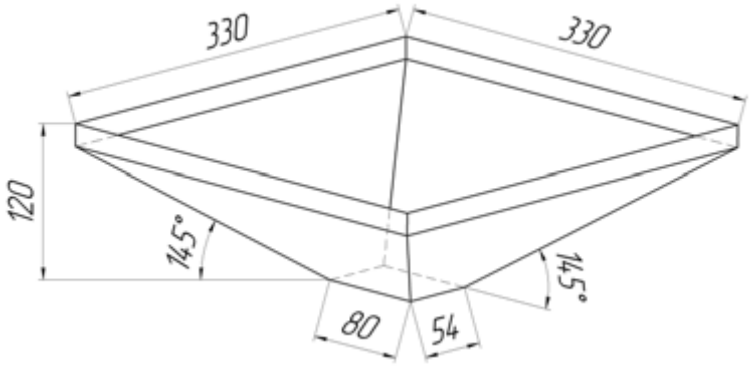


Рисунок 4 – Живильний бункер Тип 1

Джерело: [14]

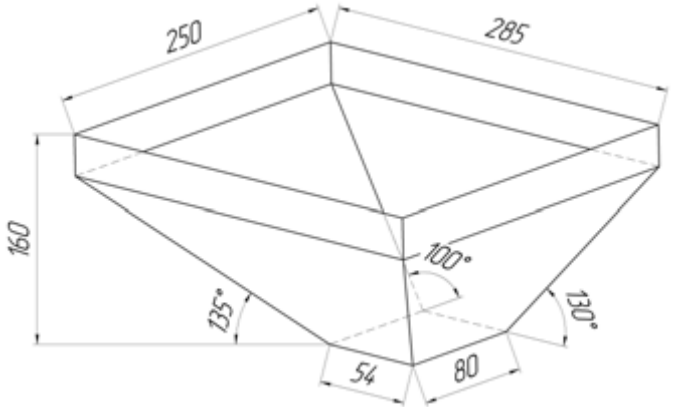


Рисунок 5 – Живильний бункер Тип 2

Джерело: [14]

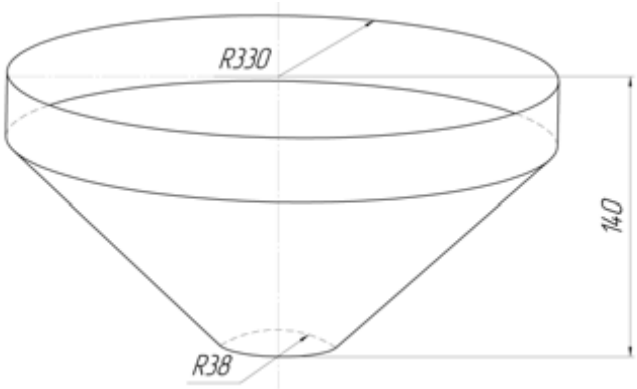


Рисунок 6 – Живильний бункер Тип 3

Джерело: [14]

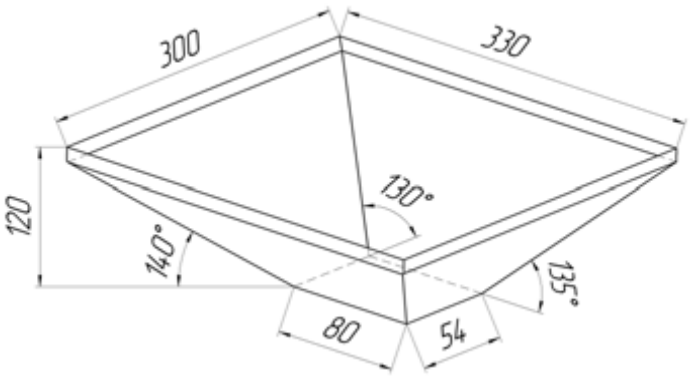


Рисунок 7 – Живильний бункер Тип 4

Джерело: [14]

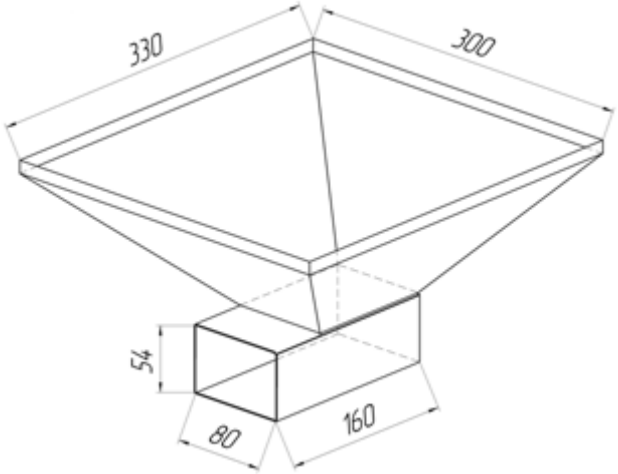


Рисунок 8 – Живильний бункер Тип 5

Джерело: [14]

Шляхом проведення експериментів з емульситаторами, оснащеними живильними бункерами різної конструкції, виявлено, що найвищою середньою масовою витратою сировини (0,15 кг/с) характеризувався бункер Тип 2 (рис. 5) виражено асиметричної будови з однією вертикальною стінкою. Дещо менші значення цього показника (0,11 кг/с та 0,10 кг/с відповідно) були зафіксовані для бункера Тип 3 (рис. 6) у формі зрізаного конуса та для бункера Тип 4 (рис. 7) у формі зрізаної рівнобічної піраміди з більш вираженим нахилом бічних граней. Бункер Тип 1 (рис. 4) у формі зрізаної рівнобічної піраміди з менш вираженим нахилом бічних граней показав, відповідно, ще меншу часову витрату сировини за масою (0,049 кг/с). Слід зазначити, що найнижче значення середньої масової витрати сировини (0,003 кг/с), характерне для живильного бункера Тип 5 (рис. 8) у формі зрізаної рівнобічної піраміди дослідники пов’язують з наявністю горизонтального патрубка у нижній частині зазначеного бункера. З одного боку така конструктивна особливість бункера Тип 5 не є настільки критичною для емульситаторів «ротор-статор», оскільки складальна одиниця різального ротора має у своєму складі розташований на кінці головного робочого вала подавальний шнек. З іншого боку мінімізація, аж до повного припинення, подачі сировини з бункера є характерною для емульситаторів всіх відомих конструктивних схем. Зазначене трапляється через невідповідність структурно-механічних м’ясної

сировини, неналежний стан вузлів і поверхонь м'ясопереробного обладнання та ін. Таким чином, значення середньої масової витрати сировини, отримане для бункера Тип 5, можна вважати нижнім пороговим значенням показника.

З огляду на зазначене вище, вважаємо за виправдане доповнити формулу 2 коефіцієнтом стабільності подачі $k_{сп}$, який забезпечуватиме врахування особливостей доправлення сировини з живильного бункера до робочої порожнини емульситатора. Оскільки штатний живильний бункер установки Я5-ФП2Ф для тонкого подрібнення харчової сировини є геометрично подібним до бункера Тип 3, для зазначеного типу бункера коефіцієнт стабільності подачі $k_{сп}$ дорівнює 1, відповідно для бункера Тип 2 асиметричної будови $k_{сп}$ дорівнює 1,37 – виходячи з визначеного значення середньої масової витрати сировини, натомість для бункерів Тип 4 та Тип 1 зазначений коефіцієнт дорівнює 0,91 та 0,43 відповідно. Зрозуміло, що у випадку з бункером Тип 5, а також у будь-якому іншому випадку припинення подачі сировини на обробку, коефіцієнт $k_{сп}$ прямує до 0, оскільки корисне використання потужності припиняється. Отже, з урахуванням долучення коефіцієнта $k_{сп}$, формула 2 набуде наступного вигляду:

$$N_{інт}=k_{м}\cdot k_{сп}\cdot\rho\cdot n^{3}\cdot\left[C\cdot \mathrm{Re}^{A}\cdot P^{B}\cdot\Gamma_{ш}\cdot d_{ш}^{5}+F\cdot \mathrm{Re}^{D}\cdot P^{E}\cdot\Gamma_{р}\cdot d_{р}^{5}+J\cdot\left(\frac{4\cdot\rho\cdot V_{пр}\cdot z\cdot l_{кс}\cdot s}{\mu_{a}\cdot p_{з}}\right)^{G}\cdot P^{H}\cdot\Gamma_{с}\cdot d_{с}^{5}\right]+$$

$$+k_{м}\cdot\left[k_{с}\cdot k_{0}\cdot M\cdot L+\frac{K_{н}\cdot\sigma_{р}\cdot l_{еф}\cdot s^{2}\cdot\omega\cdot z}{2\cdot\pi\cdot\cos\alpha}+\frac{2\cdot(\mathrm{Re}+2)\cdot\pi\cdot l_{р}\cdot\mu\cdot\omega^{2}\cdot R_{з}^{4}\cdot R_{с}^{\mathrm{Re}+2}}{R_{с}^{\mathrm{Re}+2}-R_{з}^{\mathrm{Re}+2}}\right],Вт \qquad (3)$$

де $k_{сп}$ – коефіцієнт стабільності подачі; решта позначень – див. пояснення до формули 2.

Висновки. Завдяки долученню результатів досліджень витратних характеристик живильних бункерів, якими оснащують установки тонкого подрібнення (емульситатори) м'ясної сировини вдосконалено математичну модель реалізації зазначеного процесу на роторному емульситаторі, також відповідним чином доопрацьовано інтегровану формули для визначання потужності таких пристроїв. Здійснене доопрацювання математичної моделі процесу тонкого подрібнення належним чином враховує типові конструкції живильних бункерів емульситаторів, тому перспективними є подальші дослідження, спрямовані на інкорпорацію до інтегрованої формули для визначання потужності універсального складника, який враховуватиме витратні характеристики живильних бункерів будь-якої форми і геометричних розмірів. У цьому сенсі, за приклад може слугувати розрахунок, представлений у [15] для сухих сипких сумішей, проте у випадку м'ясної сировини слід належним чином урахувати її фізико-хімічні та структурно-механічні особливості.

Список літератури

1. Hubka V., Eder W. E. Theory of technical systems: a total concept theory for engineering design. Springer Science & Business Media. 2012.
2. Гноевой А. В. Исследование математических моделей механических систем : учеб. пособие. Москва : Изд-во МГУИЭ, Ч. 1. 2010. 307 с.
3. Вербицький С. Б., Старчевой С. О., Майборода Ю. В. Математична модель процесу тонкого подрібнення м'ясної сировини на роторному емульситаторі багатозубчастої конструкції. *Вісник аграрної науки.* 2011. № 9. С. 51-54.
4. Kunz B. Lexikon der Lebensmitteltechnologie. Springer-Verlag. 2013.

5. Вербицкий С. Б., Копылова Е. В., Усатенко Н. Ф., Крыжская Т. А. Конструкция и технологические особенности использования эмульситатора мясного сырья. *Вестник Государственного университета имени Шакарима города Семей.* 2019. № 1(85). С. 18-22.
6. Груданов В.Я., Бренч, А.А., Ткачева Л.Т., Филиппович М.О. Тонкое измельчение мясного сырья новым режущим механизмом в эмульситаторах. *Весці Нацыянальной акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук.* 2010. № 3. С. 105-109.
7. Ryder S. Effektive Prozesse sichern den Erfolg. *Fleischwirtschaft*. 2014. № 1. S. 52-54.
8. Смарандахе П. Эмульситатор «ИНОТЕК»-высокое качество продукта и впечатляющая экономия. *Мясной ряд.* 2016. № 1. С. 14-16.
9. Лисицын А. Б., Кожевникова О. Е., Пестов Н. В., Захаров А. Н., Дыдыкин А. С.. Современное технологическое оборудование для производства детского питания на мясной основе. *Мясная индустрия.* 2015. № 7. С. 22-24.
10. Груданов В. Я., Бренч А. А. Моделирование и оптимизация процессов переработки сельскохозяйственной продукции. Минск : БГАТУ, 2017. 280 с.
11. Вербицкий С. Б., Шевченко В. В., Батраченко А. В. Измельчение мясного сырья. *Мясной бизнес.* 2010. № 5(89). С. 84-96.
12. Sannik U., Lepasalu L., Poikalainen V. Interactions between size reduction and thermal processes during treatment of animal by-products. *Agron. Res.* 2013, 11(2), 513-520.
13. Stephan Produktportfolio. Microcut. Hameln. Stephan Machinery. 2017. 8 S.
14. Мирошніченко К. А., Батраченко О. В. Витратні характеристики бункерів емульситаторів. *Вісник Хмільницького національного університету. Технічні науки.* 2016. № 5(241). С. 14-17.
15. Семикопенко И .А., Воронов В. П., Фадин Ю. М., Смирнов Д. В. Расчет объемного расхода материала через загрузочный бункер дезинтегратора. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова.* 2015. № 1. С. 68-70.

References

1. Hubka, V., & Eder, W. E. (2012). *Theory of technical systems: a total concept theory for engineering design.* Springer Science & Business Media [in English].
2. Gnoevoi, A. V. (2010*). Issledovanie matematicheskikh modelei mekhanicheskikh sistem: ucheb. posobie [Research of mathematical models of mechanical systems: study guide].* Moskow : MSUEE, P. 1. [in Russian].
3. Verbytskyi, S. B., Starchevoi, S. O., & Maiboroda, Yu. V. (2011). Matematychna model protsesu tonkoho podribnennia miasnoi syrovyny na rotornomu emulsytatori bahatozubchastoi konstruktsii [Mathematical model of the process of comminuting raw meats in a rotary flow cutter of multicog design]. *Visnyk ahrarnoi nauky – Bulletin of Agricultural Science, 9*, 51-54 [in Ukrainian].
4. Kunz, B. (2013). *Lexikon der Lebensmitteltechnologie.* Springer-Verlag [in English].
5. Verbytskyi, S. B., Kopylova, E. V., Usatenko, N. F., & Kryzhska, T. A. (2019). Konstruktsiia i tekhnologicheskie osobennosti ispolzovaniia emulsitatora miasnogo syria [Design and technological peculiarities of use of a flow cutter for meat]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta imeni Shakarima goroda Semei – Bulletin of Shakarim University in Semei, 1(85),* 18-22 [in Russian].
6. Grudanov, V. Ia., Brench, A. A., Tkacheva, L. T., & Filippovich, M. O. (2010). Tonkoe izmelchenie miasnogo syria novym rezhushchim mekhanizmom v emulsitatorakh [Comminution of raw meats with new cutting mechanism in flow cutters]. *Vestsi Natsyianalnoi akademii navuk Belarusi. Seriia agrarnykh navuk – News of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian Sciences Series, 3*, 105-109 [in Russian].
7. Ryder, S. (2014). Effektive Prozesse sichern den Erfolg. *Fleischwirtschaft*, *1*, 52-54 [in English].
8. Smarandakhe, P. (2016). Emulsitator “INOTEC” – vysokoe kachestvo produkta i vpechatliaiushchaia ekonomia [”INOTEC” flow cutter – high quality of the product and impressive savings]. *Miasnoi riad – Meat Mall,* 1, 14-16 [in Russian].
9. Lisitsyn, A. B., Kozhevnikova, O. E., Pestov, N. V., Zakharov, A. N., & Dydykin, A. S. (2015). Sovremennoe tekhnologicheskoe oborudovanie dlia proizvodstva detskogo pitaniia na miasnoi osnove [Modern technological equipment for manufacturing child foods on meat base]. *Miasnaia industria – Meat Industry, 7*, 22-24 [in Russian].
10. Grudanov, V. Ia., & Brench, A. A. (2017). *Modelirovanie i optimizatsiia protsessov pererabotki selskokhoziaistvennoi produktsii [Modeling and optimization of the processes of processing agricultural products].* Minsk : BSATU [in Russian].
11. Verbytskyi, S. B., Shevchenko, B. V., & Batrachenko, A. V. (2010). Izmelchenie miasnogo syria [Grinding of raw meats]. *Miasnoi biznes – Meat Business, 5(89),* 84-96 [in Russian].

12. Sannik, U., Lepasalu, L., & Poikalainen, V. (2013). Interactions between size reduction and thermal processes during treatment of animal by-products. *Agron. Res*, *11*(2), 513-520 [in English].
13. *Stephan Produktportfolio. Microcut.* (2017). Hameln. Stephan Machinery. 8 [in English].
14. Myroshnichenko, K. A., & Batrachenko, O. V. (2016). Vytratni kharakterystyky bunkeriv emulsytatoriv [The flow characteristics of the hoppers emulsifiers]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky – Herald of Khmelnytskyi state university. Technical sciences, 5(241)*, 14-17 [in Ukrainian].
15. Semikopenko, I. A., Voronov, V. P., Fadin, Iu. M., & Smirnov, D. V. (2015). Raschet obieomnogo raskhoda materiala cherez zagruzochnyi bunker desintegratora [Calculation of volume flow rate of material through feeding bin of a desintegrator]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova – Herald of BSTU named after V. G. Shukhov, 1*, 68-70 [in Russian].

Sergii Verbytskyi, PhD tech. sci.
Institute of Food Resources of NAAS, Kyiv, Ukraine
Olexandr Batrachenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci**.**
Cherkassy State Technological University, Cherkassy, Ukraine
Nadiya Filimonova, PhD tech. sci.
Cherkassy State Technological University, Cherkassy, Ukraine

Upgrading the Mathematical Model of Raw Meat Comminuting Process in Flow Cutter

The proposed article aims at analyzing existing technical means of continuous action for raw meats comminution and studying the features of mathematical modeling of this process. The aim is also to evaluate the possibility and feasibility of improving the existing mathematical model of raw meats comminution in a rotary flow cutter with a corresponding development of the formula for determining the power of the device specified.

The analysis of existing technical means of continuous action for raw meats comminution has been performed; a comparative characteristic of the two most commonly used design schemes of flow cutters has been given, namely: “knife-grate” and “rotor-stator”. The features of mathematical modeling of the process of raw meats comminution in a rotary flow cutter are analyzed. The formula for calculating the integrated power is given, this being proposed to be upgraded by taking into account the flow characteristics of the main structures of the feed bins, the comminuting appliances for raw meats (flow cutters) are equipped with. It is taken into account that the best characteristics of meat raw materials delivery for comminution have asymmetrical bins with a vertical wall, however the design of a bunker in the shape of a truncated cone was taken as the basic one, for which the feed stability coefficient proposed has the numerical value of 1. The numerical values of the feed stability coefficient for different feed bins are also presented. The ways of further development of research were determined aiming at further improving the formula of integrated power of flow cutter by a universal component that would take into account all possible designs of feed bins of flow cutters.

Due to the incorporation of the results of studies of the flow characteristics of feeding bins, the mathematical model of the implementation of this process on a rotary flow cutter has been upgraded, the integrated formula for determining the power of such devices has also been modified accordingly. The refinement of the mathematical model of the fine grinding process takes into account the typical designs of feeding bins of flow cutters; therefore, further studies aiming at enhancing the integrated formula that will take into account the flow characteristics of feeding bins of any shape and geometric dimensions are promising.

raw meats, comminution, rotary flow cutter, power, feeding bin, mathematical model

Одержано (Received) 27.02.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 14.03.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

ЗАСОБИ ТРАНСПОРТУ. ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС. ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЛОГІСТИКА

УДК 656:338 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).36-45

В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук, **Д.В. Голуб,** доц., канд. техн. наук, **Д.О. Великодній,** канд. техн. наук, здобувач, **В.О. Дьяченко,** асп.
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: AulinVV@gmail.com, dimchik529@gmail.com

Розв'язання проблеми надійності технологічних процесів вантажних перевезень підприємствами агропромислового виробництва

Розроблено структурно-функціональні схеми технологічного процесу перевезень в агропромисловому виробництві на прикладі транспортування зерна на експорт підприємством виробником. Виявлено взаємодію автомобільного транспорту з іншими видами транспорту в цьому процесі. Запропоновано різні варіанти реалізації структурно-функціональних схем процесу перевезення зерна та проаналізовано їх елементи як технологічні операції. Дана оцінка ймовірності безвідмовної роботи при реалізації технології перевезення зерна на експорт від кількості структурних елементів і запропоновані варіанти структурно-функціональної схеми. Виявлено, що структуризація процесу перевезень у вигляді послідовності взаємодії його учасників дозволяє вирішити завдання зниження кількості структурних елементів функціонально-структурної схеми і відповідно підвищити надійність транспортних систем.
агропромислове виробництво, технологічний процес, перевезення, надійність, забезпечення, структурний елемент

В.В. Аулин, проф., д-р техн. наук, **Д.В. Голуб,** доц., канд. техн. наук, **Д.О. Великодный**, канд. техн. наук, соискатель, **В.О. Дьяченко,** асп.
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Решение проблемы надежности технологических процессов грузовых перевозок предприятиями агропромышленного производства

Разработаны структурно-функциональные схемы технологического процесса перевозки в агропромышленном производстве на примере транспортировки зерна на экспорт предприятием производителем. Выявлено взаимодействие автомобильного транспорта с другими видами транспорта в этом процессе. Предложены разные варианты реализации структурно-функциональных схем процесса перевозки зерна и проанализированы их элементы как технологические операции. Дана оценка вероятности безотказной работы при реализации технологии перевозки зерна на экспорт от количества структурных элементов и варианта структурно-функциональной схемы. Выявлено, что структуризация процесса перевозок в виде последовательности взаимодействия его участников позволяет решить задачу снижения количества структурных элементов функционально-структурной схемы и соответственно повысить надежность транспортных систем.
агропромышленное производство, технологический процесс, перевозка, надежность, обеспечение, структурный элемент

Постановка проблеми. Відомо, що рівень надійності технологічних процесів перевезень значною мірою залежить від їх виду і області використання [1, 2-4]. На сьогодні рівень надійності перевезень підприємствами агропромислового виробництва (АПВ) не достатньо розглянуто з точки зору теорії і практики її забезпечення та методів і засобів її підвищення. В звязку з чим, в першу чергу, необхідна розробка структуризації процесу перевезень у вигляді послідовності взаємодії його учасників,

© В.В. Аулін, Д.В. Голуб, Д.О. Великодній, В.О. Дьяченко, 2019

що дозволить вирішити завдання зниження кількості структурних елементів функціонально-структурної схеми надійності транспортних систем АПВ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. О. В. Сироткіна [5] підкреслює, що транспортны процеси характеризуються не простим переміщенням вантажу, а дотриманням конкретних параметрів і умов задоволення потреб, при відхиленні яких від встановленого рівня настає часткова або повна відмова. Ці параметри можна відновити для подальшої експлуатації автотранспортних засобів, на що знадобиться деякий час і витрати, а транспортний процес доцільно оцінювати в термінах і визначеннях надійності технічних об'єктів. При цьому безвідмовність транспортного процесу визначається інтервалами часу або напрацюванням в кілометрах пробігу, а довговічність транспортного процесу визначається напрацюванням до моменту, коли його здійснення не може задовольняти потреби з економічних або технічних причин. Відновлюваність характеризується часом або витратами, необхідними для приведення транспортного процесу у відповідність з потребами споживача, а збережуваність транспортного процесу - можливістю його здійснення після тривалого призупинення з яких-небудь причин.

Д. В. Бичков [6] виділяє у складі транспортного обслуговування дві групи процесів, що зв'язують підприємство з контрагентами, і внутрішньовиробничі процеси, що забезпечують транспортний зв'язок між підрозділами підприємства.

Автори робіт [7-10] підкреслюють, що надійність вантажних автомобільних перевезень АПВ – це складний параметр, який визначає здатність компанії-постачальника виконувати узяті на себе зобов'язання по дотриманню графіка доставки вантажів, збереженню партії вантажу і збереження споживчих властивостей товарів при перевезенні.

З аналізу публікацій можна бачити, що при розгляді проблеми забезпечення надійності технологічного процесу перевезення підприємствами, у тому числі і підприємствами АПВ передусім враховується тільки надійність технічних засобів, але проблема надійносты виконуваних послуг розглядається недостатньо. Що є безумовно актуальним для більш точної комплексної оцінки надійності автомобільної транспортної системи АПВ.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розроблення структурно-функціональної схеми технологічного процесу перевезення в АПВ, на прикладі транспортування зерна на експорт підприємством виробником.

Виклад основного матеріалу. В загальному вигляді технологічний процес перевезень вантажів в АПВ можна представити у вигляді послідовної структурно-функціональної схеми, що характеризує функціональний взаємозв'язок його структурних елементів. Зазначимо, що структурним елементом процесів перевезень є будь-який його учасник, що виконує окрему технологічну операцію. Кількість елементів процесу перевезень завжди є обмеженою.

З участю автомобільного транспорту (АТ) у АПВ одним з найскладніших по рівню організації є процес перевезення підприємством виробником або транспортним підприємством зерна на експорт в змішаному сполученні, включаючи транспортно-складські і пряму транспортну схему, враховуючи структури транспортних систем.

Структурними елементами процесу перевезення зерна в даному випадку є технологічні операції по його переміщенню між терміналами, а також операції по їх термінальній обробці. В процесах перевезення зерна кількість структурних елементів n (рис. 1а) залежить від обраного варіанту транспортно-технологічної схеми. Виявлено, що структурних елементів в даному випадку може бути 7-11. Їх деталізацію проводили у відповідності з деревом відмов процесу перевезень зерна. Було визначено, що число структурних елементів при цьому збільшувалось.

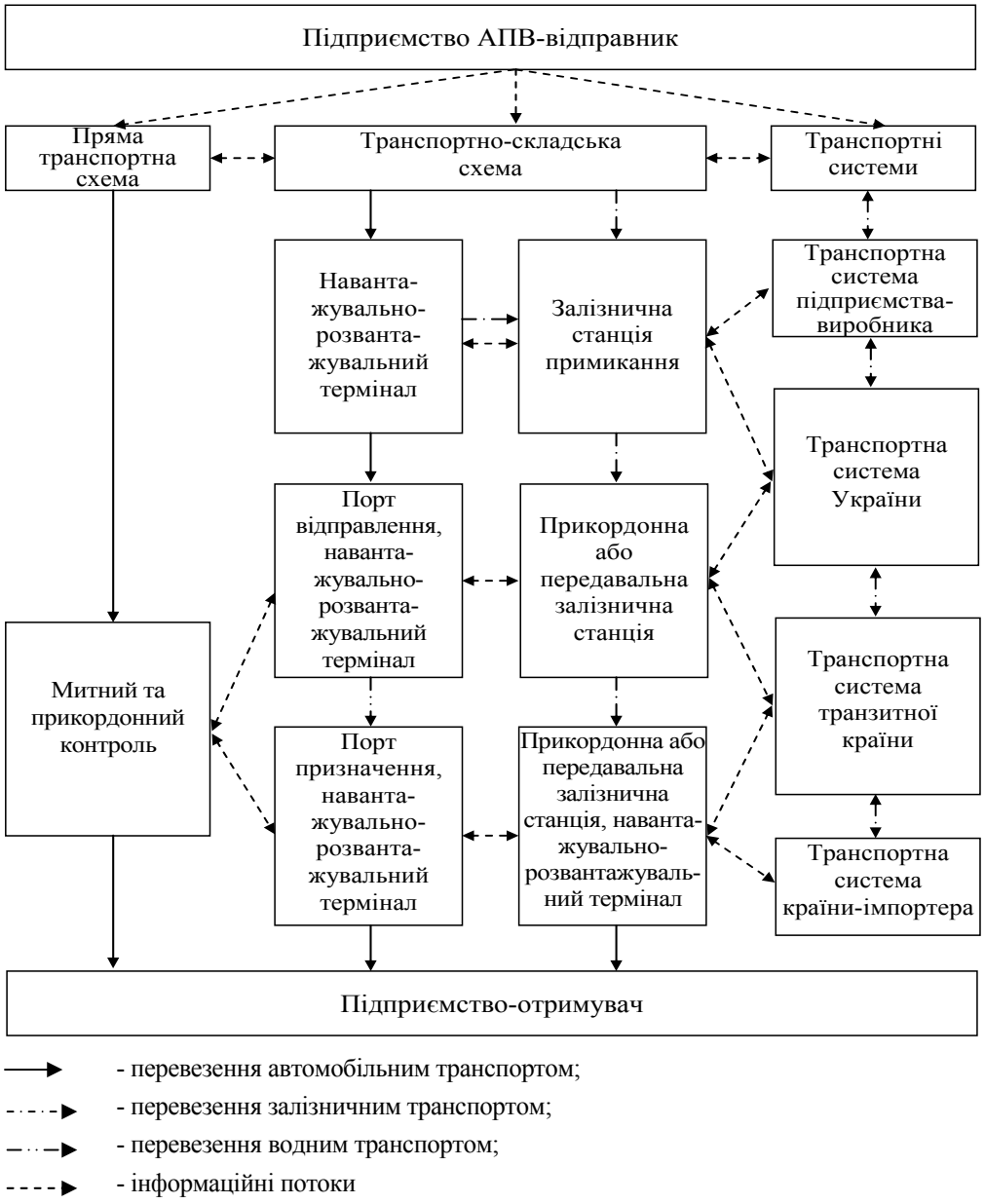
Залежність величини ймовірності безвідмовної роботи транспортної системи від кількості структурних елементів процесу перевезень наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати оцінки величини надійності *P* транспортної системи (підприємство АПВ) від кількості елементів структурно-функціональної схеми

Назва показника	Варіанти перевезень в транспортній системі		
	Пряма транспортна схема	Транспортно-складська схема	
Кількість структурних елементів *n*	7	9	11
Принцип розрахунку P_i^n	$0{,}95^7$	$0{,}95^9$	$0{,}95^{11}$
Величина загальної надійності *P*	0,698	0,630	0,569

Джерело: розроблено авторами

Загальна структурна схема взаємодії учасників технологічного процесу вантажних перевезень наведена на рис. 1.



- перевезення автомобільним транспортом;
- перевезення залізничним транспортом;
- перевезення водним транспортом;
- інформаційні потоки

Рисунок 1 – Загальна структурна схема взаємодії учасників технологічного процесу перевезення зерна підприємством АПВ - перевізником на експорт

Джерело: розроблено авторами

Структурно-функціональна схема взаємодії учасників технологічного процесу перевезення зерна, представлена на рис. 2.

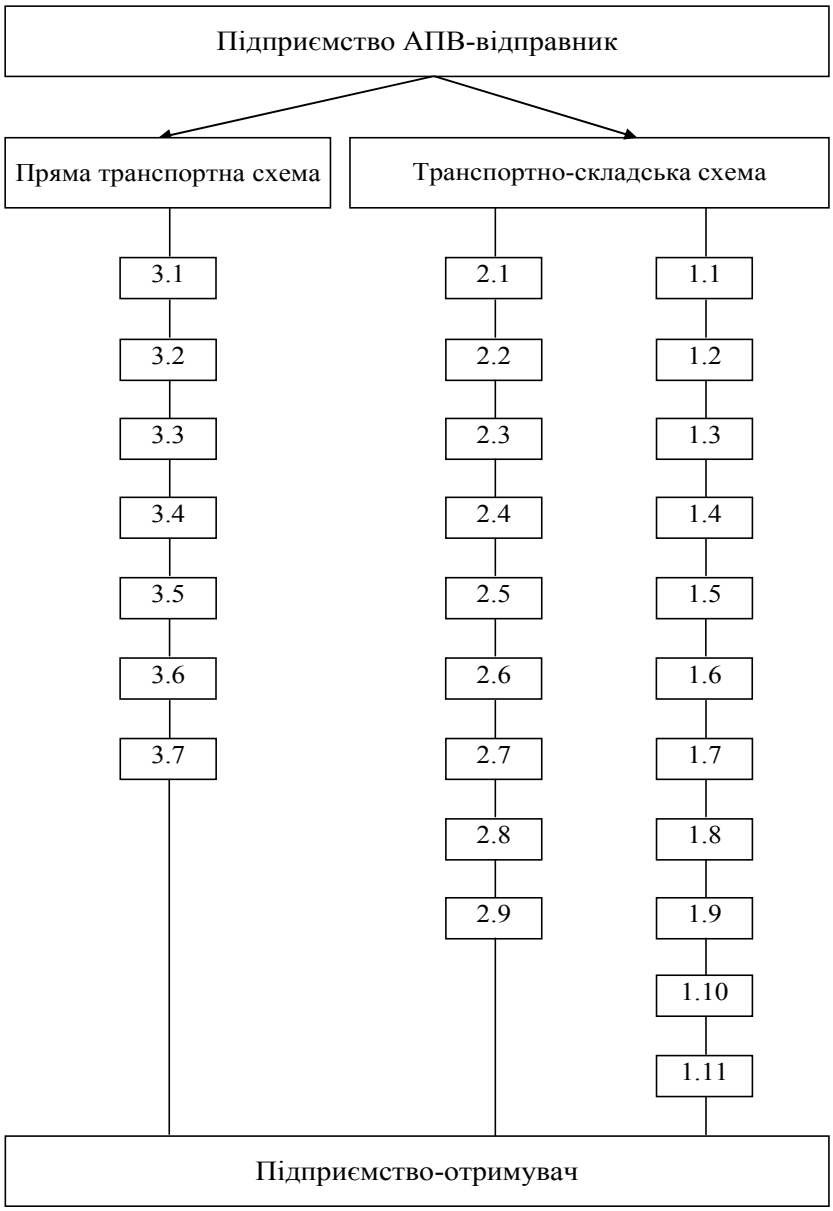


Рисунок 2 – Структурно-функціональна схема взаємодії учасників технологічного процесу перевезення зерна підприємством АПВ - перевізником на експорт і варіанти її реалізації
Джерело: розроблено авторами

Проаналізуємо запропоновану структурно-функціональну схему та варіанти її реалізації, а також з'ясуємо зміст елементів (операцій) технологічного процесу перевезення зерна на експорт підприємством АПВ. Операції 1.1, 2.1, 3.1 являють собою термінальну обробку на терміналі відправника. Операції 1.2, 2.2 – перевезення АТ до навантажувально-розвантажувального терміналу. Операції 1.3, 2.3 - термінальна обробка на навантажувально-розвантажувальному терміналі. Операції 1.4 – перевезення залізничним транспортом до станції примикання, 1.5 - операції з термінальної обробки на станції примикання підприємства-відправника, 1.6 - перевезення залізничним транспортом до передаточної станції, 1.7 – операції з термінальної обробки на передаточній або прикордонній станції, 1.8 - перевезення залізничним транспортом до передаточної станції та навантажувально-

розвантажувального терміналу, 1.9 - операції з термінальної обробки на передаточній станції, митному пункті, навантажувально-розвантажувальному терміналі. Сукупність операцій 1.10, 2.8, 3.6 – перевезення АТ до навантажувально-розвантажувального терміналу підприємства-отримувача, 1.11, 2.9, 3.7 - операції з термінальної обробки на навантажувально-розвантажувальному терміналі підприємства-отримувача. Решта операцій мають наступний зміст: 2.4 – автомобільні перевезення до порту відправлення та навантажувально-розвантажувального терміналу, 2.5 - операції з термінальної обробки в порту відправлення та на навантажувально-розвантажувальному терміналі, 2.6 – перевезення водним транспортом до порту призначення та навантажувально-розвантажувального терміналу, 2.7 - операції з термінальної обробки в порту призначення та на навантажувально-розвантажувальному терміналі, 3.2 – автомобільні перевезення до митного пункту при виїзді з території України на територію транзитної держави, 3.3 - операції з термінальної обробки на митному пункті при виїзді з території України на територію транзитної держави, 3.4 - автомобільні перевезення транспортом до митного пункту при виїзді з території транзитної держави на територію країни-імпортера, 3.5 - операції з термінальної обробки на митному пункті при виїзді з території транзитної держави на територію країни-імпортера.

Ймовірність безвідмовної роботи Р даних варіантів оцінювали за умови, що всі структурні елементи є рівнонадійними. Оцінка їх надійності свідчить, що жоден варіант перевезень не є високонадійним і процес перевезень реалізується з високим ступенем ризику. При організації другого варіанту процесу перевезень відмови різних видів відбуваються в середньому в 37 випадків зі 100, що ніяк не можна визнати задовільним в умовах конкурентоспроможності автоперевізників на ринку транспортних послуг. Збільшення кількості структурних елементів до 12-13 наближає надійність перевезень до 50%, що робить її практично непрацездатною.

Для підтримки величини надійності технологічного процесу перевезення підприємством АПВ на високому рівні необхідно, щоб надійність структурних елементів задовольняла наступній умові:

$$p_i \geq \sqrt[n]{P}\,. \tag{1}$$

Врахування цієї умови свідчить, що для підтримки величини надійності (ймовірності безвідмовної роботи) технологічного процесу перевезень на рівні не нижче 0,95, необхідно вибирати структурні елементи з надійністю: в 1-у варіанті (транспортно-складська схема) - 0,993; в 2-у варіанті - 0,994; в 3-у варіанті (пряма транспортна схема) - 0,995. Реалізувати такі варіанти перевезень з високою надійністю вельми проблематично.

Визначено, що підвищити надійність технологічних процесів перевезень можна зниженням кількості структурних елементів. Теоретично максимальна їх надійність забезпечуватиметься за наявності одного структурного елемента з дотриманням рівності: $P = p_i$. Разом з тим, якщо розглядати процес перевезень у вигляді транспортно-технологічної схеми, то здійснити його автомобілем в один етап неможливо. Основних етапів буде як мінімум три: навантаження - транспортування - розвантаження. Наявність допоміжних або забезпечуючих технологічних операцій значно збільшують величину *n*. Останнє передбачає подальших і ретельних досліджень.

Незалежно від кількості структурних елементів в процесі перевезень обов'язковою для перевезень вантажів є умова:

$$\prod_{i=1}^{n} p_i \geq \beta\,, \tag{2}$$

де β – рівень надійності процесу вантажних перевезень, задовільний для замовника і ним встановлюється при укладенні договору на перевезення.

Вирішення завдання зниження кількості структурних елементів в процесі перевезень значно спрощується у разі, коли в якості структурного елементу розглядати не окрему технологічну операцію, а роботу певного учасника процесу перевезень, яка може бути виконана не однією, а цілим набором технологічних операцій. Учасник процесу перевезень є фізичною або юридичною особою, що надає послуги з транспортування, організації перевезень, супроводу вантажів, митного оформлення, складування, вантажопереробки, оформлення товарно-транспортних і супровідних документів, надання інших транспортних послуг.

До участі в процесі перевезень можуть бути залучені перевізники, оператори процесу в змішаному сполученні, експедитори, стівідори, митні брокери і інші посередники, що працюють на умовах аутсорсингу. Послуги цих посередників необхідні у разі, коли у автоперевізника або замовника відсутні або організаційно-технологічні можливості виконання всієї схеми процесу перевезень або він може виконаний власними силами тільки їх частини. Елементи транспортно-технологічної схеми, які не можуть бути виконані автоперевізником або замовником власними силами внаслідок низької надійності або високих витрат також реалізуються посередниками.

Зазначене свідчить про те, що при оцінці ймовірності безвідмовної роботи транспортних систем необхідно в першу чергу мати на увазі не кількість технологічних операцій в їх транспортно-технологічних схемах, а число учасників процесу перевезень. Слід врахувати і їх статус, який визначається масштабом роботи і ступенем відповідальності. Врахування останніх факторів процесу перевезень вантажів і пасажирів надає учасникам статус місцевого, регіонального або міжнародного рівня. В рамках однієї транспортно-технологічної схеми процесу перевезень можлива одночасна робота декількох учасників різних статусів. При цьому можна виділити різні комбінації, які визначаються числом учасників процесу перевезень, включаючи вантажовідправників, вантажоодержувачів, автоперевізників і інших учасників (рис. 2). Першій комбінації (I) характерна наявність одного учасника, який виконує весь комплекс технологічних операцій процесу доставки. Друга комбінація (II) налічує двох учасників, третя комбінація (III) - відповідно трьох учасників, і т.д.

Використовуючи метод математичної індукції кількість комбінацій взаємодії учасників процесу перевезень вантажів і пасажирів можна визначити по формулі числа розміщень з комбінаторики:

$$A_r^m = r(r-1)(r-2)\cdot\ldots\cdot(r-m+1) = \frac{r!}{(r-m)!}, \qquad (3)$$

де *r, m* – відповідно число окремих технологічних операцій в транспортно-технологічній схемі та учасників процесу перевезень.

Обчислення по формулі (3) передбачає наступний порядок дій:

- з’ясувати кількість учасників процесу перевезень;
- виділити усі можливі транспортно-технологічні операції і надати їм нумерацію;
- з’ясувати можливі комбінації взаємодії учасників процесу перевезень при виконанні технологічних операцій;
- враховуючи попередні пункти, побудувати схеми взаємодії учасників процесу перевезень;
- оцінити ймовірність виконання технологічних операцій та взаємодії учасників процесу перевезень, структурованої в послідовності варіантів їх комбінацій.

Аналізуючи зазначене, можна твердити, що вирішення задачі оптимізації структурно-функціональної схеми процесу перевезень потребує розробки математичного забезпечення з побудовою економіко-математичної моделі і проведенням оцінки показників надійності транспортних систем. Зменшення кількості структурних елементів транспортної системи можна досягти включенням в структуру процесу перевезень учасників з більш широкою зоною відповідальності.

Більш достовірна оцінка надійності, що передбачає деталізацію процесу перевезення по ділянках, вимагає використання кількісних критеріїв. Розроблений алгоритм застосування підходу підвищення надійності транспортних систем при оптимізації кількості їх структурних елементів приведена на рис. 3.

Розроблений алгоритм свідчить, що транспортна робота проводиться в три етапи. Перший етап містить ітерації по отриманню автоперевізником замовлення на перевезення та формування транспортно-технологічної схеми процесу перевезень, а також аналізу ринку транспортних послуг на відбір учасників процесу перевезень на умовах аутсорсинга.

Блок вибору передує перехід до аналізу ринку транспортних послуг, що визначає можливість реалізації силами автоперевізника структурної схеми процесу перевезень, сформованої у вигляді послідовності технологічних операцій.

Автоперевізнику при цьому необхідно мати в розпорядженні власні або арендовані технологічні потужності, парк рухомого складу та необхідну кількість виробничих ресурсів. Якщо у нього технологічних можливостей для реалізації процесу перевезень в повному об'ємі достатньо, то здійснюється перехід до другого етапу алгоритму.

У разі, коли автоперевізник здатний виконати власними силами лише частину технологічних операцій процесу перевезень, то необхідно провести аналіз ринку транспортних послуг і здійснити відбір необхідних посередників. Після вибору учасників процесу перевезень вантажів, необхідно приступити до розрахунків показників надійності.

Другий етап є обчислювальним, оскільки містить ітерації по розрахунку складових оптимізаційної моделі, а також безпосередньо оптимізацію кількості структурних елементів транспортної системи. Ітерації здійснюються послідовно, блоки вибору на цьому етапі відсутні. Основою оптимізації кількості структурних елементів є економіко-математичне моделювання приведених витрат на перевезення вантажів і пасажирів.

Моделювання приведених витрат здійснюється по будь-якій із знайдених на першому етапі комбінацій взаємодії учасників. Після цього проводиться вибір комбінації, що забезпечує мінімум приведених витрат на реалізацію транспортно-технологічної схеми. При перевезенні вантажів і пасажирів в повному об'ємі силами автоперевізника, слід проводити економіко-математичне моделювання приведених витрат для сформованої у вигляді послідовності технологічних операцій транспортно-технологічної схеми процесу перевезень. На третьому етапі алгоритму здійснюється перевірка результатів оптимізації на дотримання обмеження по перевищенню величини приведених витрат і розміру прибутку, одержуваного автоперевізником над ринковою вартістю аналогічної транспортної послуги. В рамках третього етапу також здійснюється перевірка можливостей підтримки автоперевізником задовільного рівня конкурентоспроможності з аспекту забезпечення надійності транспортної системи. Дані ітерації представлені у вигляді двох послідовних блоків вибору.

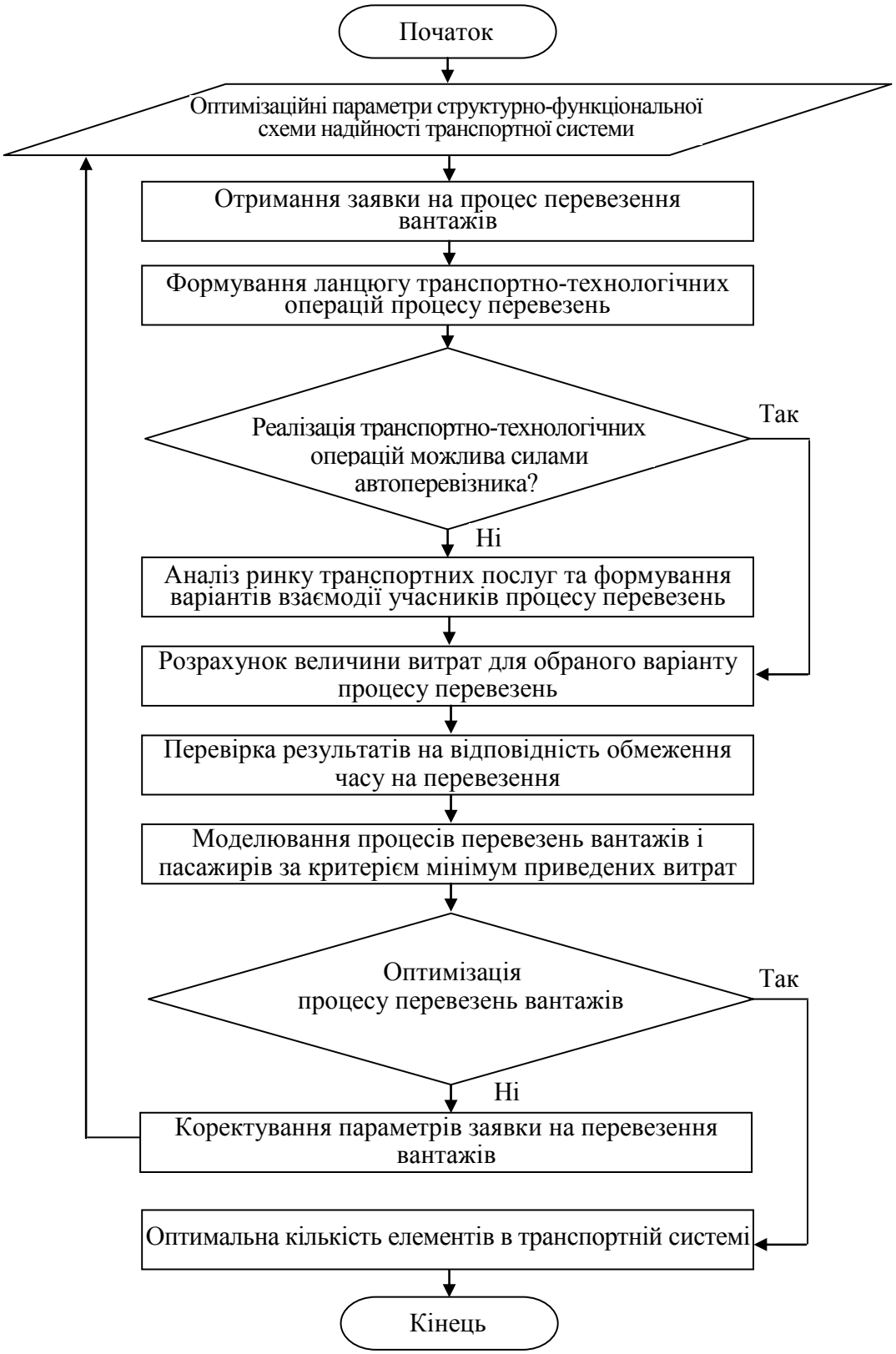


Рисунок 3 - Алгоритм оптимізації структурно-функціональної схеми транспортної системи
Джерело: розроблено авторами

Дотримання першого обмеження дозволяє перейти до перевірки рівня конкурентоспроможності автоперевізника. Зазначимо, що негативний результат

перевірки по першому і другому обмеженню, коли $З_{пр} + П < Ц_{ринк}$, а також $P < \beta$ свідчить про необхідність коректування параметрів заявки на перевезення, що надійшла на адресу автоперевізника.

Здійснення цієї ітерації можливо лише з відома замовника, і вимагає повторного проходження етапів у вказаній послідовності. Задоволення результатів оптимізації всім умовам, що перевіряються, означає що завдання остаточно вирішене.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Виявлена необхідність взаємодії автомобільного транспорту з іншими видами транспорту у складному технологічному процесі перевезення зерна підприємством АПВ на експорт. Запропоновано різні варіанти реалізації структурно-функціональної схеми процесу перевезення зерна. Проаналізовані їх елементи як технологічні операції. Дана оцінка ймовірності безвідмовної роботи при реалізації технологічного перевезення зерна на експорт від кількості структурних елементів і варіанту структурно-функціональної схеми, що в подальшому буде використано при розробці економіко-математичної моделі оцінки показників надійності транспортних систем.

Список літератури

1. Аулін В.В., Голуб Д.В., Гупка А.Б. Логістичний підхід в дослідженні процесів вантажних перевезень у фермерських господарствах агропромислового комплексу України . Київ: Вісник інж. академії України.2016. С. 61-66.
2. Аулін В.В., Голуб Д.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В. Методологічні і теоретичні основи забезпечення та підвищення надійності функціонування автомобільних транспортних систем: монографія / під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. Кропивницький: Видавництво ТОВ "КОД". 2017. 370 с.
3. Сханова С.Э. Проблемы развития теории надежности цепей поставок. *Логистика: современные тенденции развития:* материалы IX Междунам. науч.-практ. конф. 15, 16 апреля 2010 г. СПб.: СПбГИЭУ. 2010. С. 378-381.
4. Курганов В.М. Управление эффективностью и надежностью функционирования систем доставок. *Грузовое и пассажирское автомобильное хозяйство*. Москва. 2009. Вып. № 6. С. 8-13.
5. Сироткина А.В. Транспортный процесс как интегральный критерий оценки качества АТС в эксплуатации. *Автотранспортное предприятие*. 2009. Вып. №3. С. 51-58.
6. Бычков Д.В. Системный подход к организации транспортного обслуживания промышленного предприятия. *Вопросы современной науки и практики*. Университет им. В.И. Вернадского. 2010. Вып. 4-6. С. 218-224.
7. Некрасов А.Г., Миротин Л.Б., Меланич Е.В. Управление цепями поставок в транспортном комплексе. Москва: Гор. линия – Телеком. 2012. 262 с.
8. Босняк М.Г. Вантажні автомобільні перевезення: навчальний посібник. Київ: Слово. 2010. 408 с.
9. Кириллова А.Г. Мультимодальные контейнерные и контрейлерные перевозки: монография. Москва: ВИНИТИ РАН. 2011. 260 с.
10. Курганов В.М. Управление эффективностью и надежностью функционирования систем доставок. *Грузовое и пассажирское автомобильное хозяйство.* 2009. Вып. № 6. С. 8-13.

References

1. Aulin, V.V., Golub, D.V. & Gupka, A.B. (2016). *Logistichnij pidhid v doslidzhenni procesiv vantazhnih perevezen u fermerskih gospodarstvah agropromislovogo kompleksu Ukrayini [Logistic approach in the study of freight transport processes in farms of the agro-industrial complex of Ukraine].* Kiyiv: Visnik inzh. akademiyi Ukrayini [in Ukrainian].
2. Aulin, V.V., Golub, D.V., Grinkiv, A.V. & Lisenko, S.V. (2017). *Metodologichni i teoretichni osnovi zabezpechennya ta pidvishennya nadijnosti funkcionuvannya avtomobilnih transportnih system [Methodological and theoretical bases of maintenance and increase of reliability of functioning of automobile transport systems]*. V.V. Aulin (Ed.). Kropivnickij: Vidavnictvo TOV "KOD" [in Ukrainian].
3. Shanova, S.E. (2010). Problemy razvitiya teorii nadezhnosti cepej postavok [Problems of development of the theory of reliability of supply chains]. Logistics: current development trends: *IX Mezhdunam. nauch.-*

prakt. konf. 15, 16 aprelya 2010 hoda – IX International Scientific and Practical Conference. (pp. 378-381). SPb.: SPbGIEU [in Russian].
4. Kurganov, V.M. (2009). Upravlenie effektivnostyu i nadezhnostyu funkcionirovaniya sistem dostavok [Performance management and reliability of delivery systems]. *Gruzovoe i passazhirskoe avtomobilnoe hozyajstvo – Freight and passenger motor vehicles*. *Vol.6,* 8-13. [in Russian].
5. Sirotkina A.V. (2009). Transportnyj process kak integralnyj kriterij ocenki kachestva ATS v ekspluatacii [Transport process as an integral criterion for assessing the quality of PBX in operation]. *Avtotransportnoe predpriyatie – Motor transport company*, *Vol.3,* 51-58 [in Russian].
6. Bychkov, D.V. (2010). Sistemnyj podhod k organizacii transportnogo obsluzhivaniya promyshlennogo predpriyatiya [System approach to the organization of transport services of an industrial enterprise]. *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki –Questions of modern science and practice*, *Vol. 4-6,* 218-224 [in Russian].
7. Nekrasov, A.G., Mirotin, L.B. & Melanich, E.V. (2012). *Upravlenie cepyami postavok v transportnom komplekse [Supply Chain Management in the transport complex]*. Moskva: Gor. linija – Telekom [in Russian].
8. Bosnyak, M.G. (2010). *Vantazhni avtomobilni perevezennya [Freight traffic]*. Kyiv: Slovo [in Ukrainian].
9. Kirillova, A.G. (2011). *Multimodalnye kontejnernye i kontrejlernye perevozki: monografiya [Multimodal container and piggyback transportation]*. Moskva: VINITI RAN [in Russian].
10. Kurganov, V.M. (2009). Upravlenie effektivnostyu i nadezhnostyu funkcionirovaniya sistem dostavok [Performance management and reliability of delivery systems]. *Gruzovoe i passazhirskoe avtomobilnoe hozyajstvo – Freight and passenger car economy*, *Vol.6,* 8-13 [in Russian].

Viktor Aulin, Prof., DSc., **Dmytro Holub,** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Denys Velykodniy,** PhD tech. sci., applicant, **Viktoria Dyachenko,** post-graduate
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

The Solution of the Problem of Reliability of Technological Processes of Cargo Transportation by Enterprises of Agroindustrial Production

The interaction of road transport with other modes of transport in the complex transport system of transportation of grain for export is revealed. Different variants of realization of structural-functional scheme of grain transportation process are constructed, their elements are analyzed in the form of technological operations. The estimation of the probability of failure-free operation from the number of structural elements of the structural-functional scheme of the reliability of the transport system is given. It is shown that the direct transport scheme of transportations is more reliable than the transport-warehouse scheme.

It was revealed that the presence of auxiliary or providing technological operations significantly increases the number of structural elements of the transport system reliability scheme. The condition of maintenance and increase of reliability typical for the transport system of transportation of cargoes and passengers is formulated and participation of participants of processes of transportations under conditions of outsourcing is clarified. Different combinations of participants of the transportation process are considered and the procedure for determining their number is developed.

It is shown that the structuring of the process of transportation of cargoes and passengers in the form of a sequence of interaction of its participants, and not as a sequence of technological operations, allows us to solve the problem of reducing the number of structural elements of the functional and structural scheme of the reliability of transport systems.

The analysis of the criteria for the selection of participants in the transport process and their grouping according to the timeliness of the provision of transportation orders, the attractiveness of commercial terms of interaction, the range of transport services, and the reliability of interaction with subcontractors are determined. The concept of criteria for establishing organizational relationships between the participants in the transportation process, which are ordered by contractual relations, is clarified.

The scheme of the relationship of the type of contractual relations with the level of reliability of transport systems is presented. It is shown that a reliable assessment of reliability involves detailing the process of transportation in sections, requiring the use of quantitative criteria. The algorithm of optimization of the structural-functional scheme of reliability of the transport system is constructed, in which the sequence of application of the approach of providing and increasing reliability by optimizing the number of structural elements is presented.

agroindustrial production, technological process, transportation, reliability, providing, structural element

Одержано (Received) 23.05.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 27.05.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

УДК 629.113 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).46-58

О.В. Бевз, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: oleg_bevz@ukr.net
Ш.Р. Алієв, доц., канд. техн. наук, **Г.Н. Алієва,** ст. вик.
Азербайджанський технологічний університет (UTECA), м. Баку, Азербайджан
e-mail: a-yashar@rambler.ru

Результати тестування гальмівного механізму автомобіля Ford Focus III

Стаття присвячена дослідженню пари тертя – «гальмівний диск – гальмівна колодка». На основі результатів проведених досліджень оцінювали ефективність роботи гальмівних колодок в різних умовах експлуатації. Дослідження проводилися на спеціальному стенді з використанням натурального гальмівного вузла автомобіля Ford Focus III.
гальмівні колодки, гальмівний диск, температура, питоме спрацювання

О.В. Бевз, доц., канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий Украина
Ш.Р. Алиев, доц., канд. техн. наук, **Г.Н. Алиева,** ст. препод.
Азербайджанский технологический университет (UTECA), г. Баку, Азербайджан

Исследование надежности тормозного механизма автомобиля Ford Focus III

Статья посвящена исследованию пары трения - «тормозной диск - тормозная колодка». В данной работе приведены результаты исследований эффективности работы пары трения в лабораторных условиях. На основе результатов проведенных исследований работы пары трения с учетом разных условий работы после окончания всех исследований проводилась оценка абсолютного и удельного износа колодок. Исследования проводились на специальном стенде с использованием натурального тормозного узла автомобиля Ford Focus III.
тормозные колодки, тормозной диск, температура, удельный износ

Постановка проблеми. Стан безпеки дорожнього руху в Україні продовжує залишатися серйозною соціально-економічною проблемою. Безпека на дорогах є однією із значних проблем сучасного світу і питання убезпечення дорожнього руху є вкрай актуальним як на національному рівні, так і на глобальному.

З кожним роком збільшується ущільнення транспортних потоків та експлуатаційної швидкості і підвищуються вимоги до гальмівної системи автотранспортного засобу. Гальмівні властивості автотранспортного засобу відносяться до найважливіших з експлуатаційних властивостей, що визначають безпеку руху автомобіля, тому їх регламентація є предметом ряду міжнародних документів. Гальмівні властивості регламентуються Правилами №13 Комітету з внутрішнього транспорту Європейської Економічної Комісії Організації об'єднаних націй (ЄЕК ООН).

Конструкція і технічний стан гальмівної системи автотранспортного засобу (АТЗ) роблять вплив на його активну безпеку. Параметри ефективності гальмування автомобіля, а також надійність роботи гальмівної системи визначають результат можливої аварійної ситуації і дозволяють водієві запобігти дорожньо-транспортній події (ДТП).

© О.В. Бевз, Ш.Р. Алієв, Г.Н. Алієва, 2019

Останнім часом змінилися показники оцінки гальмівних властивостей автомобілів, нормативні значення їх тепер стали жорсткішими. В свою чергу ефективність гальмування визначається як конструктивними особливостями, так і експлуатаційними характеристиками вузлів і механізмів гальмівної системи [1].

Колодки і гальмівна система при роботі нагріваються, і ефективність їх міняється. Так, пересування по гірських серпантинах не дає колодкам охолонути, через що їх характеристики починають сильно мінятися.

Багато що залежить від того, що виробники колодок заклали у свою продукцію. Чи буде їх ефективність падати або рости від зміни параметрів руху, тиску в системі, швидкості і температури. Як колодки поведуться в режимі гірського серпантину, і як зміняться їх характеристики після цього. Усе це являється предметом даного дослідження.

Аналіз основних досліджень і публікацій. За останні роки вийшло багато публікацій [2–3] за результатами досліджень і розробок щодо підвищення ефективності гальмування автомобілів. Однак ці публікації містять більше рекомендації загального характеру. Визначення експлуатаційних показників здійснюється, як правило, експериментально.

При роботі гальмівного вузла одним з основних явищ, які супроводжують фрикційні взаємодії в гальмах, є нагрів пар тертя. Пара тертя - «гальмівний диск – гальмівна колодка» поглинає механічну енергію та перетворює її в тепло, яке дальше негативно впливає на гальмівний механізм. Температура, що розвивається на поверхні тертя, є комплексною характеристикою енергонавантаженості гальма, яка в свою чергу призводить до спрацювання пари тертя.

У той же час вітчизняний і зарубіжний досвід показує, що гальмівна система (ГС) автомобіля є найважливішим елементом його активної безпеки. Від того, наскільки точно будуть забезпечені нормативні експлуатаційні характеристики гальмівної системи та якість деталей пари тертя будуть залежати життя людей і цілісність самих транспортних засобів.

Постановка завдання. Метою даної роботи є тестування експлуатаційних властивостей гальмівного механізму автомобіля Ford Focus III.

Виклад основного матеріалу. Основною метою досліджень виступає проведення тесту гальмівних колодок різних виробників на стенді.

Програма тестування колодок ґрунтується на Правилах № 90 (ЕСЕ ООН) [4] і включає перевірку:

1. Ефективність гальмування в залежності від [6]:

- привідного зусилля і тиску в гальмівному циліндрі при заданій початковій швидкості гальмування;
- початкової швидкості гальмування при заданій величині тиску в гальмівному циліндрі;
- температури гальмівних колодок.

2. Зносостійкість гальмівних колодок.

3. Вплив колодок на спрацювання гальмівного диска.

4. Міцність кріплення накладки до основи колодки.

Процес випробувань проходив на стендовому обладнанні у декілька етапів.

Припрацювання. Диск розігрівався до температури 100 °С і розкручувався до швидкості, що відповідає швидкості автомобіля 100 км/год. Потім із зусиллям 5,0 МПа на «гальмівній педалі» диск зупиняли. Експеримент продовжували поки поверхня накладки не прилягала до диска на 90 % своєї площі. Після цього замірялася товщина диска і товщина колодки.

Визначення спрацювання колодок. Гальмівний диск нагрівався до температури 100 °С і загальмовувався з швидкості 100 км/год до повної зупинки з різним гальмівним зусиллям - від 2,0 до 8,0 МПа з кроком 2,0 МПа.

Гальмівний диск нагрівався до 100 °С і загальмовувався до повної зупинки з постійним гальмівним зусиллям в 5,0 МПа з різних початкових швидкостей - від 40 до 140 км/год з кроком 20 км/год.

Гальмівний диск загальмовувався до повної зупинки з 100 км/год з постійним гальмівним зусиллям в 5,0 МПа при різній температурі - від 50 до 350 °С з кроком 50°С. Після цих трьох тестів замірялася товщина колодки.

Гірський серпантин. Імітувався затяжний спуск (FADE): гальмівний диск загальмовувався зі швидкості 100 км/год до 50 км/год з постійним тиском в гальмівній системі в 5,0 МПа упродовж 45 секунд – так 25 разів підряд.

Після природного охолодження «затяжний спуск» повторювався. Після двох циклів гірського серпантину замірялася товщина колодок.

Визначення спрацювання колодок. Повторення випробувань другого етапу для оцінки того, як змінилися характеристики колодок після гірського серпантину. Після чого знову замірялася товщина колодок. У кінці випробування замірялася товщина гальмівного диска для перевірки його спрацювання.

П’ятий етап. Перевірка міцності клейового з’єднання накладки з основою. Тест відбувався на парі колодок, яку не використали на попередніх етапах випробовування. В даному випробуванні визначалися ті зусилля, при яких відбувався відрив фрикційного матеріалу від каркаса колодок (за нормативами ECE R90 (Правила № 90 ЄЕК ООН (Європейська Економічна Комісія ООН)) ця величина повинна складати не менше - 5 МПа) [5]. Температура накладки вимірювалася за допомогою термопари, в об’ємі на відстані 2 мм від каркаса колодки. Відповідно в парі тертя температура вище приблизно на 200 °С.

Для дослідження були вибрані колодки для автомобіля Ford Focus III. Колодки були придбані в магазинах автозапчастин роздрібної торгівельної мережі м. Кропивницького по два комплекти від кожного виробника.

Дослідження проводилися в спеціалізованій лабораторії на устаткуванні, що має сертифікат Держстандарту України. При випробуваннях були задіяні два випробувальні стенди.

Перший стенд є натуральним гальмівним вузлом (рис. 1), що складається з гальмівного супорта, гальмівного диска і двох колодок автомобіля Ford Focus III, маховика із змінним моментом інерції (в даному випадку момент інерції відповідав моменту інерції автомобіля Ford Focus III), електроприводу і контрольно-вимірювальної апаратури. На цьому стенді безпосередньо перевірялася ефективність колодок в різних режимах гальмування [6].

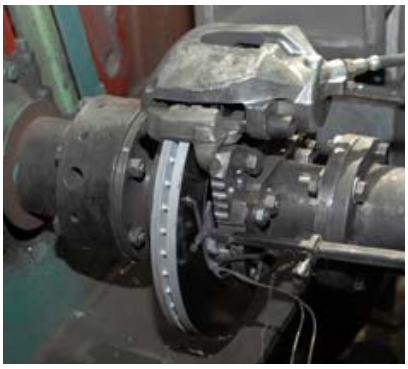


Рисунок 1 – Гальмівний вузол автомобіля Ford Focus III

Джерело розроблено авторами

На другому стенді визначалася межа міцності з'єднання гальмівної накладки з каркасом.

В якості «контр-тіла» для всіх гальмівних колодок були обрані оригінальні гальмівні диски фірми Ford (1520297) - саме такими дисками оснащуються автомобілі Ford Focus III заводом-виробником.

Дослідженню піддавалися гальмівні колодки наступних виробників: фірм BOSCH, FERODO, BREMBO, TRW та фірми ZIMMERMANN.

1. Колодки передні BOSCH 0 986 424 794.

Після випробовування колодки BOSCH показали результат трохи нижче середнього по тестовій групі. При першому тесті на залежність коефіцієнта тертя від тиску в гальмівній системі виявилось, що коефіцієнт тертя падає у міру зростання тиску майже лінійно. Починаючи зі значення коефіцієнта тертя при низькому тиску в 0,49, він опускається до 0,39 практично лінійно. Зміна по ефективності склала -21 %.

Після проведення двох циклів випробувань гірським серпантином картина лінійного падіння ефективності із зростанням тиску не змінилася, але зміна зменшилася і склала при повторному циклі випробувань падіння -14 %.

Дослідження залежності коефіцієнта тертя передніх колодок BOSCH від швидкості гальмування показало, що вони найбільш ефективні при низьких швидкостях. Максимум коефіцієнта тертя зафіксований в 0,47 на швидкості в 40 км/год, далі ефективність знижується на 7 %. А ось при гальмуванні після 70 км/год характеристики колодки стабілізуються, і коефіцієнт тертя практично не змінюється до кінця тесту.

Після випробувань гірським серпантином динаміка повністю міняється. В експерименті спостерігається зростання ефективності гальмування з підвищенням швидкості. При цьому колодки показують хороший результат тесту, а на проміжку швидкостей в 100-110 км/год стають найефективнішими.

Дослідження залежності ефективності гальмування колодок BOSCH від температури пари тертя показав одну з найнижчих ефективностей колодок на холодну. При температурі в 50 °С коефіцієнт тертя складає 0,35, що майже на 35 % нижче, ніж у лідера тесту. З зростанням температури ефективність гальмування колодок BOSCH росте, досягаючи максимуму при 200 °С, і потім залишається практично без змін. При цьому треба відмітити, що до кінця випробувань при нагріві до 350 °С колодки BOSCH виявилися одними з найефективніших, показавши другий результат по групі.

Після двох циклів нагріву в режимі гірського серпантину залежність коефіцієнта тертя від температури колодок BOSCH змінилася. По-перше, коефіцієнт тертя на холодну трохи збільшився - з 0,35 до 0,38. За рахунок того, що у інших учасників тесту ефективність холодного гальмування впала, колодки BOSCH вийшли з аутсайдерів по цьому параметру, ставши твердими середнячками. Із зростанням температури їх ефективність підвищується на 34 %, досягаючи максимуму при 200-250 °С. На жаль, після 300 °С відзначився швидкий спад ефективності майже на 10 %.

На початку випробування гірським серпантином колодки BOSCH показували один з найнижчих результатів в групі зі значенням коефіцієнта тертя всього в 0,31. З збільшенням циклів гальмування спостерігалося зростання ефективності, яка при температурі пари тертя 170 °С досягла максимуму, підвищивши своє значення на 70 %.

Загальна динаміка поведінки колодок BOSCH в другому циклі тесту FADE виявилася схожою до першого циклу. Під час дослідження спостерігалося зростання ефективності при нагріві з подальшим зниженням коефіцієнта тертя при зростанні кількості гальмувань. Аналізуючи дані випробовувань можна відмітити досить рівну ділянку кривої коефіцієнта тертя з п’ятого по одинадцятий цикл гальмування, але при

зростанні циклів гальмування падіння ефективності в другий раз було сильніше, ніж в перший, і досягло 24 %, при цьому на останньому циклі коефіцієнт тертя колодок BOSCH виявився одним з найнижчих в тесті.

2. Колодки передні FERODO FDB 4319.

Передні колодки FERODO на протязі всього тесту були кращими по ефективності гальмування.

Перше випробування колодки FERODO почали з останньої позиції при мінімальному тиску, показавши значення коефіцієнта тертя 0,48. Але динаміка у цих колодок була зовсім іншою, ніж у інших учасників. Тоді як у інших колодок із зростанням тиску в гальмівній системі ефективність гальмування падала, у FERODO вона росла, досягнувши максимуму при 6,0 МПа до 0,52. Але далі ситуація змінилася, і до закінчення тесту коефіцієнт тертя почав знижуватися. При цьому колодки FERODO при максимальному тиску стали лідером тесту.

Після двох циклів випробувань гірським серпантином динаміка залежності коефіцієнта тертя від тиску змінилася на зворотну і тепер відмічене початкове незначне падіння ефективності з подальшим зростанням при збільшенні тиску в гальмівній системі. Розпочали випробування колодки FERODO з середнього результату по групі 0,48, а закінчили з кращим - 0,52.

Дослідження залежності коефіцієнта тертя передніх колодок FERODO від швидкості гальмування показало найкращий результат. У них був кращий результат при мінімальній і максимальній швидкостях. Падіння ефективності склало усього 9 %.

Після випробувань гірським серпантином колодки FERODO показали падіння ефективності на невеликій швидкості на 15 %, початковий коефіцієнт тертя дорівнював 0,51, але все одно це був один з кращих показників в групі. Із зростанням швидкості йде трохи падіння ефективності, яке досягає мінімуму при 70 км/год, але далі ефективність гальмування знову зростає, і вже на 120 км/год колодки FERODO показують найкращі результати.

Дослідження залежності ефективності гальмування колодок FERODO від температури пари тертя показало найвищу ефективність гальмування в цьому діапазоні температур. Максимальний коефіцієнт тертя 0,58 досягається при температурі колодок 130-150 °С. Із зростанням температури відбувається падіння ефективності на 20,7 % - до 0,46.

Після двох циклів нагріву в режимі гірського серпантину залежність коефіцієнта тертя від температури колодок FERODO змінилася в кращу сторону. По-перше, вони зберегли лідерство по ефективності. По-друге, крива залежності стала пологішою. А по-третє, в діапазоні температур від 50 до 250 °С зафіксовано зростання ефективності гальмування, причому на істотні 27 %. Якщо на холодну коефіцієнт тертя дорівнює 0,43, то в максимумі він досягає 0,59. А ось зниження ефективності при подальшому зростанні температури є незначним - усього 5 %.

На початку тесту гірським серпантином колодки FERODO показали себе в групі лідерів. Значення коефіцієнта тертя росло із зростанням кількості циклів гальмування і досягло максимуму 0,58 на сьомому циклі при температурі 240 °С. При цьому вже з шостого циклу колодки FERODO показали кращий результат тесту по ефективності і зберігали ці результати до 14 циклу. До закінчення першого циклу випробувань FADE ефективність гальмування впала на 20 % з максимальних значень, але при цьому на максимальній температурі передні колодки FERODO показали другий результат в тесті.

Другий цикл гірського серпантину FERODO розпочали з середніх значень коефіцієнта тертя 0,37, але із зростанням циклів гальмування і температури ефективність підвищилася на 34 %, досягнувши максимуму на восьмому циклі. З цієї

позиції колодки FERODO показують найкращі результати тесту. Треба відмітити, що якщо в першому циклі випробувань ефективність гальмування із зростанням циклів знизилася на 20 %, то в другому всього на 9 %.

3. Колодки передні BREMBO P 24 061.

В цілому колодки BREMBO показали добрий результат у багатьох тестах, займаючи позиції вище середнього по тестовій групі.

При першій перевірці на залежність коефіцієнта тертя від тиску в гальмівній системі виявилось, що він падає у міру зростання тиску майже лінійно. При низькому тиску в гальмівній системі колодки BREMBO показали кращий коефіцієнт тертя - 0,61, що на 26 % більше ніж у колодок FERODO, які в подальшому показали найкращий результат. При зростанні тиску в системі ефективність знижувалася і при максимальному тиску гальмівної рідини 8,0 МПа коефіцієнт тертя знизився на 29,5 % до значення 0,43.

Після проведення двох циклів випробувань гірським серпантином коефіцієнт тертя трохи зменшився, але практично перестав залежати від тиску, знаходячись в межах 0,5 - 0,47 в усьому робочому діапазоні.

Дослідження залежності коефіцієнта тертя передніх колодок BREMBO від швидкості гальмування показало, що вони добре працюють в усьому діапазоні швидкостей. Зміни значення склали близько 12 %, а максимум ефективності досягався при гальмуванні на швидкості 60 км/год. Максимальне значення коефіцієнта тертя склало 0,52 - це другий результат в групі.

Після сильного нагріву колодок (два цикли FADE) почала вимальовуватися їх стабільність. Розрив між максимальним і мінімальним значенням зменшився до 10 %, на проміжку швидкості від 60 до 120 км/год значення коефіцієнта тертя залишалося незмінним - 0,45. Стабільність в робочому діапазоні швидкостей, це одна з головних переваг колодок BREMBO.

При дослідженні залежності ефективності гальмування колодок BREMBO від температури пари тертя з’ясувалося, що у них одне з кращих значень коефіцієнта тертя на холодну - 0,46. Найбільша ефективність гальмування досягається при температурі 100-120 °С - 0,49, далі йде спад ефективності на 20 %.

Після двох циклів нагріву в режимі гірського серпантину залежність коефіцієнта тертя від температури колодок BREMBO підвищилась. По ефективності гальмування колодки мали кращий результат на холодну і показали високу стабільність в нагрітому стані.

На початку тесту гірським серпантином колодки BREMBO показували середній результат по групі зі значенням коефіцієнта тертя всього 0,37. При збільшенні циклів гальмування спостерігалося зростання ефективності до 4 циклу. Зміна складає майже 26 % - це один з найнижчих показників в тесті. Із зростанням кількості циклів гальмування ефективність падає з 0,51 до 0,42 у кінці випробування, зміна ефективності склала 17,6 %.

Другий цикл гірського серпантину у BREMBO розпочався зі значення коефіцієнта тертя 0,35, і за п'ять циклів гальмування він підвищився на 35 % - до 0,54, при цьому температура колодок дорівнювала 170 °С. Далі, із зростанням кількості циклів гальмування і температури, ефективність знижується. У проміжку від 250 до 380 °С коефіцієнт тертя міняється трохи і залишається практично стабільним в районі 0,48-0,46. При подальшому зростанні температури вище 380 °С ефективність падає, і на 25 циклі опускається до 0,41. Це четвертий результат в тесті.

4. Колодки передні TRW GDB 1583.

На випробуванні залежності ефективності гальмування від тиску в гальмівній системі колодки TRW показали середній результат. Максимальне значення коефіцієнта тертя було при мінімальному тиску - 0,53. Із зростанням тиску йшло практично лінійне падіння до 0,46.

Після двох циклів випробувань гірським серпантином динаміка залежності коефіцієнта тертя TRW від тиску змінилася. Замість падіння ефективності гальмування спостерігалося лінійне зростання від 0,39 при низькому тиску до 0,49 при високому.

Перевірка залежності коефіцієнта тертя передніх колодок TRW від швидкості гальмування знову ж таки показала середній результат. Коефіцієнт тертя 0,49 залишається стабільним на швидкостях від 40 до 80 км/год, далі він трохи знижується і перебуває в межах 0,46-0,47 до закінчення тесту.

Після випробувань гірським серпантином поведінка колодок TRW змінилася. Ефективність гальмування стала збільшуватися із зростанням швидкості. Початкові значення коефіцієнта тертя були 0,47, далі йшло плавне зростання до значення 0,52 до закінчення тесту.

Дослідження температурної залежності коефіцієнта тертя колодок TRW показує, що максимум ефективності припадає на температуру пари тертя 150-170 °С і складає 0,52. Це другий результат в тесті. Із зростанням температури ефективність гальмування падає, причому падіння значніше, ніж зростання при нагріві, але все одно значення коефіцієнта тертя колодок TRW залишається середнім в групі.

Після двох циклів FADE результати практично не змінилися. Ефективність на холодну склала 0,38. Максимум ефективності 0,52 трохи змістився у більше високотемпературну область. З збільшенням температури ефективність швидко починає падати до 0,45.

Тестування в режимі гірського серпантину колодки TRW показали середні значення в групі - 0,37. Із зростанням числа циклів гальмування відбувалося зростання ефективності, максимум якого припав на коефіцієнт тертя 0,52. Температура колодок при цьому була 170 °С. Далі значення коефіцієнта тертя почало швидко падати, і до кінця тесту FADE колодки показали один з найнижчих результатів в групі.

На другому циклі гірського серпантину колодки TRW змінили залежність коефіцієнта тертя від циклів гальмування. Якщо при відносно низькій температурі пар тертя їх поведінка залишилася практично незмінною, то при підвищенні температури зниження ефективності гальмування відбувалося при 300 °С на значенні 0,45 потім виявилося незначне зростання. В цілому ж тест закінчився краще, ніж перший, оскільки при величині коефіцієнта тертя 0,43 колодок виявилися середніми в групі.

5. Колодки передні ZIMMERMANN 23723.180.1.

Випробування на залежність ефективності гальмування від тиску в гальмівній системі колодки ZIMMERMANN почали з значення 0,54. При зростанні тиску до 4,0 МПа ефективність зменшилася до 0,48 і далі стабілізувалося до 6,0 МПа, після чого відмічено ще невелике зниження до 0,46. До кінця тесту ці колодки показали другий результат в групі по ефективності.

Після двох циклів випробувань гірським серпантином динаміка залежності коефіцієнта тертя ZIMMERMANN практично не змінилася, але при цьому їх показники були високими в групі. Коефіцієнт тертя при низькому тиску дорівнював 0,58. Із зростанням тиску йшло зниження ефективності до 0,52, але це все одно кращий результат в тесті.

Дослідження залежності коефіцієнта тертя передніх колодок ZIMMERMANN від швидкості гальмування показало найкращий результат в групі незважаючи на зниження

ефективності гальмування із зростанням швидкості. Зниження відбувається лінійно зі значення в 0,52 до 0,46 (падіння на 12 %).

Після випробувань гірським серпантином поведінка колодок ZIMMERMANN не змінилася, а ефективність гальмування знижується із зростанням швидкості, але швидше, ніж в першому тесті з 0,58 до 0,48 (падіння майже на 17 %).

Дослідження залежності коефіцієнта тертя колодок ZIMMERMANN від температури показує невелике зростання цього коефіцієнта з 0,49 до 0,5 при підвищенні температури до 100 °С. Далі йде зниження ефективності до 0,43 з невеликою стабілізацією в інтервалі 200-280 °С на значенні 0,46.

Після двох циклів FADE результати тестів покращилися. При низьких температурах показник тесту стає кращим в групі при значенні 0,47, далі спостерігається максимум ефективності 0,51 при 110 °С. Із зростанням температури відбувається невелике падіння до 0,48 і стабілізація в діапазоні 0,48-0,49.

Тестування в режимі гірського серпантину колодки ZIMMERMANN показали найвищий коефіцієнт тертя від температури, максимум якого 0,57 досягається вже після третього циклу гальмування. Надалі колодки стають одними з найкращих в тесті. При температурі 280 °С ефективності гальмування стабілізується в районі 0,51-0,52. Ця стабільна поведінка навіть з невеликим зростанням дозволила колодками ZIMMERMANN після 16 циклу гальмування показати одні з найкращих в тесті і закінчити його невеликим зростанням до 0,53.

Показники другого циклу гірського серпантину у колодок ZIMMERMANN трохи змінилися. Як і в попередніх випробуваннях було продемонстровано найшвидше зростання ефективності гальмування при розігріванні колодок, яке почалося з 0,44 на холодну з максимумом 0,59 при температурі 160-170 °С. Це кращий результат тесту. Далі ми спостерігаємо спад до 0,52 а потім настає стабілізація в діапазоні 0,51-0,49 з невеликим зниженням коефіцієнта тертя із зростанням температури. Така стабільність дозволила колодкам залишатися в лідерах тесту після 9 циклу гальмування.

Після закінчення всіх досліджень проводилася оцінка абсолютного і питомого спрацювання накладок колодок і диска. Результати дослідження наведені в табл.1.

За даними досліджень було побудовано порівнювальні графіки дослідження ефективних показників гальмівних колодок різних виробників на стенді, які зображені на (рис. 2 – рис. 9).

Таблиця 1 – Результати тестування передніх гальмівних колодок для автомобіля Ford Focus III

№ п/п	Колодки	Спрацювання колодок Δ, мм				Спрацювання диска, δ, мм.	Міцність з'єднання накладки з основою колодки, МПа	Вартість колодок, грн.
		до FADE	на FADE	після FADE	загальне			
1	BOSCH	0,05	0,19	0,07	0,31	0,006	6,6...7,3	981,00
2	FERODO	0,11	0,38	0,16	0,65	0,004	6,0...6,4	1037,00
3	BREMBO	0,07	0,21	0,11	0,39	0,011	5,0...6,4	751,00
4	TRW GDB	0,08	0,16	0,1	0,34	0,006	6,3...6,5	940,00
5	ZIMMERMANN	0,05	0,17	0,1	0,32	0,011	5,3...6,4	835,00

Джерело: розроблене авторами

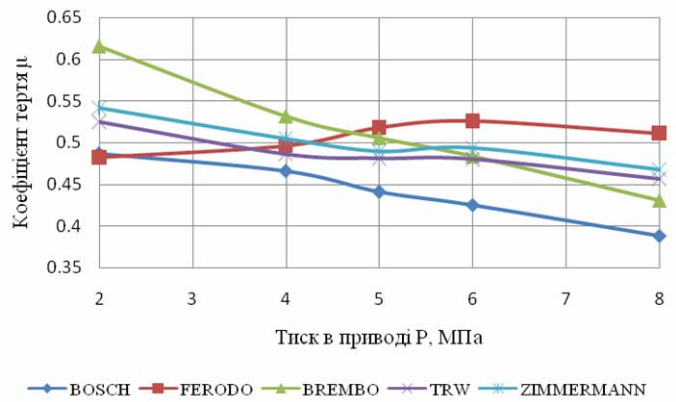


Рисунок 2 - Графік залежності усередненого коефіцієнта тертя передніх гальмівних колодок для автомобіля Ford Focus III від тиску в приводі гальмівної системи (до FADE)

Джерело: розроблене авторами

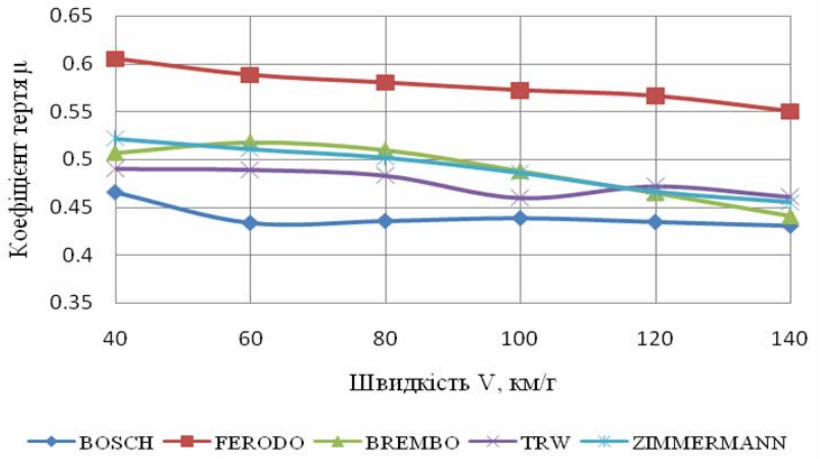


Рисунок 3 - Графік залежності усередненого коефіцієнта тертя передніх гальмівних колодок для автомобіля Ford Focus III від швидкості руху автомобіля (до FADE)

Джерел:о розроблене авторами

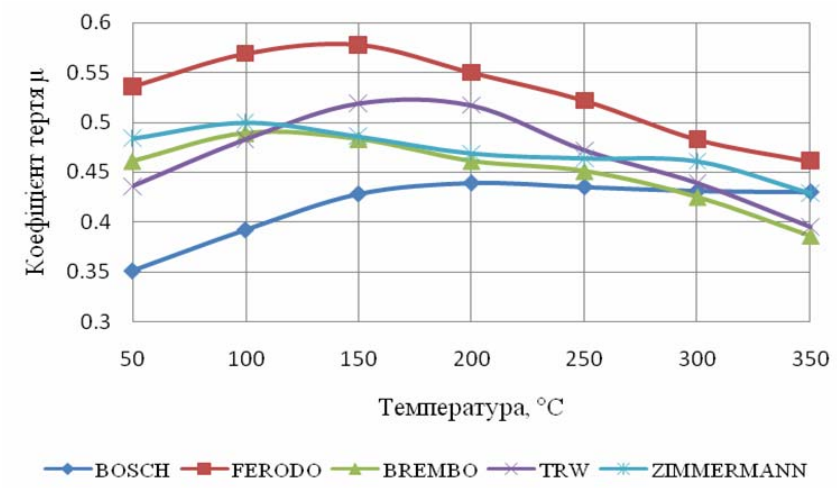


Рисунок 4 - Графік залежності усередненого коефіцієнта тертя передніх гальмівних колодок для автомобіля Ford Focus III від температури пари тертя (до FADE)

Джерело: розроблене авторами

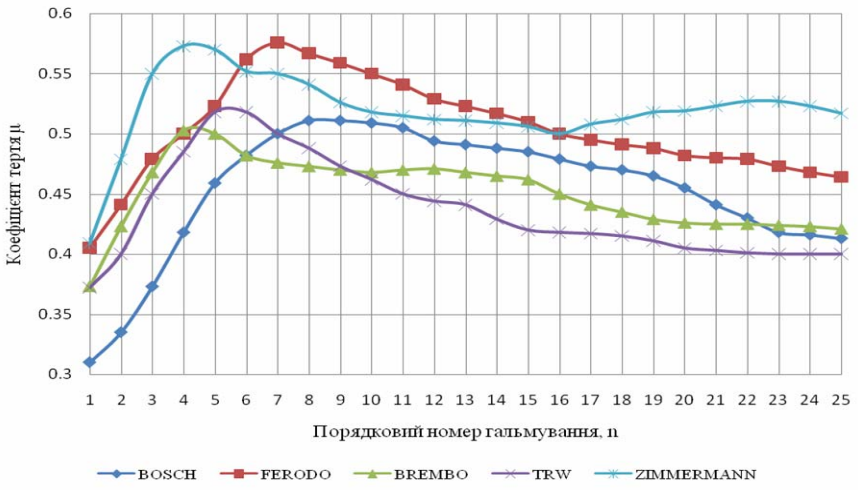


Рисунок 5 - Графік залежності усередненого коефіцієнта тертя передніх гальмівних колодок для автомобіля Ford Focus III від кількості гальмувань в тестовому випробуванні гірський серпантин (FADE, 1-й період) час циклу - 45 с; кількість циклів – 25

Джерело: розроблене авторами

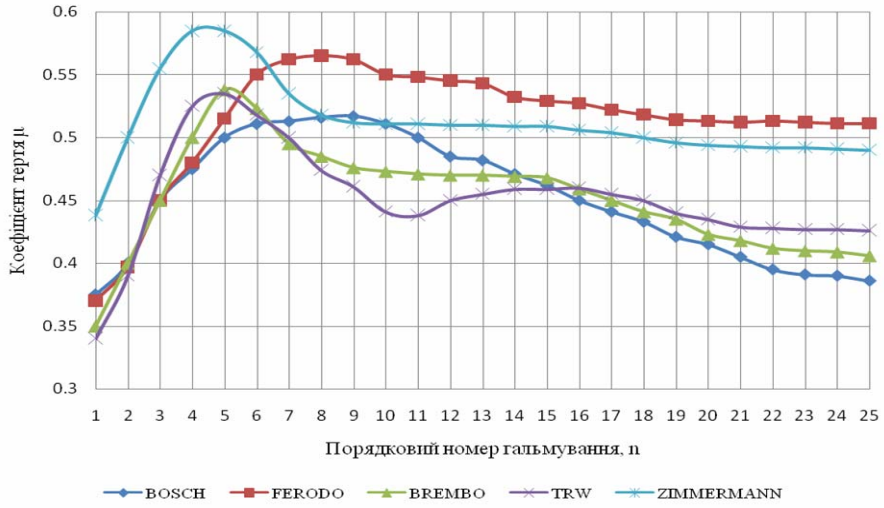


Рисунок 6 - Графік залежності усередненого коефіцієнта тертя передніх гальмівних колодок для автомобіля Ford Focus III від кількості гальмувань в тестовому випробуванні гірський серпантин (FADE, 2-й період) час циклу - 45 с; кількість циклів - 25

Джерело: розроблене авторами

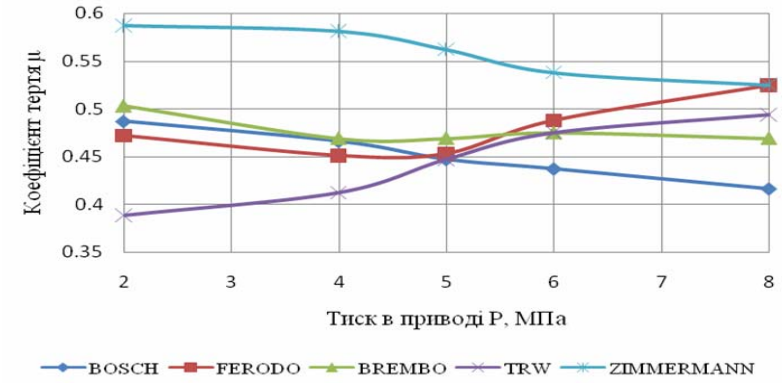


Рисунок 7 - Графік залежності усередненого коефіцієнта тертя передніх гальмівних колодок для автомобіля Ford Focus III від тиску в приводі гальмівної системи, після двох циклів гірського серпантину (після FADE)

Джерело: розроблене авторами

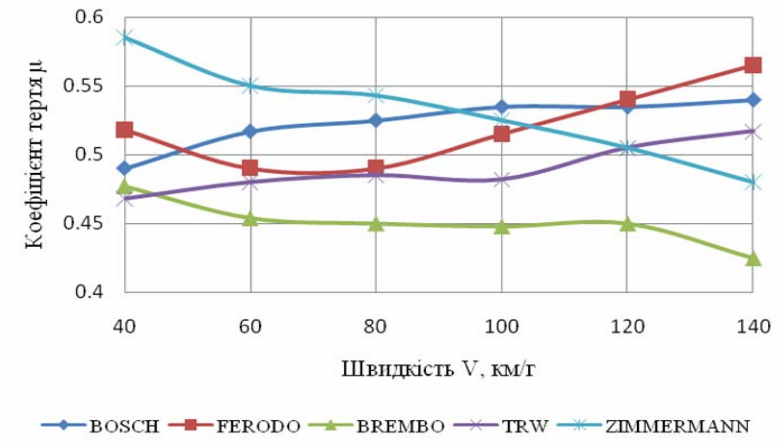


Рисунок 8 - Графік залежності усередненого коефіцієнта тертя передніх гальмівних колодок для автомобіля Ford Focus III від швидкості руху автомобіля, після двох циклів гірського серпантину (після FADE)

Джерело: розроблене авторами

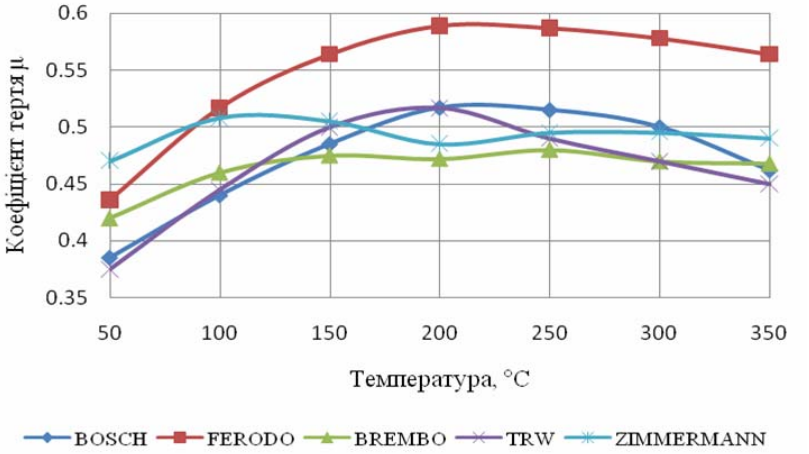


Рисунок 9 - Графік залежності усередненого коефіцієнта тертя передніх гальмівних колодок для автомобіля Ford Focus III від температури пари тертя, після двох циклів гірського серпантину (після FADE)

Джерело: розроблене авторами

Висновки. Проводячи підсумок даних досліджень можна зробити висновок що всі колодки показали гарний результат, але на нашу думку кращими виявилися колодки фірми BOSCH (Германія) і ZIMMERMANN (Германія).

Спрацювання колодок BOSCH виявилося одним з найнижчих в тесті, всього 0,31 мм (у тесті були колодки, більш ніж в два рази що перевищили цей показник), відмічено і найменше спрацювання гальмівного диска - 0,006 мм.

Передні гальмівні колодки FERODO показали найвище спрацювання в тесті - 0,65, але при цьому вони опинилися в числі «найнижчих» по відношенню до спрацювання гальмівного диска - 0,004 мм.

За час проведення тесту спрацювання колодок BREMBO склало 0,39 мм і виявився одним з найвищих, маючи другий результат. Також один з найвищих у категорії спрацювання гальмівного диска - 0,011 мм.

Спрацювання колодок TRW при значенні 0,34 мм виявився вищий середнього в групі. Спрацювання гальмівного диска склало - 0,006 мм.

Спрацювання колодок ZIMMERMANN при значенні 0,32 мм виявилося другим в групі. А ось спрацювання гальмівного диска одним з найвищих в тесті - 0,011 мм.

Всі гальмівні колодки, які досліджувались не спричиняли погіршення акустичної складової процесу гальмування: скрипів, писків і інших шумів не виявлено. Під час дослідження на міцність з'єднання накладок з основами гальмівних колодок показники зчіпних властивостей фрикційних накладок всіх гальмівних колодок вище нормативних значень.

Разом з тим, кожен власник в праві вирішувати які колодки він встановить на свій автомобіль Ford Focus III.

Список літератури

1. О.В. Бевз, С.О. Магопець, Д.А. Якимаха. Дослідження надійності роботи переднього гальмівного механізму автомобіля Renault. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету*, Кіровоград: КНТУ. 2013. Вип. 26. С. 112-116.
2. Косёнков А.А. Устройство тормозных систем иномарок и отечественных автомобилей: учебн. пособ. Издательство: «Феникс». 2003. 224 с.
3. Кашканов А. А., Ребедайло В. М., Кашканов В. А.. Оцінка експлуатаційних гальмових властивостей автомобілів в умовах неточності вихідних даних: монографія. Вінниця: ВНТУ. 2010. 148 с.
4. ГОСТ Р 41.90-99 (Правила ЕЭК ООН N 90) Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения сменных тормозных накладок в сборе и накладок барабанных тормозов для механических транспортных средств и их прицепов. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2001. 28 с.
5. ДСТУ UN/ECE R 90-01:2005. Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження змінних гальмових накладок у зборі і гальмових накладок барабанних гальмових механізмів колісних транспортних засобів та їхніх причепів. [Чинний від 01.07.2006]. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. IV. 29 с. (Національний стандарт України)
6. Журнал «АвтоДела». Информационный сайт журнала. URL: https://www.autodela.ru (дата обращения: 15.04.2019).

References

1. Bevz, O.V., Mahopets', S.O., Yakymakha, D.A. (2013). Doslidzhennia nadijnosti roboty peredn'oho hal'mivnoho mekhanizmu avtomobilia Renault [Research of reliability of work of front brake mechanism of car Renault]. *Zb. nauk. prats' KNTU. Tekhnika v s/h vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Collected works of KNTU. Machinery in agricultural production, industry machine building, automation*, *Vol.. 26*, 112-116 [in Ukrainian]
2. Kosjonkov, A.A. (2003). *Ustrojstvo tormoznyh sistem inomarok i otechestvennyh avtomobilej* [*The device brake systems for cars and domestic cars. Tutorial*]. Izdatel'stvo: «Feniks» [in Russian].
3. Kashkanov A. A., Rebedajlo V. M., Kashkanov V. A. (2010). *Otsinka ekspluatatsijnykh hal'movykh vlastyvostej avtomobiliv v umovakh netochnosti vykhidnykh danykh* [*Estimation of operational braking properties of cars in the conditions of inaccuracy of the initial data: monograph*]. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian]
4. Edinoobraznye predpisanija, kasajushhiesja oficial'nogo utverzhdenija smennyh tormoznyh nakladok v sbore i nakladok barabannyh tormozov dlja mehanicheskih transportnyh sredstv i ih pricepov [Uniform requirements concerning the approval of replacement brake lining assemblies and drum brake linings for motor vehicles and their trailers]. (2001). *HOST R 41.90-99 (Pravila EJeK OON N 90)*. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov [in Russian].
5. Yedyni tekhnichni prypysy schodo ofitsijnoho zatverdzhennia zminnykh hal'movykh nakladok u zbori i hal'movykh nakladok barabannykh hal'movykh mekhanizmiv kolisnykh transportnykh zasobiv ta ikhnikh prychepiv [Uniform requirements concerning the approval of replacement brake lining assemblies and drum brake linings for motor vehicles and their trailers.]. *DSTU UN/ECE R 90-01:2005*. Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (Natsional'nyj standart Ukrainy) [in Ukrainian].
6. Zhurnal «AvtoDela». Informacionnyj sajt zhurnala Journal «Avtodela». Information site journal [Journal «Avtodela». Information site journal]. *autodela.ru.* Retrieved from https://www.autodela.ru [in Russian].

Oleg Bevz, Assoc. Prof., PhD tech. sci
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
Shakir Aliyev, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Gulnara Aliyev,** Senior Lecturer
Azerbaijan Technological University (UTECA), Baku, Azerbaijan

The Study of the Reliability of the Brake Mechanism of the Car Ford Focus III

In hired the results of researches of efficiency of work in the laboratory terms of pair of friction are pointed - a «brake disk is a skid».

On the basis of results of the conducted researches of work of pair of friction - a «brake disk is a skid» taking into account different terms works after completion of all researches an estimation was conducted absolute and specific wear of brake pads.

At this stand, the performance of all the pads in various braking modes was directly verified

The studies were conducted on a special stand using the natural brake assembly of the car Ford Focus III.

In summary of these studies, we can conclude that all the pads showed a normal result, but in our opinion the best were the pads of the firm BOSCH (Germany) and ZIMMERMANN (Germany).

However, each owner has the right to decide which pads he will install on his car Ford Focus III.

skids, brake disk, temperature, specific wear

Одержано (Received) 23.05.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 30.05.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

УДК 656.13.071.8 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).58-67

О.І. Субочев, доц., канд. техн. наук, **Т.А. Завалій,** студ.
Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна
e-mail: subochev.alex@gmail.com
М.Г. Погорєлов, ст. виклад.
Донбаський державний педагогічний університет, м. Слов'янськ, Донецька обл; Україна
e-mail: texfak@gmail.com

Удосконалення забезпечення запасними частинами сервісних підприємств

Проаналізовано фактори, що впливають на споживання запасних частин, існуючі принципи побудови систем управління запасами, методи моделювання попиту та часу поповнення запасів. Розроблена методика формування номенклатури і розрахунку запасів запасних частин. Розроблена методика визначення оптимального запасу агрегатів, яка дозволяє визначати найвигідніші стратегії в різних випадках.

запасні частини, попит, номенклатура, оптимальний запас

А.И. Субочев, доц., канд. техн. наук, **Т.А. Завалий,** студ.
Днепровский государственный аграрно-экономический университет, г. Днепр, Украина
М.Г. Погорелов, ст. препод.
Донбасский государственный педагогический университет, г. Славянск, Донецкая обл., Украина

Совершенствование обеспечения запасными частями сервисных предприятий

Проанализированы факторы, влияющие на потребление запасных частей, существующие принципы построения систем управления запасами, методы моделирования спроса и времени пополнения запасов. Разработана методика формирования номенклатуры и расчета запасов запасных частей. Разработана методика определения оптимального запаса агрегатов, которая позволяет определять наиболее выгодные стратегии в различных случаях.

запасные части, спрос, номенклатура, оптимальный запас

© О.І. Субочев, Т.А. Завалій, М.Г. Погорєлов, 2019

Постановка проблеми. На економічні показники роботи сервісних підприємств (СП) суттєво впливають, з однієї сторони, витрати пов'язані з придбанням і зберіганням підвищених запасів матеріальних ресурсів, які гарантують безперебійну роботу транспортних засобів, з простоїв останніх через несвоєчасне постачання матеріальних ресурсів, з іншої сторони [1, 2].

Усереднене нормування запасних частин (ЗЧ) не враховує конкретних умов експлуатації машин. На величину витрат матеріальних ресурсів в першу чергу впливають експлуатаційні та транспортні фактори, які є індивідуальними для кожного транспортного засобу (ТЗ) [3, 4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наведено, що запасні частини є складовою частиною виробу, призначеного для заміни такої ж частини, що перебувала в експлуатації, з метою забезпечення справності або тільки працездатності виробу. Тому автомобільні ЗЧ можна розглядати як своєрідний резерв із встановленого певним чином складу елементів (деталей, вузлів, агрегатів) автомобіля, наявність якого є необхідною умовою нормального функціонування автомобіля в процесі експлуатації. Від забезпечення автомобілів ЗЧ істотно залежить підтримка високого рівня технічної готовності рухомого складу [5, 6].

Забезпечення організації постачання автомобільного транспорту ЗЧ пов'язане з рішенням двох основних завдань: встановленням номенклатури елементів автомобіля, що поставляються в ЗЧ, і визначенням обсягів їхнього виробництва й розподіли споживачам [7].

Ринок запасних частин, будучи складовою частиною загального автомобільного ринку, володіє, разом з тим, відносною самостійністю та має ряд своїх особливостей. Це обумовлено, насамперед, наявністю значної кількості заводів і підприємств, що роблять запасні частини та комплектуючі, великою рухливістю широкої мережі посередників, що здійснюють їхній збут, а також відсутністю досить повної та оперативної інформації про номенклатуру вироблених запчастин, їхньої наявності в продажі та цінах на них [8, 9].

Постановка завдання. Метою є проведення аналізу і пошук можливих рішень для побудови логістичних моделей нормування витрат запасних частин, що базується на критеріях економічності та інформаційних технологіях і індивідуальному підході до нормування.

Виклад основного матеріалу. Потреба СП у запасних частинах для забезпечення нормального функціонування рухомого складу і його якісного ремонту визначаються великою кількістю факторів, що характеризують як споживачів, так і існуючу систему постачання запасними частинами. Вплив цих факторів проявляється в організації транспортного і виробничого процесів, залежить від режиму та умов експлуатації, організації системи планування й розподілу ЗЧ, інформаційної бази, нормативно-методичного забезпечення та ін.

Процес споживання ЗЧ найбільшою мірою залежить від особливостей сфери експлуатації. У цій сфері можна виділити кілька груп факторів. Зокрема до них ставляться: система організації ТО та ремонту, рухомий склад і структура парку, виробнича база, персонал і умови експлуатації [1, 2]. Значимі для дослідження споживання ЗЧ фактори кожної групи наведені на схемі (рис. 1).

Рисунок 1 – Фактори, що визначають попит запасних частин у сфері експлуатації
Джерело: розроблено з використанням [3]

Основою якісного керування постачанням ЗЧ для експлуатуючих і ремонтних організацій автомобільного транспорту є прогресивні технічно та економічно обґрунтовані норми їхньої витрати, які повинні об'єктивно враховувати особливості експлуатації, надійність автомобіля і його елементів, систему ремонту та інші фактори.

Обґрунтованість норм витрати у свою чергу визначається вірогідністю вихідної інформації, яка вимагається, для розрахунку й правомірністю вибору методів їхнього визначення. Важливість достовірного визначення норм витрати на ремонтно-експлуатаційні потреби потрібна також і з того, що вони є базою для розробки норм запасів автомобільних ЗЧ на різних рівнях складської системи підприємств автотранспорту.

Розрізняють системи з фіксованим розміром замовлення, постійним інтервалом часу між замовленнями та їхні комбінації [1, 6, 8].

Система з фіксованим розміром замовлення. Основний параметр системи – розмір замовлення. Він строго зафіксований і не міняється ні при яких умовах роботи системи. Визначення розміру замовлення є першим завданням, що вирішується при роботі з даною системою керування запасами.

У системі з фіксованим розміром замовлення (рис. 2) обсяг закупівлі повинен бути не тільки раціональним, але і оптимальним, тобто найкращим . Критерієм оптимізації повинен бути мінімум сукупних витрат на зберігання запасів і повторення замовлення, який враховує три фактори: використовувана площа складських приміщень; витрати на зберігання запасів; вартість оформлення замовлення.

Ці фактори тісно взаємозалежні між собою, причому сам напрямок їхньої взаємодії неоднаково в різних випадках. Бажання максимально заощадити витрати на зберігання запасів викликає ріст витрат на оформлення замовлень.

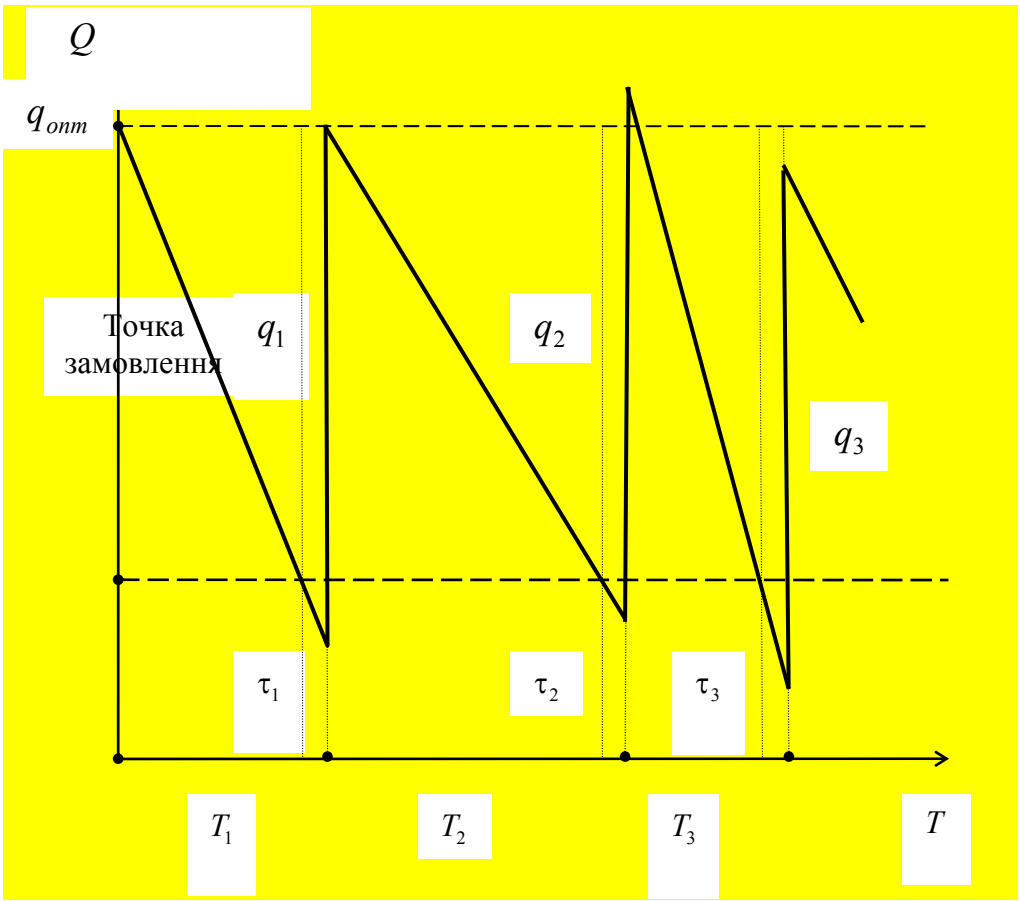


Рисунок 2 – Діаграма періодичності поповнення запасів: $T_1 \neq T_2 \neq T_3$ - періодичність замовлення; $q_1 = q_2 = q_3$ - об'єм замовлення, $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3$ - час поповнення

Джерело: розроблено з використанням [9]

Використання критерію мінімізації сукупних витрат на зберігання запасів і повторне замовлення не мають змісту, якщо час виконання замовлення надто тривалий, попит випробовує істотні коливання, а ціни на матеріали сильно коливаються, у такому випадку недоцільно заощаджувати на змісті запасів. Це найімовірніше приведе до неможливості безперервного обслуговування споживача. У всіх інших ситуаціях визначення оптимального розміру замовлення забезпечує зменшення витрат на зберігання запасів без втрати якості обслуговування.

Інші системи постачання запасними частинами наведені [1, 6, 8].

Основна особливість формування потоків відмов деталей автомобіля полягає в тому, що крім відмов, обумовлених граничним станом деталі та тих, що можна усунути поточним ремонтом, відбувається штучне відсічення потоку через капітальні ремонти агрегатів і автомобіля, списання агрегатів і автомобіля. Відсічення потоку може бути викликано прийнятою стратегією замін при поточних ремонтах, коли робиться одночасна заміна декількох сполучених деталей, деякі з яких не вичерпали свій ресурс. Таким чином, при розробці загальної методики розрахунку потоків відмов з урахуванням ремонтних впливів повинні бути враховані три моменти: по-перше, відсічення потоку відмов капітальними ремонтами, списанням або стратегією замін; по-друге, формування потоку після ремонтних впливів; по-третє, визначення показників залишкового ресурсу деталей. Оскільки формування потоку відмов з урахуванням

ремонтних впливів фактично означає перемішування нестаціонарних потоків відмов (НПВ) (наприклад, деталей і агрегату).

Для аналізу НПВ доцільно розділити деталі автомобіля на три групи.

Перша група включає деталі, які повністю заміняються при ремонтних впливах (прокладки, сальники тощо).

Друга група – це невідновлювані, але що піддаються дефектації деталі, які у випадку придатності встановлюються на відремонтованих агрегатах (підшипники кочення, шестірні та ін.).

Третя група включає відновлювані деталі.

При формуванні НПВ необхідно враховувати наступні ремонтні впливи: капітальні ремонти агрегату L_a; капітальні ремонти автомобіля L_A, а також списання автомобіля L_c. Наробітку до зазначених ремонтних впливів і списання є випадковими величинами й підкоряються відповідним законам розподілу. В загальному випадку число факторів, що впливають на формування НПВ, повинне бути збільшене за рахунок обліку наробітків до списання агрегату, якщо його наробіток не збігається зі списанням автомобіля, і особливостей, пов'язаних зі стратегією замін при поточних ремонтах агрегату.

Раціональне рішення допускає таку інтерпретацію: другий гравець парної взаємодії замінюється випадковим вибором або неусвідомлено приймаючим свої рішення економічним середовищем, а сама ситуація прийняття рішення характеризується функціоналом оцінювання F, який називають платіжною матрицею.

Формально ситуація прийняття рішення згідно логістичною концепцією описується трійкою множин: $\{S;\Theta;F\}$.

Чистою стратегією гравця є сукупність рекомендацій щодо ведення взаємодії від початку до її завершення.

Взаємодія скінчена, якщо в кожного гравця є скінченна кількість стратегій. У протилежному випадку взаємодія є нескінченною.

Нехай взаємодія є скінченою, тоді результати рішень гравців можна виразити в грошовому еквіваленті або з допомогою інших цінностей, які збирається вигравати (придбати) кожен гравець. Тобто для кожної комбінації вибраних гравцями чистих стратегій існує відповідна величина платежу.

Однією із задач теорії взаємодії є виявлення можливості певної рівноваги, що називається компромісом, яка найбільшою мірою задовольняє всіх учасників.

Нехай відома матриця платежів $F=\left(f_{kj}:k=1,...m;j-1,...,n\right)$ парної взаємодії з нульовою сумою, де елемент платіжної матриці f_{kj} – це виграш першого гравця, тобто сума, яку йому платить другий гравець (програш другого гравця) у випадку використання першим гравцем своєї чистої стратегії $s_k \in S$, а другим гравцем – своєї чистої стратегії $\theta_j \in \Theta\left(k=1,...m;j=1,...,n\right)$.

Розв'язати взаємодію - це означає знайти оптимальну стратегію для кожного гравця. Оптимальною стратегією гравця називається така стратегія, яка за багаторазового повторення гри забезпечує гравцеві максимально можливий середній виграш (або мінімально можливий середній програш).

Платіжна матриця F містить елемент $f_{k_0 j_0}$, що задовольняє умову:

$$f_{k_0 j_0}=\alpha^{+}=\beta^{-} \tag{1}$$

(цей елемент є мінімальним у k_0-му рядку та максимальним у j_0-му стовпчику). Елемент $f_{k_0 j_0}$ називається сідловою точкою матриці F, величина:

$$V^* = \alpha^+ = \beta^- = f_{k_0 j_0} \tag{2}$$

називається чистою ціною взаємодії.

Таким чином, якщо взаємодія має сідлову точку, то чисті стратегії s_{k_0} та θ_{j_0} є оптимальними і тоді сукупність стратегій s_{k_0}, θ_{j_0} та ціна гри $V^* = \alpha^+ = \beta^-$ утворюють розв'язок гри.

Розв'язання взаємодії має таку властивість: якщо один з гравців дотримується своєї оптимальної стратегії, то відхилятися від своєї оптимальної стратегії не вигідно для другого гравця. У загальному випадку значення ціни взаємодії задовольняє умову:

$$\alpha^+ \le V \le \beta^-, \tag{3}$$

що має місце у випадках, коли гра не має сідлової точки, а мінімаксні чисті стратегії - не оптимальні. Це означає, що пошук розв'язання взаємодії у чистих стратегіях стає неможливим і кожна зі сторін може поліпшити свій стан шляхом багаторазового випадкового вибору певних своїх чистих стратегій з деяких підмножин (що належать множинам альтернативних чистих стратегій). Такі стратегії називаються змішаними.

Серед змішаних стратегій першого та другого гравців відшукують оптимальні, позначивши їх через s_{p^*}, та θ_{Q^*}, відповідно.

Тоді у загальному випадку оптимальним розв'язанням гри буде сукупність $\left(s_{p^*}; \theta_{Q^*}\right)$.

Якщо перший гравець вибрав змішану стратегію s_p, $P = \left(p_1;...;p_m\right)$, а другий - змішану стратегію θ_Q, $Q = \left(q_1;...;q_n\right)$, то сподіваний виграш першого гравця (програш другого гравця) у ситуації багаторазового повторення гри становить величину:

$$V = \sum_{k=1}^{m} \sum_{k=1}^{n} f_{kj} p_k q_j \ . \tag{4}$$

Взаємодія з нульовою сумою має наступну платіжну матрицю:

$$F = \left(f_{kj} : k = 1,...,m; j = 1,...,n\right). \tag{5}$$

Нехай для першого гравця змішана стратегія s_p визначається вектором (розподілом імовірності) $P = \left(p_1;...;p_m\right)$, а для другого гравця - змішана стратегія θ_Q - вектором $Q = \left(q_1;...;q_n\right)$.

При цьому p_k – імовірність, з якою перший гравець застосовує свою чисту стратегію $s_k\left(k = 1,...,m\right)$, q_j – імовірність, з якою другий гравець застосовує свою чисту стратегію $\theta_j\left(j = 1,...,n\right)$. Із основної теореми теорії взаємодії випливає, що кожна скінченна взаємодія має розв'язання, тобто ціну гри $V^* = \sum_{k=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} \left(p_k^* q_j^* f_{kj}\right)$ та оптимальні стратегії s_{p^*} і θ_{Q^*} гравців, які визначаються векторами $P^* = \left(p_1^*,...,p_m^*\right)$ і $Q^* = \left(q_1^*,...,q_n^*\right)$ відповідно.

Не порушуючи загальності, можна припустити, що $V = \sum_{k=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left(p_k q_j f_{kj}\right) > 0$. Дійсно, для того, щоб здійснилась умова $V > 0$, достатньо, щоб усі елементи f_{kj} платіжної матриці F були додатними. Цього завжди можна досягти, збільшуючи всі елементи f_{kj} на одну й ту саму достатньо велику величину $c = const$. При цьому ціна гри збільшується на $c = const$, а розв'язок, тобто пара оптимальних змішаних стратегій s_{p^*} та θ_{Q^*} гравців, не зміниться. Тому вважатимемо надалі, що $V > 0$.

Виконуються розрахунки залежностей ризику та виграшів від сервісних підприємств з різними кількостями автомобілів, що позначені пунктирними лініями на рис. 3 та рис. 4.

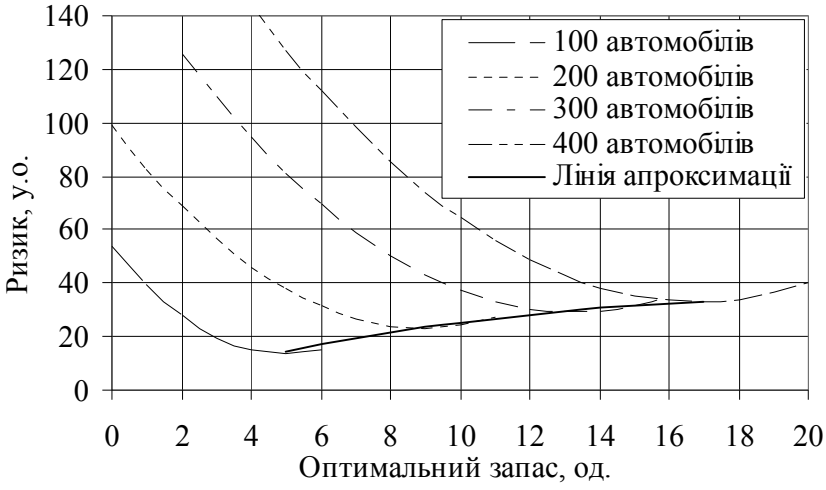


Рисунок 3 – Залежності величин ризику від кількості автомобілів

Джерело: розроблено автором

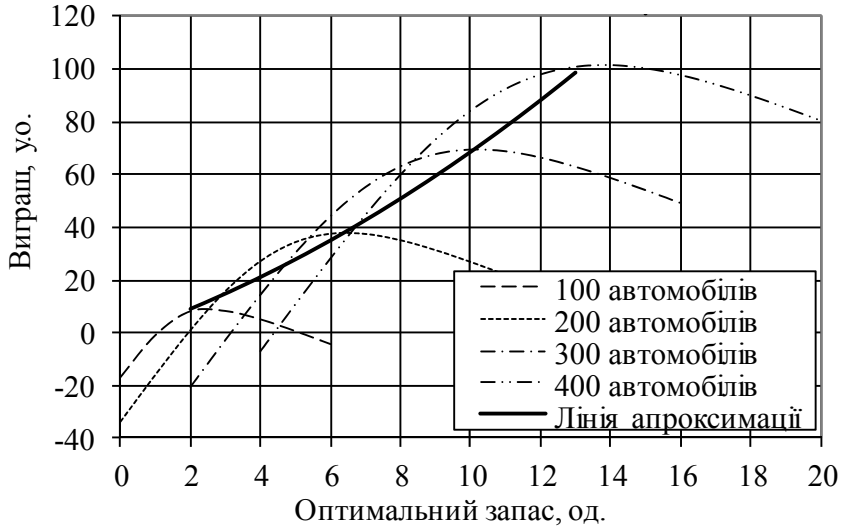


Рисунок 4 – Залежності величин виграшу від кількості автомобілів

Джерело: розроблено автором

Для оптимізації величини ризику від кількості автомобілів виберемо значення мінімального ризику кожного парку, та зведемо їх до таблиці 1.

Таблиця 1 – Значення мінімальних ризиків та максимальних виграшів

№	Найменування показників		Кількість автомобілів			
			100	200	300	400
1	Для ризику	Оптимальний запас, од.	4,8	9,0	13,2	17,0
		Мінімальний ризик, у. о.	13,5	24,0	29,5	33,0
2	Для виграшу	Оптимальний запас, од.	2,2	6,2	10,2	13,5
		Максимальні виграші, у. о.	8,0	38,0	70,0	104,0

Джерело: розроблено автором

Якщо поєднати точки екстремумів на рис. 3 та рис. 4. отримуються:

1 – залежність мінімального ризику від різних кількостей автомобілів;

2 – залежність максимального виграшу від різних кількостей автомобілів.

Для спостереження закономірностей слід знайти рівняння апроксимуючої залежності мінімального ризику та максимального виграшу від різних кількостей автомобілів.

Виходячи з виду розташування цих значень на координатній площині, обираємо за апроксимуючу функцію квадратичну параболу:

$$y = ax^2 + bx + c, \tag{6}$$

де a, b, c – коефіцієнти апроксимуючої функції.

Використовуючи метод найменших квадратів, знаходимо значення коефіцієнтів апроксимуючої функції:

- для залежності мінімального ризику від різної кількості автомобілів $a = -0{,}083$, $b = 3{,}363$, $c = -0{,}163$.

- для залежності максимального виграшу від різної кількості автомобілів $a = 0{,}174$, $b = 5{,}694$, $c = -5{,}032$.

Апроксимуючі функції на рис. 3 та рис. 4 зображені суцільною лінією.

Аналізуючи апроксимуючі функції можна встановити, що з підвищенням кількості автомобілів величина ризику не є постійно зростаючою, вона дотично наближується до сталого значення. Збільшення кількості рухомого складу, що обслуговується автосервісним підприємством, підвищує виграш від утримання оптимальної кількості запасних частин.

Висновки. Проаналізовано фактори, що впливають на споживання запасних частин, існуючі принципи побудови систем управління запасами, методи моделювання попиту та часу поповнення запасів, сучасні умови розвитку ринку запасних частин. Розроблена методика формування номенклатури і розрахунку запасів запасних частин, що ґрунтується на логістичних методах, які координуються з середнім ресурсом та випадком раптових відмов деталей. Розроблена методика визначення оптимального запасу агрегатів, яка дозволяє визначати найвигідніші стратегії в різних випадках: в умовах недоліку інформації; в умовах ризику; в умовах часткової визначеності. Збільшення кількості рухомого складу, що обслуговується сервісним підприємством, підвищує виграш від утримання оптимальної кількості запасних частин. Це є

результатом того, що прибутки підприємства на пряму залежать від кількості задоволених потреб.

Список літератури

1. Дудар Т., Волошин Р. Основи логістики: навчальний посібник. Київ: Центр учбової літератури. 2012. 171 с.
2. Костромин Г. Управління матеріальними ресурсами : навчальний посібник. Кіровоград: КНТУ. 2007. 233 с.
3. Курніков І.П. Управління запасами автосервісів в умовах невизначеності попиту *Автошляховик України*. 2002. №1. С. 15-17
4. Арсеньева Т., Бажин И., Сысоев В. Проектно-логистическое управление ресурсным обеспечением. Новгород: Изд. Гладкова О.В. 2005. 221 с.
5. Лола Ю.Ю. Управління матеріальними ресурсами на підприємстві (логістичний та реінжиніринговий підхід): автореф. дис. на здобуття канд. екон. наук: 08.00.04, Харків, 2009. 20 с.
6. Андрусенко С.І., Бугайчук О.С. Моделювання бізнес-процесів підприємства автосервісу: монографія. Київ: Кафедра. 2014. 328 с.
7. Войтків Л.С. Управління матеріальними ресурсами у період реструктуризації підприємства : дис... канд. екон. наук: 08.06.01 / Івано-Франківський національний технічний ун-т нафти і газу. Івано-Франківськ, 2005. 210 с.
8. Лукинский В.С., Бережной В.И., Бережная Е.В., Цвиринько И.А. Логистика автомобильного транспорта. Концепция, методы, модели. Москва: Финансы и статистика. 2002. 278 с.
9. Лукинский В.С. Моделирование цепи поставок (Серия «Теория менеджмента») / пер. с англ. Д. Шапиро. Санкт-Петеобург: Питер. 2006. 713 с.

Referencis

1. Dudar, T. & Voloshin R. (2012). *Osnovy Logistiky: navchalny posibnyk [Basics of logistics]*. Kyiv: Centr uchbovoji literatury [in Ukrainian].
2. Kostromin, G. (2007). *Upravlinnya materialnymy resursamy: navchalny posibnyk [Management of material resources]*. Kirovoghrad: KNTU [in Ukrainian].
3. Kurnikov I.P. (2002). Upravlinnya zapasamy autoservisiv v umovakh nevyznachenosnti [Управління запасами в автосервісів умовах невизначеності попиту]. *Autoshlyakhovyk Ukrajiny - Avtoshlyahovyk of Ukraine, 1,* 15-17 [in Ukrainian].
4. Arsenyeva, T., Bazhin, I. & Sysoev, V. (2005). *Proektno-lodisticheskoe upravlenie resursnym obespecheniem [Design and logistics management of resource support]*. Novgod: Izd. Gladkova O.V. [in Russian].
5. Lola, U.U. (2009). Upravlinny materialnymi resursamy na pidpryemstvi (logistychny ta reingyniryngovy pidkhid [Management of material resources at the enterprise (logistic and reengineering approach)]. *Extended abstract of candidate's thesis.* Kharkiv [in Ukrainian].
6. Andrusenko, S.I. & Bugaychuk, OS (2014). *Modeluvannya biznes-procesiv pidpryemstva autoservisu: monoghrafija [Modeling business processes of the car service company]*. Kyiv: Kafedra [in Ukrainian].
7. Voytkiv, L.S. (2005). Upravlinny materialnymi resursamy u period restructurizacji pidpremstva [Management of material resources during the restructuring of the enterprise]. *Candidate's thesis.* Ivano-Frankovck [in Ukrainian].
8. Lukinsky, V.S., Bereghnoy, V.I., Bereghnaia, E.V. & Tsvirinko, I.A. (2002). *Logistica avtomobilnogo transporta. Koncepsiya, metody, modeli [Logistics of motor transport. Concept, methods, models]*. Moscow: Finansy i statistica [in Russian].
9. Lukinsky, V.S. (2006). *Supply Chain Modeling (Theory of Management Series)* (D. Shapiro Trans). St. Petersburg: Piter

Olexandr Subochev, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Dnipro State Agrarian-Economic University, Dnipro, Ukraine
Mykhailo Pogorelov, Senior Lecturer
Donetsk State Pedagogical University, Slavyansk, Donetsk region; Ukraine
Tymur Zavaliy, student
Dnipro State Agrarian-Economic University, Dnipro, Ukraine

Improving the Supply of Spare Parts Service Companies

The article is devoted to the analysis and search for possible solutions for the construction of logistic models for rationing the consumption of spare parts, based on the criteria of efficiency and information technology and an individual approach to rationing.

The need of service enterprises for spare parts to ensure the normal functioning of rolling stock and its quality repair is determined by a large number of factors characterizing both consumers and the existing system of supplying spare parts. The influence of these factors is manifested in the organization of transport and production processes. The basis of the quality management of the supply of spare parts for the operating and repair organizations of road transport is progressive technically and economically sound norms of their consumption, which must objectively take into account the features of operation, the reliability of the vehicle and its components, the repair system. The main feature of the formation of flows of failures of parts of the car is that in addition to failures due to the limiting condition of the part and those that can be eliminated by the current repair, there is an artificial cutoff of the flow through the overhaul of the units and the car, writing off the units and the car. The formation of a flow of failures with regard to repair effects actually means the mixing of unsteady flows of failures (for example, parts and aggregate).

The factors affecting the consumption of spare parts, the existing principles of building inventory management systems, methods for modeling demand and replenishment time, modern conditions for the development of the spare parts market are analyzed. A method has been developed for forming a nomenclature and calculating stocks of spare parts based on logistic methods that are coordinated with the average resource and the case of sudden failure of parts. A method has been developed for determining the optimal stock of aggregates, which makes it possible to determine the most advantageous strategies in various cases: under conditions of lack of information; at risk; in conditions of partial certainty. The increase in the number of rolling stock serviced by the service company increases the gain from the maintenance of the optimal number of spare parts. This is a result of the fact that the income of the enterprise is directly dependent on the number of needs met.

spare parts, demand, nomenclature, optimal stock

Одержано (Received) 26.04.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 17.05.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

УДК.629.113 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).68-78

О.В. Бевз, доц., канд. техн. наук, **С.О. Магопець,** доц., канд. техн. наук, **О.О. Матвієнко,** доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: oleg_bevz@ukr.net

Дослідження характеристик гальмівного механізму автомобіля Hyundai Accent

Стаття присвячена дослідженню пари тертя – «гальмівний диск – гальмівна колодка». У даній роботі наведені результати досліджень ефективності роботи пари тертя в лабораторних умовах. На основі результатів проведених досліджень оцінено ефективність роботи гальмівних колодок в різних умовах експлуатації. Дослідження проводилися на спеціальному стенді з використанням натурального гальмівного вузла автомобіля Hyundai Accent.
гальмівні колодки, гальмівний диск, температура, питоме спрацювання

О.В. Бевз, доц., канд. техн. наук, **С.А Магопец,** доц., канд. техн. наук, **А.А. Матвиенко,** доц., канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Исследование надежности тормозного механизма автомобиля Hyundai Accent

Статья посвящена исследованию пары трения - «тормозной диск - тормозная колодка». В данной работе приведены результаты исследований эффективности работы пары трения в лабораторных условиях. На основе результатов проведенных исследований работы пары трения с учетом разных условий работы после окончания всех исследований проводилась оценка абсолютного и удельного износа колодок. Исследования проводились на специальном стенде с использованием натурального тормозного узла автомобиля Hyundai Accent.
тормозные колодки, тормозной диск, температура, удельный износ

Постановка проблеми. В останні роки в нашій країні, як і Європі та світі загалом, стрімко підвищуються вимоги до безпеки руху транспортних засобів, що обумовлено постійним зростанням чисельності парку автомобілів та збільшенням обсягів перевезень пасажирів і вантажів. При цьому проблема забезпечення безпеки руху автотранспортних засобів є виключно актуальною.

Зважаючи на збільшення середніх експлуатаційних швидкостей і ущільнення транспортних потоків вимоги, що пред'являються до гальмівної системи автотранспортного засобу посилюються. Конструкція і технічний стан гальмівної системи автотранспортного засобу (АТЗ) здійснюють вплив на його активну безпеку. Для скорочення гальмівного шляху транспортного засобу, забезпечення надійного спрацьовування і реалізації керування ним при сповільненні зі збереженням стійкості, виробники сучасних автомобілів оснащують гальмівні системи багатоконтурним приводом з інтегрованою антиблокувальною системою (АБС) і дисковими механізмами.

Параметри ефективності гальмування автомобіля, а також надійність роботи гальмівної системи визначають характер розвитку аварійної ситуації і дозволяють водієві уникнути дорожньо-транспортної пригоди (ДТП). Останнім часом змінилися показники оцінки гальмівних властивостей автомобілів, нормативні значення яких у відповідності до Правил ЄЕК ООН тепер стали жорсткішими.

© О.В. Бевз, С.О. Магопець, О.О. Матвієнко, 2019

Ефективність же гальмування автомобіля визначається як конструктивними особливостями, так і експлуатаційними характеристиками вузлів і механізмів його гальмівної системи [1].

Не зважаючи на різні конструкції гальмівних систем вантажних і легкових автомобілів, загальний принцип роботи гальмівної системи залишається незмінним – перетворення кінетичної енергії автомобіля у теплову енергію тертя в гальмівних парах «диск - колодка» або «барабан - колодка» із наступним розсіюванням тепла в повітрі (за виключенням гальмівних систем із підсистемами рекуперації кінетичної енергії). Як наслідок – в експлуатаційних умовах колісні гальмівні механізми нагріваються, і ефективність їх роботи змінюється. Так, рух автомобіля по дорогах із частими підйомами та ухилами, гірських серпантинах тощо, потребує постійної активації гальмівної системи та не дозволяє гальмівним парам підтримувати оптимальні температурні показники, через що їх характеристики починають сильно змінюватися в бік зниження ефективності.

Визначальним фактором ефективності процесу гальмування є характеристики так званої «гальмівної пари» - гальмівних колодок й дисків, закладені виробниками на стадії їх виробництва та виражені у матеріалах та розмірах поверхонь тертя. Разом з тим, в процесі багатократного циклічного контакту тертьових поверхонь відбуваються незворотні процеси пов’язані із змінюю властивостей фрикційних матеріалів колодки та контр-тіла: товщини матеріалів гальмівних накладок колодок та гальмівних дисків зменшуються, що викликає погіршення фрикційних властивостей та втрату гальмівних характеристик. Саме тому є актуальними питання дослідження ступеня зміни ефективності гальмування в експлуатаційних умовах при зміні параметрів процесу гальмування, швидкості руху автомобіля й значень температури гальмівної пари.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Останнім часом багатьма науковцями досліджуються питання підвищення ефективності процесу гальмування автомобілів [2–3]. Однак аналіз цих публікацій показав, що матеріали викладені в них містять рекомендації та висновки більше загального характеру.

При роботі гальмівного вузла одним з основних явищ, які супроводжують фрикційні взаємодії в гальмах, є нагрів пар тертя. Пара тертя - «гальмівний диск – гальмівна колодка» поглинає механічну енергію та перетворює її в тепло, яке дальше негативно впливає на гальмівний механізм.

З огляду на те, що гальмівна система автомобіля є найважливішим елементом його активної безпеки, яка визначає як безпеку всіх учасників дорожнього руху так і цілісність самого транспортного засобу, забезпеченість нормативних експлуатаційних характеристик цієї системи є вирішальною експлуатаційною задачею.

Постановка завдання. Метою даної роботи є дослідження залежності гальмівного моменту від передачі тиску в приводі, швидкості руху та температури в зоні тертя в передніх робочих гальмівних механізмах автомобіля.

Виклад основного матеріалу. Програма дослідження гальмівних механізмів ґрунтувалася на Правилах № 90 ЄЕК ООН [4] і включала перевірку за наступними блоками:

1. Перевірка ефективності гальмування автомобіля в залежності від [6]:

- привідного зусилля і тиску в гальмівному циліндрі автомобіля при заданій початковій швидкості гальмування;
- початкової швидкості гальмування при заданій величині тиску в гальмівному циліндрі;
- температури гальмівних колодок.

2. Перевірка зносостійкості гальмівних колодок.

3. Дослідження впливу властивостей фрикційного матеріалу накладок гальмівних колодок на спрацювання гальмівного диску.

4. Дослідження міцності фіксації фрикційної накладки до основи гальмівної колодки.

Випробування гальмівних механізмів було проведено в лабораторних умовах на стендовому обладнанні у декілька етапів.

Етап перший – припрацювання пари тертя. Гальмівний диск розігрівався до температури 100 °С і розкручувався до швидкості, що відповідає швидкості автомобіля 100 км/год. Потім із прикладенням зусилля 5,0 МПа на гальмівній педалі диск зупиняли. Дослідження тривало до тих пір, поки контактна площа поверхні накладки гальмівної колодки в контакті з диском становила не менше 90 %. Після цього проводилися заміри товщини гальмівного диску і товщини накладки гальмівної колодки.

На другому етапі гальмівний диск нагрівався до температури 100 °С і спочатку загальмовувався зі швидкості 100 км/год до повної зупинки із прикладанням різного гальмівного зусилля - від 2,0 до 8,0 МПа з шагом 2,0 МПа.

Надалі гальмівний диск нагрівався до 100 °С і загальмовувався до повної зупинки з постійним гальмівним зусиллям в 5,0 МПа з різних початкових швидкостей - від 40 до 140 км/год з шагом 20 км/год.

І на останок - гальмівний диск загальмовувався до повної зупинки з 100 км/год з постійним гальмівним зусиллям в 5,0 МПа при різній температурі - від 50 до 350 °С з кроком 50°С. Після цих трьох тестів проводився контрольний замір товщини фрикційного матеріалу гальмівної колодки.

На третьому етапі проводилася імітація руху автомобіля по гірському серпантину. Імітувався затяжний спуск (FADE): гальмівний диск загальмовувався зі швидкості 100 км/год до 50 км/год із постійним тиском в гальмівній системі в 5,0 МПа упродовж 45 с з 25-кратним повторенням процесу гальмування. Після природного охолодження дослідження повторювалися. Після двох циклів гальмування в режимі «гірський серпантин» замірялася товщина фрикційного матеріалу гальмівних колодок.

На четвертому етапі випробування проводилися за методикою випробувань другого етапу, з метою оцінки ефективності роботи гальмівної пари після змін, які вони набули в режимі гірського серпантину. Завершення етапу – заміри товщина фрикційного матеріалу гальмівних колодок та товщина гальмівного диска для перевірки ступеня його спрацювання.

При проведенні перших чотирьох етапів, температури фрикційних накладок гальмівних колодок вимірювалася за допомогою термопари, в об’ємі на відстані 2 мм від каркасу колодки. Відповідно в парі тертя температура була вищою приблизно на 200 °С.

На п’ятому етапі перевірялася міцність клейового з’єднання фрикційної накладки з основою гальмівної колодки. Випробуванню піддавалися нові гальмівні колодки, які не були використані на попередніх етапах випробовувань. Контрольним параметром виступала величина зусилля, при якому відбувався відрив фрикційного матеріалу від каркасу колодок (за нормативами ECE R90 (правило № 90 ЄЕК ООН) величина зусилля відриву повинна складати не менше – 5,0 МПа) [5].

В якості об’єкту дослідження були обрані гальмівні колодки передніх колісних гальмівних механізмів автомобіля Hyundai Accent. Гальмівні колодки різних виробників були придбані в магазинах автозапчастин роздрібної торгівельної мережі м. Кропивницький (по два комплекти кожного виробника).

Дослідження проводилися в спеціалізованій лабораторії на устаткуванні, що має сертифікат Держстандарту України. При випробуваннях були задіяні два випробувальні стенди.

Перший стенд оснащений гальмівним механізмом автомобіля Hyundai Accent (рис. 1), що складається з гальмівного супорта, гальмівного диска і двох гальмівних колодок, маховика із змінним моментом інерції (в даному випадку момент інерції відповідав моменту інерції автомобіля Hyundai Accent), електроприводу і контрольно-вимірювальної апаратури. На цьому стенді безпосередньо перевірялася ефективність роботи гальмівних колодок в різних режимах гальмування [6].

Рисунок 1 – Випробувальний стенд із гальмівним механізмом автомобіля Hyundai Accent
Джерело: розроблено авторами

На другому стенді визначалася межа міцності з'єднання гальмівної фрикційної накладки з каркасом гальмівної колодки.

В якості «контр-тіла» пари тертя для всіх гальмівних колодок були використані оригінальні гальмівні диски HYUNDAI 51712C8000 – саме такими дисками оснащуються автомобілі Hyundai Accent заводом-виробником.

Дослідженню піддавалися гальмівні колодки компаній-виробників TRW, BOSCH, YES-Q та HI-Q [6, 7 і 8]. Результати досліджень ефективності процесу гальмування пари тертя «гальмівний диск – гальмівна колодка» за першими чотирма етапами на основі оцінки величин гальмівних моментів представлені на (рис. 2 - рис. 9).

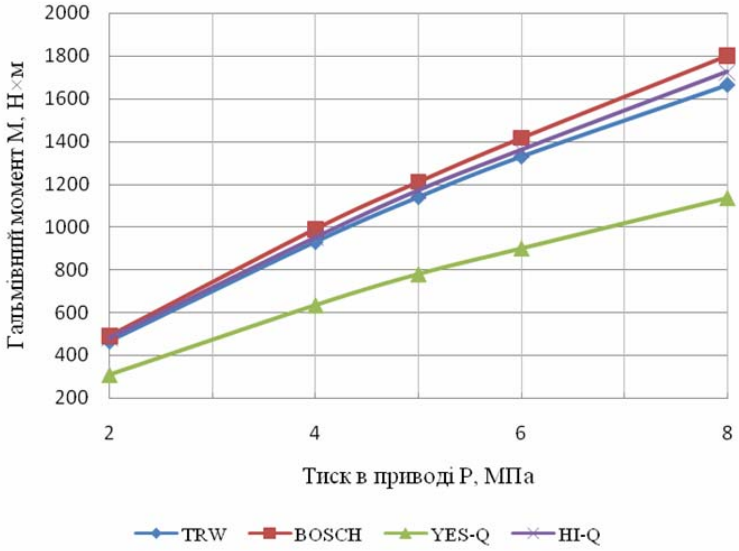


Рисунок 2 - Графік залежності усередненого гальмівного моменту в передніх робочих гальмівних механізмах автомобіля Hyundai Accent при різних марках гальмівних колодок від тиску в приводі гальмівної системи (до FADE).
Джерело: розроблене авторами

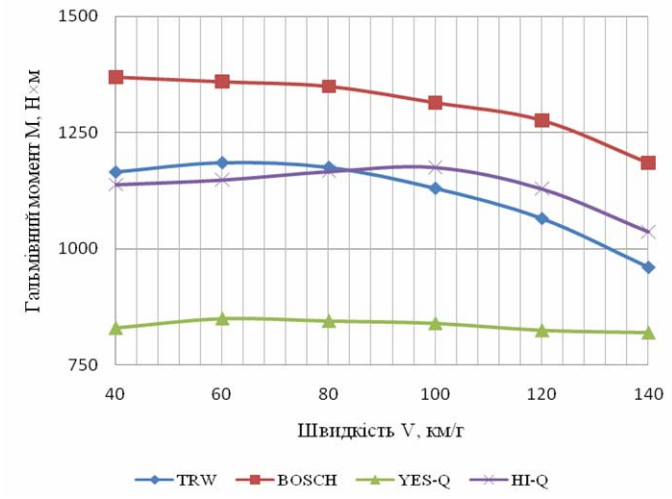


Рисунок 3 - Графік залежності усередненого гальмівного моменту в передніх робочих гальмівних механізмах автомобіля Hyundai Accent при різних марках гальмівних колодок від швидкості руху автомобіля (до FADE)

Джерело: розроблене авторами

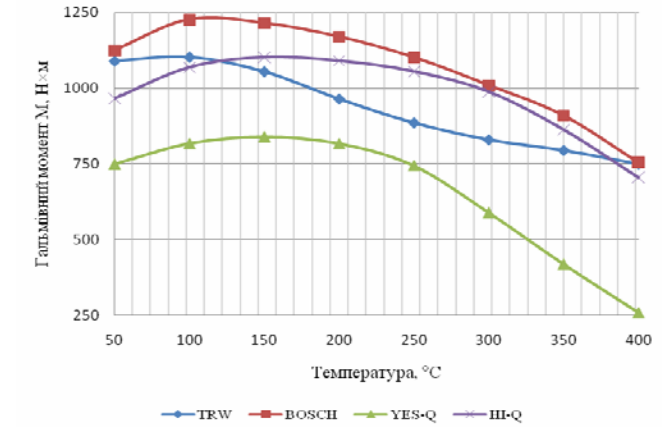


Рисунок 4 - Графік залежності усередненого гальмівного моменту в передніх робочих гальмівних механізмах автомобіля Hyundai Accent для різних марок гальмівних колодок від температури пари тертя (до FADE)

Джерело: розроблене авторами

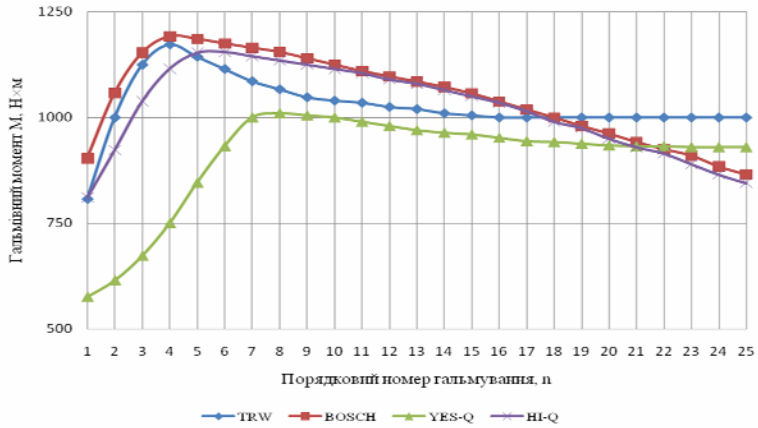


Рисунок 5 - Графік залежності усередненого гальмівного моменту в передніх робочих гальмівних механізмах автомобіля Hyundai Accent для різних марок гальмівних колодок від кількості гальмувань в тестовому випробуванні гірський серпантин (FADE, 1-й період) час циклу - 45 с; кількість циклів - 25

Джерело: розроблене авторами

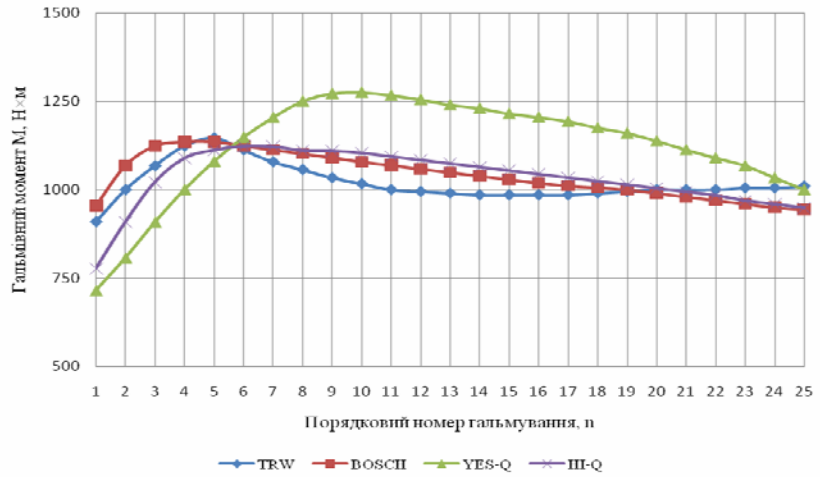


Рисунок 6 - Графік залежності усередненого гальмівного моменту в передніх робочих гальмівних механізмах автомобіля Hyundai Accent для різних марок гальмівних колодок від кількості гальмувань в тестовому випробуванні гірський серпантин (FADE, 2-й період) час циклу - 45 с; кількість циклів - 25

Джерело: розроблене авторами

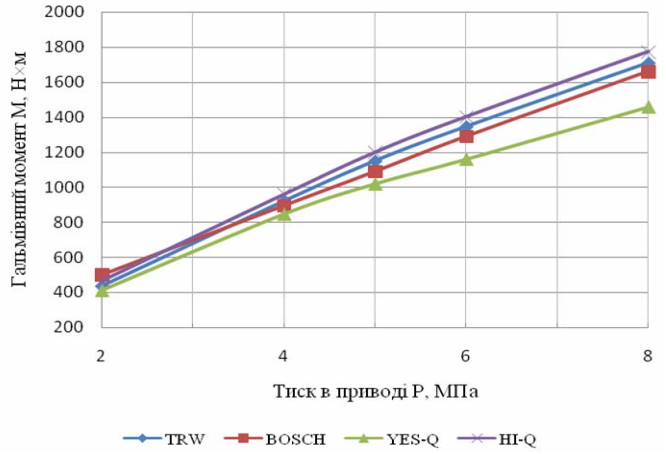


Рисунок 7 - Графік залежності усередненого гальмівного моменту в передніх робочих гальмівних механізмах автомобіля Hyundai Accent для різних марок гальмівних колодок від тиску в приводі гальмівної системи, після двох циклів «гірського серпантину» (після FADE)

Джерело: розроблене авторами

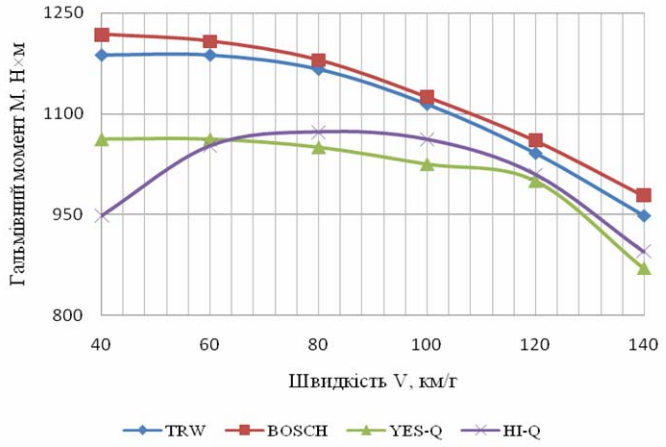


Рисунок 8 - Графік залежності усередненого гальмівного моменту в передніх робочих гальмівних механізмах автомобіля Hyundai Accent для різних марок гальмівних колодок від швидкості руху автомобіля, після двох циклів «гірського серпантину» (після FADE)

Джерело: розроблене авторами

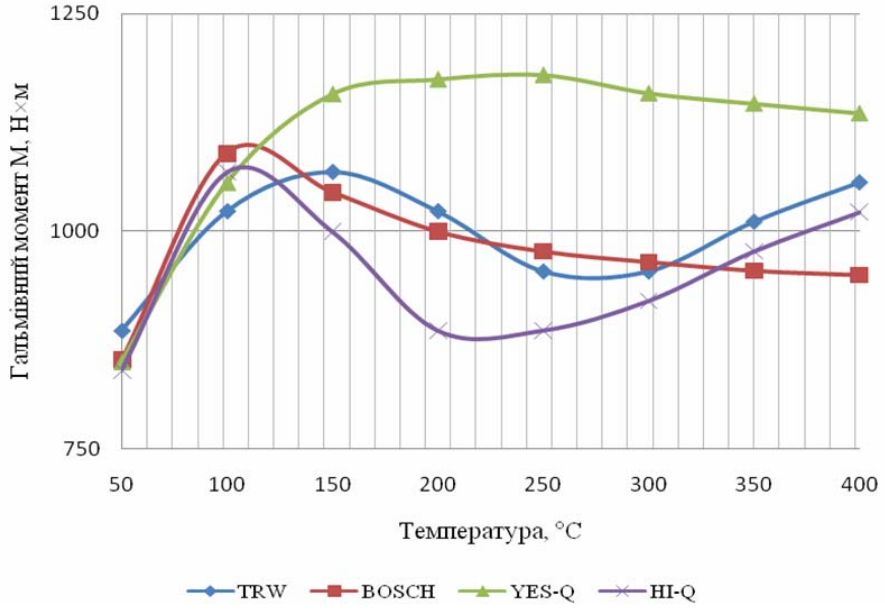


Рисунок 9 - Графік залежності усередненого гальмівного моменту в передніх робочих гальмівних механізмах автомобіля Hyundai Accent для різних марок гальмівних колодок від температури пари тертя, після двох циклів «гірського серпантину» (після FADE)

Джерело: розроблене авторами

Результати дослідження абсолютного і питомого спрацювання фрикційних накладок колодок і гальмівного диску наведені в табл.1.

Таблиця 1 – Результати тестування передніх гальмівних колодок для автомобіля Hyundai Accent

№ п/п	Колодки	Спрацювання колодок Δ, мм				Спрацювання диску, δ, мм.	Міцність з'єднання накладки з основою колодки, МПа	Вартість колодок, грн.
		до FADE	на FADE	після FADE	загальне			
1	TRW	0,07	0,24	0,16	0,47	0,005	8,0…9,0	546,0
2	BOSCH	0,05	0,18	0,19	0,42	0,009	6,1…7,4	640,0
3	YES-Q	0,01	0,09	0,04	0,14	0,004	6,0…6,4	572,0
4	HI-Q	0,08	0,13	0,09	0,30	0,011	5,3…7,6	435,0

Джерело: розроблене авторами

Аналіз наведених графіків (рис. 2 – рис. 9) та таблиці 1 дає підстави зробити наступні висновки, щодо ефективності роботи гальмівних колодок компаній-виробників TRW, BOSCH, YES-Q та HI-Q у парі із гальмівним диском HYUNDAI 51712C8000 автомобіля Hyundai Accent.

Передні колодки TRW GDB 893 практично за усіма параметрами показали середні результати за всім спектром вимірів. Якщо на першому етапі випробувань колодки TRW показують хороші результати і впевнено тримають третє місце, то на другому – третьому, їх показники характеризуються стабільністю й практично ідентичними результатами під час випробувань тривалим гальмуванням. При випробуваннях четвертого етапу – після режиму «гірському серпантину», ефективність показників гальмування цих колодок зростає, як в абсолютних показниках, так і відносних. До переваг гальмівних колодок TRW GDB 893 слід віднести загальну стабільність результатів на всіх етапах досліджень, високе положення в групі і відносно невисоку ціну. Експлуатаційними особливостями гальмівних колодок TRW є: порівняно тривалий період припрацювання до гальмівного диску, відносно швидке

спрацювання фрикційного матеріалу колодки та при цьому – незначне спрацювання поверхні гальмівного диску.

Гальмівні колодки BOSCH 0 986 461 127 на першому етапі випробувань показали хороші результати. За всіма показниками (передача зусилля з педалі гальма, зусилля на різних швидкостях, ефективність гальмування при різних температурах) вони були кращими. На першому етапі випробування затяжним спуском колодки BOSCH показують спочатку кращі результати, але поступово їх властивості погіршуються і вони опускаються на другу, а потім й на третю позицію. За характеристиками другого етапу «гірського серпантину» гальмівні колодки BOSCH мають найгірші показники серед всіх досліджуваних колодок. Це обумовлюється тим, що в абсолютних показниках гальмівний момент в парі тертя підвищився, а різкої зміни поведінки колодок не спостерігається, що є позитивним моментом і дозволяє водієві впевнено керувати автомобілем, не побоюючись непередбачуваної зміни поведінки гальмівної системи.

На четвертому етапі, після затяжного спуску, колодки BOSCH зберігають лідерство лише під час випробувань на швидкість. На всіх швидкостях вони забезпечують максимальне гальмівне зусилля. Нажаль за результатами температурних випробувань і досліджень залежності гальмівних зусиль від сили натискання на педаль гальма колодки цієї марки показали посередні результати.

В цілому ж, експлуатаційні характеристики гальмівних колодок BOSCH на всьому циклі випробувань досить стабільні із тенденцією до незначного зниження. Стабільність характеристик є суттєвою перевагою, що додатково забезпечує безпеку керування автомобілем, й не потребує від водія необхідності проведення адаптації власної методики гальмування. Нажаль, дослідження виявили й доволі суттєвий недолік - спрацювання колодок BOSCH виявилося одним з найвищих в тесті і склало 0,42 мм.

На першому етапі випробувань колодки YES-Q ESD 7052 показують найнижчий результат. Швидкісні випробування і передача гальмівного зусилля від гальмівної педалі на гальмівний диск - найнижчі, хоча і дуже стабільні показники; температурні випробування - найнижчі показники із загальним зниженням результатів після 250 ºС.

Характеристики змінюються після тривалої обкатки, тобто численних гальмувань. Під час дослідження видно, що властивості гальмівних колодок YES-Q стають кращими і тримають лідерство до кінця випробування (2-й період випробувань FADE). Тобто при спуску по гірській дорозі з великою кількістю гальмувань, колодки YES-Q справляються з своєю задачею дуже добре і після певного етапу стають кращими для виконання цього завдання. Змінюються і всі результати наступних досліджень. Підвищується ефективність передачі гальмівного зусилля, автомобіль починає краще зупинятися на різних швидкостях при роботі в різних температурних режимах колодки YES-Q мають найкращі характеристики серед всіх.

Загалом, колодки YES-Q - класичний приклад деталі, якій просто необхідна обкатка в екстремальному режимі. Тільки після великих навантажень вони починають вести себе в відповідності до визначених характеристик.

Спрацювання колодок YES-Q виявилося одним з найнижчих - всього 0,14 мм (максимальні величини зносу зафіксовані перевищили цей показник більше ніж у 3 рази), відмічено також і найменше спрацювання гальмівного диску.

Гальмівні колодки HI-Q SP 1186 в цілому показали хороший результат у більшості випробуваннях, займаючи позиції вище середнього по тестовій групі.

На першому етапі випробувань гальмівні колодки HI-Q показують хороші результати по передачі гальмівного зусилля і стійкості до різних температур.

Швидкісні випробування не настільки однозначні: якщо на невисоких швидкостях ефективність гальмування має третє місце, то після 85 км/год колодки HI-Q виходять на друге місце, а на високих швидкостях, вище 120 км/год поступаються лише лідеру. На першому та другому етапах режиму «гірського серпантину» зафіксовано стабільність результатів досліджень.

Після «гірської дороги» гальмівні колодки HI-Q ще краще реагують на натиснення педалі гальма, виходять за цим показником на третє місце і покращують результат при високих температурах. У швидкісному випробуванні, навпаки, злегка погіршують абсолютні показники, але залишаються стабільними на швидкостях від 70 до 100 км/год, далі трохи знижуються.

Якщо аналізувати поведінку колодок HI-Q в цілому, то можна відзначити загальну стабільність результатів всередині одного випробування, і не дуже сильні зміни поведінки на початку і кінці тестування. Немає чітко виражених зон, де колодки мають різке зниження показників, що говорить про передбачуваність їх поведінки.

Спрацювання гальмівних колодок HI-Q при значенні 0,30 мм виявилося середнім по групі. А ось спрацювання гальмівного диску одне з найвищих в тесті - 0,011 мм.

Висновки. Всі гальмівні колодки, які досліджувались не спричиняли погіршення акустичної складової процесу гальмування: скрипів, писків і інших шумів не виявлено. Під час дослідження на міцність з’єднання накладок з основами гальмівних колодок показники зчіпних властивостей фрикційних накладок всіх гальмівних колодок вище нормативних значень.

Найбільш стабільними за всім циклом випробувань виявилися колодки марки BOSCH, але в той же час вони доволі інтенсивно зношують гальмівний диск і коштують найдорожче серед всіх колодок, які приймали участь в дослідженні. Найбільше спрацьовують гальмівний диск колодки фірми HI-Q.

Колодки від фірми Yes-Q за даними випробувань мають найбільший термін експлуатації. Вони найменше зношують гальмівний диск, але при цьому їм потрібно більше часу на припрацювання для виходу на загальний рівень ефективності гальмування.

Із урахуванням вартості і особливостей поведінки доцільними слід вважати наступні характеристики і рекомендації:

- гальмівні колодки фірми TRW дуже м’які, мало зношують диск – 0,005 мм, але швидко спрацьовуються самі – 0,47 мм. При цьому показують хороші результати за гальмівними моментами в різних умовах і мають низьку вартість. Гарні в будь-яких умовах, причому характеристики поліпшуються із напрацюванням;
- гальмівні колодки фірми BOSCH найбільш стабільні за показниками гальмування на всіх режимах, але при цьому мають високі показники вартості, швидко спрацьовуються самі – 0,42 мм й активно зношують гальмівний диск – 0,09 мм. Доцільними до використання є в місцевостях і умовах, де стабільність гальмівних характеристик важливіше збільшених витрат. Рекомендуються при експлуатації автомобілів в гористій місцевості із частими затяжними спусками та високими швидкостями руху;
- гальмівні колодки фірми Yes-Q мають не надто високу вартість, характеризуються невеликим власним спрацюванням – 0,14 мм і спрацюванням гальмівного диску – 0,004 мм. До недоліків слід віднести тривалість припрацювання. Встановлюючи нові колодки даної марки потрібно їздити обережно, пам’ятаючи про їх особливості. Особливо рекомендуються до використання на гірських місцевостях;

- гальмівні колодки фірми HI-Q швидко спрацьовуються – 0,3 мм, але матеріал з якого вони виготовлені інтенсивно зношує диск – 0,011 мм. В іншому показники хороші, хоча й не найкращі. Із врахуванням невисокої ціни можна рекомендувати для більшості умов експлуатації.

Список літератури

1. Бевз О.В., Магопець С.О., Якимаха Д.А. Дослідження надійності роботи переднього гальмівного механізму автомобіля Renault. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету*, Кіровоград: КНТУ. 2013. Вип. 26. С. 112-116.
2. Косёнков А.А. Устройство тормозных систем иномарок и отечественных автомобилей. Учебное пособие. Издательство: «Феникс». 2003. 224 с.
3. А. А. Кашканов, В. М. Ребедайло, В. А. Кашканов. Оцінка експлуатаційних гальмових властивостей автомобілів в умовах неточності вихідних даних: монографія. Вінниця: ВНТУ. 2010. 148 с.
4. ГОСТ Р 41.90-99 (Правила ЕЭК ООН N 90) Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения сменных тормозных накладок в сборе и накладок барабанных тормозов для механических транспортных средств и их прицепов. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2001. 28 с.
5. ДСТУ UN/ECE R 90-01:2005. Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження змінних гальмових накладок у зборі і гальмових накладок барабанних гальмових механізмів колісних транспортних засобів та їхніх причепів. [Чинний від 2006-07-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2007. 29 с. (Національний стандарт України).
6. Журнал «АвтоДела»: информационный сайт журнала. URL: https://www.autodela.ru (дата обращения: 20.03.2019).
7. Белоглядова М. Сравнительный тест корейских тормозных колодок. *Кузов:* веб-сайт журнала. URL: https://kuzov-media.ru/articles/sravnitelnyy_test_koreyskikh_tormoznykh_kolodok.html (дата обращения: 20.03.2019).
8. Авто портал Татарстана: информационный сайт. URL: http://tavto.ru/news/test-tormoznyh-kolodok-dlya-bestsellerov-ot-hyundai-accent (дата обращения: 07.11.2018).

References

1. Bevz, O.V., Mahopets', S.O. & Yakymakha, D.A. (2013). Doslidzhennia nadijnosti roboty peredn'oho hal'mivnoho mekhanizmu avtomobilia Renault [Research of reliability of work of front brake mechanism of car Renault.]. *Tekhnika v sil's'kohospodars'komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia. Zbirnyk naukovykh prats' Kirovohrads'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu – Machinery in agricultural production, industry machine building, automation. Collected works of Kirovohrad national technical university*, *Vol. 26*, 112-116
2. Kosjonkov, A.A. (2003). *Ustrojstvo tormoznyh sistem inomarok i otechestvennyh avtomobilej [The device brake systems for cars and domestic cars]*. Izdatel'stvo: «Feniks» [in Russian].
3. Kashkanov, A.A., Rebedajlo, V.M. & Kashkanov, V. A. (2010). *Otsinka ekspluatatsijnykh hal'movykh vlastyvostej avtomobiliv v umovakh netochnosti vykhidnykh danykh [Estimation of operational braking properties of cars in the conditions of inaccuracy of the initial data]*. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
4. Edinoobraznye predpisanija, kasajushhiesja oficial'nogo utverzhdenija smennyh tormoznyh nakladok v sbore i nakladok barabannyh tormozov dlja mehanicheskih transportnyh sredstv i ih pricepov [Uniform requirements concerning the approval of replacement brake lining assemblies and drum brake linings for motor vehicles and their trailers]. *GOST R 41.90-99 (Rules UN/ECE N 90).* Moskow: IPK Izdatel'stvo standartov [in Russian].
5. DSTU UN/ECE R 90-01:2005. Yedyni tekhnichni prypysy schodo ofitsijnoho zatverdzhennia zminnykh hal'movykh nakladok u zbori i hal'movykh nakladok barabannykh hal'movykh mekhanizmiv kolisnykh transportnykh zasobiv ta ikhnikh prychepiv [Uniform requirements concerning the approval of replacement brake lining assemblies and drum brake linings for motor vehicles and their trailers]. *DSTU UN/ECE R 90-01:2005.* [Chynnyj vid 2006-07-01]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
6. Zhurnal «AvtoDela»: informacionnyj sajt zhurnala [Journal «Avtodela». Information site journal]. *autodela.ru.* Retrieved from https://www.autodela.ru [in Russian].

7. Belogljadova, M. Sravnitel'nyj test korejskih tormoznyh kolodok. Kuzov: veb-sajt zhurnala [Comparative test of Korean brake pads. Body: magazine website]. *kuzov-media.ru.* Retrieved from https://kuzov-media.ru/articles/sravnitelnyy_test_koreyskikh_tormoznykh_kolodok.html [in Russian].
8. Avto portal Tatarstana: informacionnyj sajt [Auto portal of Tatarstan: information site]. *tavto.ru*. Retrieved from http://tavto.ru/news/test-tormoznyh-kolodok-dlya-bestsellerov-ot-hyundai-accent [in Russian].

Oleg Bevz, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Sergii Magopets,** Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Oleksandr Matviienko,** Assoc. Prof., PhD tech. sci
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

The Study of the Reliability of the Brake Mechanism of the Car Hyundai Accent

In hired the results of researches of efficiency of work in the laboratory terms of pair of friction are pointed - a «brake disk is a skid».

On the basis of results of the conducted researches of work of pair of friction - a «brake disk is a skid» taking into account different terms works after completion of all researches an estimation was conducted absolute and specific wear of brake pads.

At this stand, the performance of all the pads in various braking modes was directly verified

The studies were conducted on a special stand using the natural brake assembly of the car Hyundai Accent.

All the pads that were examined did not detect scratches, squeaks and other noises. During the study on the strength of the connection lining with the base of the pad indicators were higher than the norm.

TRW. Boots are very soft, wear out a little disc, but they work quickly. It shows good results for brake moments in different conditions and is relatively inexpensive for such behavior. Good in all conditions, and the characteristics are improved with time.

BOSCH. The most stable indicators of braking in all modes, but they are expensive, quickly operate themselves and actively wear the disk. Suitable for experienced drivers in areas and conditions where stability of brake performance is more important than increased costs. Recommended for drivers who love speed and live in highland areas and often face protracted descents.

Yes- Q. Adjustable pads, not too high cost, a little work and keep the disc off the trigger. From the minus the duration of spin. When installing new pads you need to drive carefully, remembering their features. Especially recommended for use in mountainous areas.

HI-Q. Pretty solid pads and intensively wear out the disk. Other indicators are decent, although not the best. Taking into account the low prices, it is possible to recommend absolutely to all drivers who adhere to the rules of the traffic and high-speed modes.

However, each owner has the right to decide which pads he will install on his car Hyundai Accent.

skids, brake disk, temperature, specific wear

Одержано (Received) 21.05.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 24.05.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО, ТЕРМІЧНА ТА ФІЗИКО-ТЕХНІЧНА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.891 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).79-86

В.М. Кропівний, проф., канд. техн. наук, **М.В. Босий,** ст. викл., **О.В. Кузик,** доц., канд. техн. наук, **А.В. Кропівна,** доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, e-mail: Kuzykov1985@gmail.com

Термодинамічні процеси при кристалізації і формуванні ліквації у виливках з високоміцного чавуну

В статті наведено розрахунок коефіцієнтів міжфазового розподілу кремнію та марганцю між аустенітом та рідкою фазою сплаву. Одержана залежність взаємозв'язку коефіцієнта розподілу третього елемента X_i зі зміною температури аустенітно-графітної евтектики для систем Fe-C-X_i (X_i =Mn, Si). Показано, що кремній концентрується в аустеніті та ліквує в центр дендриту. При цьому марганець концентрується в рідині та ліквує на периферію дендрита. Обґрунтовано роль зміни енергії Гіббса в перерозподілі кремнію та марганцю між рідиною і аустенітом. Виявлено, що елементом насичується та фаза, енергія Гіббса якої від домішки елемента зменшується сильніше. Зазначене призводить до зменшення енергії Гіббса всієї системи та визначає величину коефіцієнта розподілу кремнію та марганцю між фазами.
високоміцний чавун, кулястий графіт, кристалізація, ліквація, фаза, розподіл

В.Н. Кропивный, проф., канд. техн. наук, **Н.В. Босый,** ст.препод., **А.В. Кузык,** доц., канд. техн. наук, **А.В. Кропивная,** доц., канд. техн. наук
Кировоградский национальный технический университет г. Кропивницкий, Украина

Термодинамические процессы при кристаллизации и формировании ликвации в отливках из высокопрочного чугуна

В статье приведен расчет коэффициентов межфазного распределения кремния и марганца между аустенитом и жидкой фазой сплава. Полученна зависимость взаимосвязи коэффициента распределения третьего элемента Xi с изменением температуры аустенитно-графитной эвтектики для систем Fe-C-Xi (Xi = Mn, Si). Показано, что кремний концентрируется в аустените и ликвирует в центр дендритов. При этом марганец концентрируется в жидкости и ликвирует на периферию дендрита. Обоснована роль изменения энергии Гиббса в перераспределении кремния и марганца между жидкостью и аустенита. Выявлено, что элементом насыщается фаза, энергия Гиббса которой от примеси элемента уменьшается сильнее. Указанное приводит к уменьшению энергии Гиббса всей системы и определяет величину коэффициента распределения кремния и марганца между фазами.
высопрочный чугун, шаровидный графит, кристаллизация, ликвация, фаза, распределение

Постановка проблеми. Насьогодні, незважаючи на інтенсивний розвиток різноманітних композиційних матеріалів, серед конструкційних матеріалів, чавун продовжує зберігати провідне положення. Широке застосування високоміцних чавунів для деталей машин та механізмів обумовлено підвищеним комплексом властивостей, які формують за рахунок компактної форми графітних включень, легування та термічної обробки. Проте введення будь-якого легуючого елемента змінює термодинамічні умови кристалізації та створення фаз.

© В.М. Кропівний, М.В. Босий, О.В. Кузик, А.В. Кропівна, 2019

Складний комплекс фізико-хімічних процесів, які відбуваються при графітизації високоміцного чавуну, не дають дослідникам досягти єдиної точки зору щодо механізму формування включень кулястої та компактної форм графіту. Поєднання кількох десятків різнобічних гіпотез утворення кулястого графіту та сучасні можливості комп'ютерного моделювання не привели до загальноприйнятого теоретичного пояснення явищ, які протікають. Розкриття механізму процесів формування кулястого графіту сприятиме відкриттю широких можливостей управління структурою і властивостями високоміцного чавуну, що дозволить розробляти ефективні технологічні процеси для отримання литих виробів різного призначення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно робіт [1, 2], при кристалізації і затвердіванні високоміцного чавуну, виникає хімічна неоднорідність сплаву – зональна та дендритна ліквація, особливо таких елементів, як вуглець, кремній та марганець.

До цього часу у дослідників відсутня єдина точка зору на механізм формування включень кулястої та компактної форм графіту. У високоміцному чавуні розглядаються два можливі варіанти зростання включень: при збереженні контакту з розплавом у процесі твердіння чавуну, або за рахунок дифузії вуглецю через аустенітну оболонку. На думку авторів робіт [3, 4] формування включень компактної форми графіту в процесі евтектичної кристалізації відбувається завдяки дифузії вуглецю через аустенітну оболонку.

Проведені розрахунки в роботах [3, 4] підтверджують достатність часу протікання евтектичної кристалізації модифікованого розплаву для дифузійного росту компактних включень. Зазначається, що провідну роль в процесах формування графіту при кристалізації чавунів відіграють умови теплопередачі від поверхонь на фронтах кристалізації, на яких відбуваються екзотермічні реакції з кристалізації аустеніту та виділенні графіту з рідкого чи твердого розчину вуглецю в залізі. Тому, виділене тепло може значно впливати на розвиток дифузійних та ліквацiйних процесів.

Постановка завдання. Метою даної роботи є уточнення ролі врахування енергії Гіббса при кристалізації і формуванні ліквації у модифікованому високоміцному чавуні.

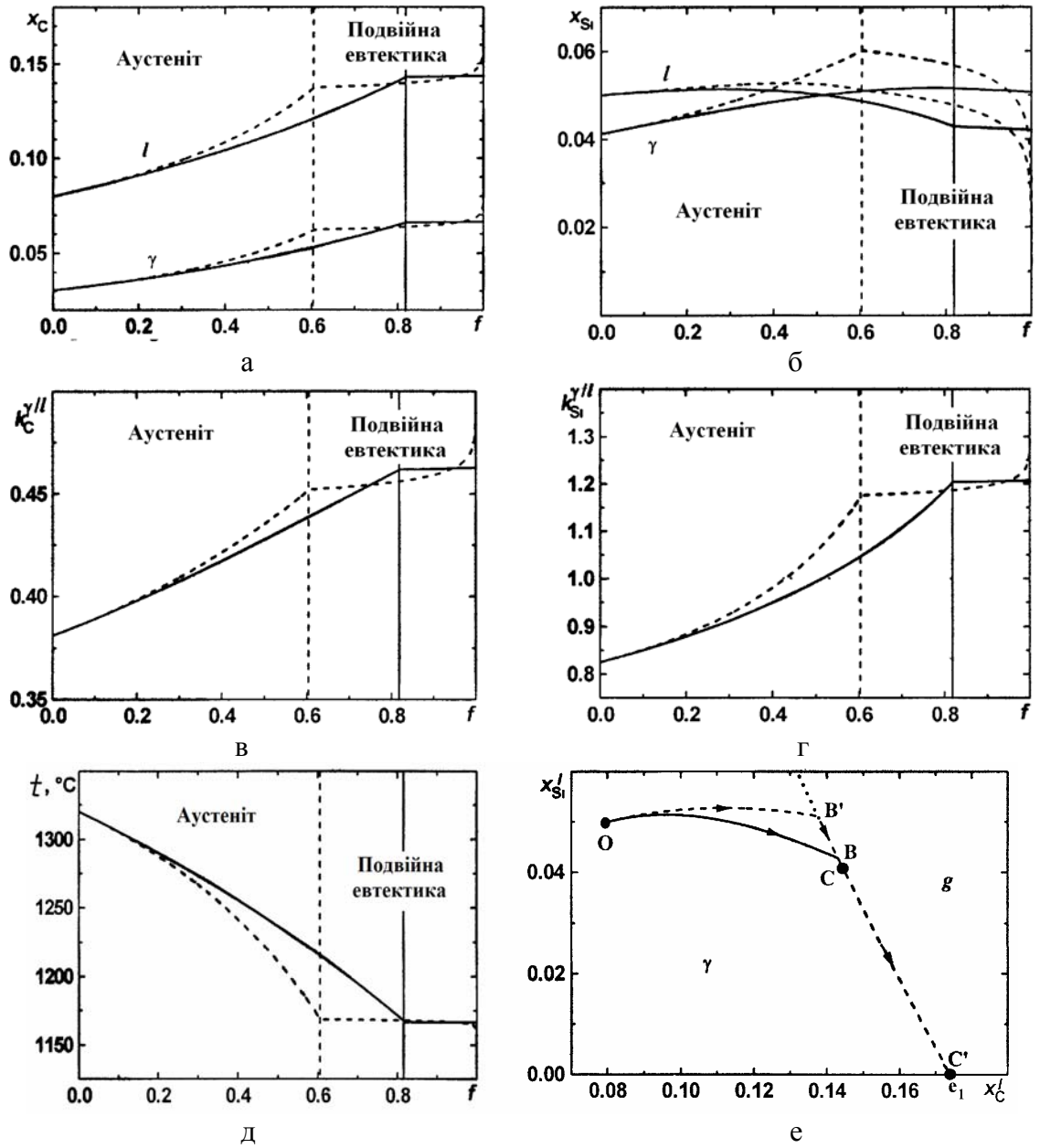
Виклад основного матеріалу. Відомо, що явища ліквації при кристалізації Fe-C сплавів впливають на зміну концентраційно-температурних умов утворення надлишкових і евтектичних фаз і їх кількісні співвідношення. В процесі евтектичного перетворення здійснюється перехід від стабільного до метастабільного виникнення нерівноважних фаз і різних структурних модифікацій евтектики. Слід зазначити, що після затвердіння, хімічна неоднорідність відбивається на структурно-кінетичних особливостях розпаду переохолодженого аустеніту.

Кристалізація гілок дендритів аустеніту у доевтектичному чавуні формується з концентрацією вуглецю нижчою за його вміст у розплаві і, відтісняючи вуглець, вони пересичують цим елементом міждендритні зони. В залежності від хімічного складу розплаву та характеру його модифікування на цих ділянках формуються графітні включення відповідної компактності. Мікрорентгеноспектральні дослідження свідчать, що для ділянок аустеніту, які затвердівали першими, характерним є підвищений вміст кремнію і формування при наступному евтектоїдному перетворенні зерен фериту [5].

Складний комплекс фізико-хімічних процесів, які відбуваються при графітизації високоміцного чавуну, припускає поєднання обох варіантів росту включень кулястого графіту. За рахунок виділення і росту графітного включення аустеніт, що оточує його, збіднюється вуглецем і збагачується, сформована на перших етапах кристалізації фаза, кремнієм. Аустеніт, що формується на міжзеренних ділянках, містить підвищений вміст вуглецю, марганцю і хрому та знижену кількість кремнію, у порівнянні з навколографітними ділянками. Це визначає формування у литому стані ферито -

перлітну структуру металевої основи. Ферит переважно розташовується закономірно у вигляді оторочок навколо графітних включень, що формує навколо групи включень кулястого графіту феритні ділянки. За рахунок ліквацiйних процесів на збагачених вуглецем і марганцем границях евтектичних зерен формуються перлітні ділянки. Розподіл кремнію відповідає зворотній ліквації зі збагаченням центральних частин евтектичного зерна навколо графітних включень.

Відомі залежності складу фаз, коефіцієнтів розподілу і температури від кількості виділеної твердої фази і ходу кристалізації в рівноважних і нерівноважних умовах [6], дають можливість виявити особливості кристалізації сплаву Fe-C (рис. 1).



О – початковий склад сплаву; В (В') – початок кристалізації евтектики; С (С') – закінчення кристалізації сплаву, концентрація елементів в графіті умовно не показана

Рисунок 1 – Зміна складу фаз x_C та x_{Si} (а, б), коефіцієнтів розподілу k_C і k_{Si} (в, г) і температури (д), а також хід кристалізації сплаву в проекції на поверхню ліквідусу (е) при рівноважній (суцільні лінії) і не рівноважній (штрихові лінії) кристалізації сплаву системи Fe-C-Si (8% ат. C, 5% ат. Si)

Джерело: використано [6]

Кристалізація сплаву Fe-C (рис. 1) в рівноважних умовах супроводжується виділенням з розплаву первинної фази – аустеніту (рис. 1, е, ділянка OB) та зміною концентрації C, Si (рис. 1, а, б) в ньому зі збільшенням кількості твердої фази, при цьому в рідині відбувається накопичення C (рис. 1, а). Слід зазначити, що коефіцієнт розподілу при цьому дещо зростає, залишаючись меншим одиниці (рис. 1, в). Вміст Si в рідині зростає до 28 % твердої фази, а потім починає знижуватися (рис. 1, б), що обумовлене істотною швидкістю зростання коефіцієнта розподілу від 0,83 до 1,2 (рис. 1, г) і кристалізацією аустеніту, більш багатого Si, ніж рідина. Виділення 82% первинного аустеніту відбувається при повільному зменшенні температури зі значенням 1320 ºC до 1167 ºC (рис. 1, д). При досягненні складом рідини подвійної евтектики (точка B на рис. 1, е) разом з аустенітом починає виділятися графіт, що відбувається при практично незмінному складі фаз (рис. 1, а, б), значень коефіцієнтів розподілу (рис. 1, в, г) і температури (рис. 1, д). Завершується кристалізація сплаву в точці C (рис. 1, е) на лінії подвійної евтектики до моменту повного зникнення рідкої фази.

Кристалізація сплаву Fe-C при нерівноважних умовах (штрихові лінії OB'C' на рис. 1, е) призводить до зниження температури (рис. 1, д) і росту коефіцієнтів розподілу елементів (рис. 1, в, г), виділенню первинного аустеніту, більш багатого C і Si, ніж в рівноважних умовах (рис. 1, а, б). Спостерігається велика неоднорідність в розподілі Si в аустеніті. Більш збагачені кремнієм кристалізуються початкові виділення аустеніту навколо графіту. При такій зміні концентрації Si відбувається накопичення C в рідини і аустеніті (рис. 1, а), в результаті при кристалізації останніх порцій рідини знижується температура до значення евтектичної точки в подвійній системі Fe-C (рис. 1, д), і сплав завершує свою кристалізацію при цій температурі в точці C' (рис.1, е).

При нерівноважній кристалізації виникає значна різниця по концентрації елементів в твердій фазі на початку і при завершенні її кристалізації, тобто розвивається ліквацийна неоднорідність розподілу елемента в твердій фазі. При нерівноважній кристалізації первинного аустеніту спостерігається значна ліквація розчинених в ньому елементів.

При дослідженні взаємозв'язку коефіцієнта розподілу малої кількості (1% ат.) третього елемента між аустенітом і рідиною $k_X^{\gamma/l}$ зі зміною температури аустенітно-графітної евтектики для двох потрійних систем Fe-C-Xi (Xi = Mn, Si) отримана залежність коефіцієнта розподілу елементів чавуну між аустенітом і рідиною з відносною зміною енергії Гіббса фаз (рис. 2) [6].

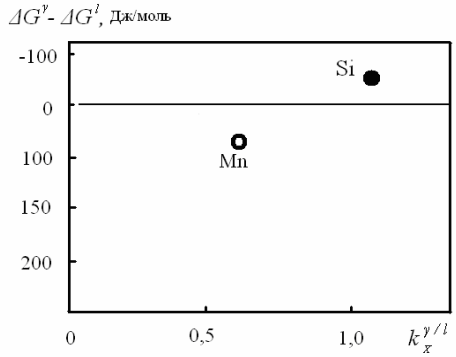


Рисунок 2 – Графічне відображення зв'язку коефіцієнта розподілу елементів чавуну між аустенітом і рідиною з відносною зміною енергії Гіббса фаз при наявності 1% ат. третього елемента у сплаві Fe-C

Джерело: розроблено автором на підставі [6]

Показано, що зміна енергії Гіббса аустеніту і рідини для кремнію та марганцю дорівнює ΔG^{γ}-ΔG^{l}=-50Дж/моль та ΔG^{γ}-ΔG^{l}=70 Дж/моль відповідно. Слід зазначити, що більш відносна зміна енергії Гіббса аустеніту і рідини призводить до більшої відмінності концентрації в них третього елемента, тобто збільшенню різниці $|k_X - 1|$.

Згідно з методикою розрахунку нерівномірності міжфазового розподілу кремнію та марганцю між аустенітом та рідиною [7], проведені оцінки відповідних коефіцієнтів розподілу. Одержано залежність взаємозв'язку коефіцієнта розподілу третього елемента між аустенітом і рідиною $k_X^{\gamma/l}$ зі зміною температури аустенітно-графітної евтектики для потрійних систем Fe-C-Xi (Xi =Mn, Si).

Коефіцієнт розподілу Si між аустенітом та рідиною дорівнює:

$$k_{\mathrm{Si}}^{\gamma/l} = \frac{X_{\mathrm{Si(A)}}}{X_{\mathrm{Si(ч)}}} = \frac{1{,}39}{1{,}27} = 1{,}10\,, \tag{1}$$

де $X_{\mathrm{Si(A)}} = 1{,}39$ – концентрація Si в аустеніті; $X_{\mathrm{Si(ч)}} = 1{,}27$ – середня концентрація Si в чавуні.

Коефіцієнт розподілу Mn між аустенітом та рідиною дорівнює:

$$k_{\mathrm{Mn}}^{\gamma/l} = \frac{X_{\mathrm{Mn(A)}}}{X_{\mathrm{Mn(ч)}}} = \frac{0{,}75}{1{,}07} = 0{,}70\,, \tag{2}$$

де $X_{\mathrm{Mn(A)}} = 0{,}75$ – концентрація Mn в аустеніті; $X_{\mathrm{Mn(ч)}} = 1{,}07$ – середня концентрація Mn в чавуні.

Коефіцієнт ліквації оцінює степінь внутрішньо-кристалічної ліквації кремнію і марганцю в аустеніті.

Коефіцієнт ліквації Si в аустеніті дорівнює:

$$k_{\mathrm{Si}}^{\gamma} = \frac{X_{Si\mathrm{(A)}}^{0}}{X_{\mathrm{Si(A)}}^{n}} = \frac{1{,}39}{1{,}21} = 1{,}15\,, \tag{3}$$

де $X_{\mathrm{Si(A)}}^{0} = 1{,}39$ – концентрація Si в дендритних гілках; $X_{\mathrm{Si(A)}}^{n} = 1{,}21$ – концентрація Si в периферійних ділянках.

Коефіцієнт ліквації Mn в аустеніті дорівнює:

$$k_{\mathrm{Mn}}^{\gamma} = \frac{X_{\mathrm{Mn(A)}}^{0}}{X_{\mathrm{Mn(A)}}^{n}} = \frac{0{,}75}{1{,}00} = 0{,}75\,, \tag{4}$$

де $X_{\mathrm{Mn(A)}}^{0} = 0{,}75$ – концентрація Mn в дендритних гілках; $X_{\mathrm{Mn(A)}}^{n} = 1{,}00$ – концентрація Mn в периферійних ділянках.

Показано, що кремній з коефіцієнтом розподілу між аустенітом та рідиною $k_{\mathrm{Si}}^{\gamma/l} = 1{,}10$ концентрується в аустеніті, а коефіцієнт ліквації його в аустеніті становить $k_{Si}^{\gamma} = 1{,}15$, тому Si ліквує в центр дендриту. Марганець з коефіцієнтом розподілу між аустенітом та рідиною $k_{\mathrm{Mn}}^{\gamma/l} = 0{,}70$ концентрується в рідині, при цьому коефіцієнт ліквації його в аустеніті становить $k_{\mathrm{Mn}}^{\gamma} = 0{,}75$ і Mn ліквує на периферію дендрита.

Відомо, що при евтектичній температурі в подвійній системі Fe-C в рівновазі знаходяться аустеніт, рідина і графіт, при цьому $\mu_{\mathrm{Fe}}^{\gamma} = \mu_{\mathrm{Fe}}^{l}$ та $\mu_{\mathrm{C}}^{\gamma} = \mu_{\mathrm{C}}^{l} = \mu_{\mathrm{C}}^{g}$ (рис. 3, а) [6, 8, 9].

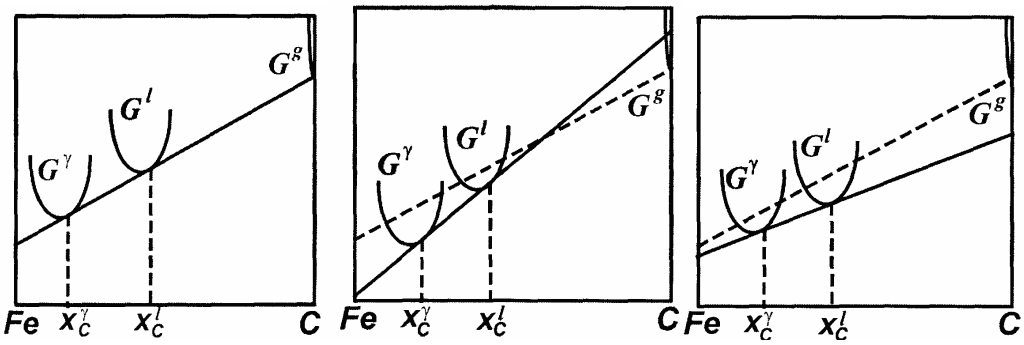


Рисунок 3 – Схема зміни енергії Гіббса фаз у сплаві Fe-C (а), та при наявності елемента з $k_X > 1$ (б) або $k_X < 1$ (в)

Джерело: використано [6,8,9]

Зазначимо, що похилі пунктирні лінії на рисунку 3 (б) та 3 (в) показують положення дотичної на рис. 3 (а) та спрямовані аналогічно. Аналіз поведінки термодинамічних характеристик фаз при наявності у сплаві Fe-C третього елемента показав, що незмінна температура рівноваги призводить до зменшення енергії Гіббса аустеніту і рідини, враховуючи, що графіт не розчиняє домішок (рис. 3). Кремній у сплаві Fe-C сильніше зменшує енергію Гіббса аустеніту (рис.3, б), а марганець сильніше зменшує енергію Гіббса рідини (рис. 3, в).

Такий характер зміни енергії Гіббса обумовлює направлення перерозподілу елемента між рідиною і аустенітом: елементом насичується та фаза, енергія Гіббса якої від домішки елемента зменшується сильніше, що призводить до зменшення енергії Гіббса всієї системи, та визначає величину коефіцієнта розподілу елемента між фазами ($k_X > 1$ або $k_X < 1$).

Перерозподіл третього елемента відбувається при досягненні рівності $\mu_X^\gamma = \mu_X^l$, так як рушійною силою дифузії є різниця хімічних потенціалів елемента у фазах. В результаті перерозподілу третього елемента між фазами змінюються хімічні потенціали μ_C^γ і μ_C^l, порушуються рівності $\mu_{Fe}^\gamma = \mu_{Fe}^l$ та $\mu_C^\gamma = \mu_C^l = \mu_C^g$. Якщо відновлення рівності $\mu_{Fe}^\gamma = \mu_{Fe}^l$ та $\mu_C^\gamma = \mu_C^l$ можливе (частково) за рахунок дифузії, то рівність $\mu_C^l = \mu_C^g$ може бути знову досягнута тільки при зміні температури. Для елементів з $k_X > 1$ виявляється, що $\mu_C^l > \mu_C^g$ (рис. 3, б), а при $k_X < 1$ буде $\mu_C^l < \mu_C^g$ (рис. 3, в). Такі співвідношення у фазах диктують зміну температури евтектичного перетворення: при підвищенні температури енергія Гіббса знижується, при зниженні температури – збільшується.

Таким чином, згідно термодинаміки рівноваги фаз кремній сильніше зменшує енергію Гіббса аустеніту, а марганець – енергію Гіббса рідини. Характер зміни енергії Гіббса обумовлює направлення перерозподілу Si і Mn між рідиною і аустенітом, відповідно кремнієм або марганцем насичується та фаза, енергія Гіббса якої від одного з даних елементів зменшується сильніше. Співвідношення між хімічними потенціалами вуглецю у фазах диктують зміну температури евтектичного перетворення, а саме, для елементів з kX>1 температура евтектичного перетворення повинна підвищуватися, а з kX<1 − знижуватися, така зміна температури обумовлює зміну склад фаз, що призведе до виконання умов рівноваги фаз при наявності третього елемента.

Висновки.

1. Проведено розрахунок коефіцієнтів міжфазового розподілу кремнію та марганцю між аустенітом та рідиною та одержана залежність взаємозв'язку коефіцієнта

розподілу третього елемента зі зміною температури аустенітно-графітної евтектики для двох потрійних систем Fe-C-X_i (X_i =Mn, Si).

2. Виявлено, що характер зміни енергії Гіббса обумовлює направлення перерозподілу кремнію та марганцю між рідиною і аустенітом. Кремнієм або марганцем насичується та фаза, енергія Гіббса якої від одного з даних елементів зменшується сильніше.

3. Показано, що кремній концентрується в аустеніті, та ліквує в центр дендриту при цьому марганець концентрується в рідині, та ліквує на периферію дендрита.

Список літератури

1. Воздвиженский В. В., Грачов В.А., Спасский В.В. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении : учеб. пособие. Москва: Машиностроение. 1984. 432с.
2. Любченко А.П. Высокопрочные чугуны. Москва: Металлургия. 1982. 120 с.
3. G. Alonso, D. M. Stefanescu, P. Larrañaga & R. Suarez Understanding compacted graphite iron solidification through interrupted solidification experiments. *International Journal of Cast Metals Research* . 2016. Vol. 29, Issue 1-2. Pp. 2-11.
4. Андреев В.В. Физико-химические основы формирования включений графита в высокопрочных чугунках. *Вестник МГТУ им. Г. И. Носова*. 2011. № 1. С.16-22.
5. Роль теплофізичних процесів формування структури високоміцних чавунів / В.В. Аулін, В.М. Кропівний, А.В. Кропівна, М.В. Босий, О.В. Кузик. *Вісник інженерної академії України*. 2017. №3. С.133-137.
6. Голод В.М., Савельев К.Д. Вычислительная термодинамика в материаловедении: учеб. пособие . СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2010. 217 с.
7. Бунин К.П., Таран Ю.Н. Строение чугунка. Серия «Успехи современного металловедения». Москва: Металлургия. 1972. 160 с.
8. Баландин Г.Ф., Васильев В.А. Физико-химические основы литейного производства: учебное пособие для вузов. Москва: Машиностроение. 1971. 224 с.
9. Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А. Физическая химия . Москва: Металлургия. 1987. 688 с.

Referencis

1. Vozdvizhenskij, V. V., Grachov, V.A. & Spasskij, V.V. (1984). *Litejnye splavy i tehnologija ih plavki v mashinostroenii [Foundry alloys and their melting technology in mechanical engineering]*. Moskow: Mashinostroenie [in Russian].
2. Ljubchenko, A.P. (1982). *Vysokoprochnye chuguny [High-strength Cast Iron]*. Moskow: Metallurgija [in Russian].
3. Alonso, G., M. Stefanescu, D., Larrañaga, P. & Suarez, R. (2016). Understanding compacted graphite iron solidification through interrupted solidification experiments. *International Journal of Cast Metals Research, Vol. 29, is. 1-2,* Pp. 2-11 [in English].
4. Andreev, V.V. (2011). Fiziko-himicheskie osnovy formirovanija vkljuchenij grafita v vysokoprochnyh chugunkah [Physical and chemical basics of graphite inclusions formation in high-strength cast iron]. *Vestnik MGTU im. G. I. Nosova – Vestnik MSTU named after G.I. Nosov, 1*, 16-22 [in Russian].
5. Aulin, V.V., Kropivnyj, V.M. , Kropivna, A.V., Bosyj, M.V. & Kuzyk, O.V. (2017). Rol' teplofizychnykh protsesiv formuvannia struktury vysokomitsnykh chavuniv [The role of thermophysical processes in the formation of the structure of high-strength cast irons] . *Visnyk inzhenernoi akademii Ukrainy – Bulletin of Engineering Academy of Ukraine, 3*, 133-137 [in Ukrainian].
6. Golod, V.M. & Savel'ev, K.D. (2010). Vychislitel'naja termodinamika v materialovedenii [Computational thermodynamics in materials science]. SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta [in Russian].
7. Bunin, K.P. & Taran, Ju.N. (1972). *Stroenie chugunka. Serija «Uspehi sovremennogo metallovedenija» [The structure of the iron. Series "Successes in modern metal science"]*. Moskow: Metallurgija [in Russian].
8. Balandin, G.F. & Vasil'ev, V.A. (1971). *Fiziko-himicheskie osnovy litejnogo proizvodstva [Physicochemical Foundations of Foundry]*. Moskow: Mashinostroenie. [in Russian].
9. Zhuhovickij, A.A. & Shvarcman, L.A. *Fizicheskaja himija [Physical chemistry]* . Moskow: Metallurgija [in Russian].

Volodymyr Kropivnyy, Prof., Ph.D tech. sci., **Mykola Bosii,** Sen. Lect., **Olexandr Kuzyk,** Assoc. Prof., PhD tech. sci.**, Olena Kropivnaya,** Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Thermodynamic Processes During Crystallization and Formation of Segregation in High-strength Cast Iron Castings

The purpose of this work is to clarify the role of Gibbs energy accounting in crystallization and formation of liquidation in modified high-strength cast iron.

The article presents the calculation of the interfacial distribution coefficients of silicon and manganese between austenite and the liquid phase of the alloy. The obtained dependence of the relationship between the distribution coefficient of the third element Xi and the temperature change of the austenitic-graphite eutectic for the systems Fe-C-Xi (Xi = Mn, Si). It is shown that silicon concentrates in austenite and liquor in the center of dendrites. In this case, manganese is concentrated in liquid and liquor to the periphery of the dendrite. The role of Gibbs energy change in the redistribution of silicon and manganese between a liquid and austenite is substantiated. It is revealed that element saturate the phase, whose Gibbs energy decreases more strongly from the impurity of the element. This leads to a decrease in the Gibbs energy of the entire system and determines the magnitude of the distribution coefficient of silicon and manganese between the phases.

The nature of the Gibbs energy change is found to determine the direction of the redistribution of silicon and manganese between liquid and austenite. Silicon or manganese is also saturated with a phase whose Gibbs energy decreases more strongly from one of these elements. It has been shown that silicon concentrates in austenite and eliminates in the center of the dendrite while manganese concentrates in the liquid and eliminates the periphery of the dendrite.

high-duty cast iron, spherical graphite, crystallization, segregation, phase, distribution

Одержано (Received) 23.05.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 30.05.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

УДК 620.194; 621.193 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).86-93

Г.В.Чумало, канд. техн. наук, ст.нак. співр., **М.М. Студент,** д-р техн. наук, **Б.М. Дацко,** мол. наук. співр., **В.М. Гвоздецький,** канд. техн. наук, ст. наук. співр.
Фізико-механічний інститут ім.Г.В.Карпенка НАН України, м. Львів, Україна
e -mail:gchumalo@ipm.lviv.ua; e -mail: student-m-m@ipm.lviv.ua
С.І. Маркович, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: marko60@ukr.net

Дослідження ефективності антикорозійних покриттів конструктивних елементів на основі цинку та алюмінію в хлоридно–сульфідних середовищах

Для встановлення можливості захисту сталей від сірководневої корозії та корозійного розтріскування досліджено покриття цинкові, нанесені методом гарячого цинкування, металізаційні алюмінієві, нанесені методом електродугового напилення та комбіновані - металізаційні алюмінієві + епоксидне в середовищах різної агресивності.

Показано, що нанесення цинкового покриття на сталь 20 підвищує корозійну тривкість в середньому в 1,5 рази у модельній морській воді (ММВ) без сірководню та майже у 2 рази у ММВ, насиченій сірководнем порівняно з такою для сталі 20 без покриття. У середовищі NACE корозійна

© Г.В.Чумало, М.М. Студент, Б.М. Дацко, В.М. Гвоздецький, С.І. Маркович, 2019

тривкість зразків з цинковим покриттям різко знижується, що свідчить про недоцільність використання таких покриттів у кислих середовищах. Зразки з алюмінієвими покриттями показали високу корозійну тривкість у ММВ з різним вмістом сірководню та розчині NACE: швидкість корозії сталі з алюмінієвим покриттям знижується в ~7,3 рази у ММВ, насиченій сірководнем, та в ~1,7 рази у розчині NACE, порівняно зі швидкістю корозії сталі без покриття. Дослідження схильності до корозійного розтріскування показали, що зразки з алюмінієвим покриттям показали вищу опірність до сірководневого корозійного розтріскування ніж зразки без покриття. А зразки з комбінованим покриттям (металізаційне алюмінієве + Jotamastic 87GF) показали кращі захисні властивості, ніж зразки лише з алюмінієвим покриттям.

Алюмінієві покриття, нанесені методом електродугового напилення на сталь 20 та комбіновані можна рекомендувати для захисту металевих поверхонь в сірководневих середовищах різної агресивності.

покриття, гаряче цинкування, електродугове напилення, сірководень, швидкість корозії, корозійне розтріскування

Г.В.Чумало, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., **М.М. Студент,** д-р техн. наук, **Б.Н. Дацко,** мл. научн. сотр., **В.Н. Гвоздецкий,** канд. техн. наук, ст. научн. сотр.
Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины, г.Львов, Украина
С.И. Маркович, доц., канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Исследование эффективности покрытий на основе цинка и алюминия в хлоридно-сульфидных середах

Для установления возможности защиты сталей от сероводородной коррозии и коррозионного растрескивания исследованы покрытия цинковые, нанесенные методом горячего цинкования, метализационные алюминиевые, нанесенные методом электродугового напыления и комбинованные - метализационные алюминиевые + эпоксидное в средах различной агрессивности. Показано, что нанесение цинкового покрытия на сталь 20 повышает коррозионную стойкость в среднем в 1,5 раза в модельной морской воде (ММВ) без сероводорода и почти в 2 раза в ММВ, насыщенной сероводородом по сравнению с таковой для стали 20 без покрытия. В среде NACE коррозионная стойкость образцов с цинковым покрытием резко снижается, что свидетельствует о нецелесообразности использования таких покрытий в кислых средах. Образцы с алюминиевыми покрытиями показали высокую коррозионную стойкость в ММВ с различным содержанием сероводорода и растворе NACE: скорость коррозии стали с алюминиевым покрытием снижается в ~ 7,3 раза в ММВ, насыщенной сероводородом и в ~ 1,7 раза в растворе NACE по сравнению со скоростью коррозии стали без покрытия. Исследование склонности к коррозионному растрескивания показали, что образцы с алюминиевым покрытием показали большую сопротивляемость к сероводородному коррозионному растрескиванию чем образцы без покрытия. А образцы с комбинированным покрытием (метализацийне алюминиевое + Jotamastic 87GF) показали лучшие защитные свойства, чем образцы только с алюминиевым покрытием. Алюминиевые покрытия, нанесенные методом электродугового напыления на сталь 20 и комбинированные можно рекомендовать для защиты металлических поверхностей в сероводородных средах различной агрессивности.

покрытие, горячее цинкование, электродуговое напыление, сероводород, скорость коррозии, коррозионное растрескивание

Постановка проблеми. Термін служби металевих конструкцій в умовах навколишнього середовища часто досить короткий. Продовжити його можна в основному чотирма способами, які широко використовуються на практиці. До них відносяться: ізоляція поверхні конструкції від контакту із агресивним середовищем, використання корозійно-стійких матеріалів, вплив на навколишнє середовище з метою зниження його агресивності, застосування електрозахисту підземних металевих споруд.

Дослідження ефективності різних методів протикорозійного захисту металів у сірководневих середовищах є актуальним для газонафтовидобувної промисловості та для будівництва морських платформ на шельфі Чорного моря.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосування захисного шару на металевих об‘єктах – найбільш поширений метод. Для захисту від морської корозії дуже часто використовують металеві захисні покриття. Найпоширеніше – цинкове [1,2]. Його можна використовувати як самостійне захисне покриття, так і як основу під фарбування. Метод гарячого цинкування найбільш поширений для захисту заліза та

його сплавів і полягає у зануренні металу в розплав цинку при 440-600°С. Під час цинкування покривається як зовнішня, так і внутрішня поверхня деталей. Товщина покриття складає 60 - 100 мкм. Термін служби оцинкованого металу може складати від 20 до 65 років залежно від товщини покриття і агресивності навколишнього середовища.

Протикорозійні протекторні покриття на основі алюмінію стали активніше застосовувати для захисту від корозії в 80-90-х роках минулого століття, що регламентувалось стандартами ISO 2064 [3] та ISO 2178 [4]. В основному покриття використовувалися для захисту трубопроводів, мостів, різних сталевих конструкцій. Найбільш поширеним методом нанесення алюмінієвих покриттів є електродугове напилення [5-7]. У промислових і морських умовах швидкість корозії алюмінію приблизно в три рази менша від швидкості корозії цинку, причому корозія зменшується з часом завдяки утворенню на алюмінії щільної плівки оксидів з високими бар'єрними властивостями і адгезією. Використання протекторних покриттів для магістральних трубопроводів були включені в ГОСТ Р51164 [8].

Світовий досвід захисту бурових платформ [9] свідчить про можливість використання електрометалізаційного алюмінієвого покриття в поєднанні з полімерним. Зокрема, платформа Hutton TLP встановлена в британському секторі Північного моря з покривом, газотермічно напиленим алюмінієм та поліуретановим просоченням. Через десять років експлуатації покриття не пошкодилось навіть у зоні перемінного змочування. Найбільш масштабним застосуванням газотермічно напилених покрить став захист від корозії платформи Troll, розрахованої на 50 років експлуатації. Були захищені всі елементи платформи. Загальна площа Al та AlMg покрить склала понад 100 тис. $м^2$.

З огляду на високі захисні властивості компанія Conaco та інші газовидобувні компанії рекомендують використання алюмінієвих газотермічних покрить для структур в Північному морі та Мексиканській затоці [10].

Постановка завдання. мета роботи – дослідити ефективність захисних покриттів: гарячого цинкового, металізаційного алюмінієвого та комбінованого металполімерного: металізаційного алюмінієвого з епоксидним покриттям для можливого захисту від сірководневої корозії.

Виклад основного матеріалу. Досліджували покриття цинкові, нанесені методом гарячого цинкування, металізаційні алюмінієві та комбіновані металполімерні: металізаційні алюмінієві, з епоксидним покриттям Jotamastic 87 GF виробництва норвезької фірми Jotun (δ = 700 μm).

Цинкові покриття наносили шляхом занурення зразків зі сталі 20 в розплав цинку за температури 590° С. Товщина покриття складала 100 ± 10 мкм.

Алюмінієві покриття наносили на зразки зі сталі 20 методом електродугового напилення (U = 30В; I = 150 А; тиск повітря 0,6 МПа; відстань до зразка 150 мм). Товщина покриття 200 ± 10 мкм.

Покриття виробництва норвезької фірми Jotun – Jotamastic 87 GF- це двохкомпонентне, абразиво стійке епоксидне покриття серії Mastic з додаванням скляних лусочок, що покращує його абразивну стійкість та міцність; використовується разом із затверджувачем у масовому співвідношенні 6:1. Jotamastic 87 GF можна використовувати як самостійне покриття, так і разом з різними грунтами та фінішними покриттями. Наносили пензликом два шари епоксидного покриття товщиною по 250 мкм кожен на металізаційне алюмінієве покриття.

Використовували стандартний розчин NACE (5% NaCl + 0,5% CH_3COOH, насичення H_2S, pH 3…4, 22+3°С) та цей самий розчин без сірководню; модельну

морську воду (ММВ): 3%-й розчин морської солі (mass.%): ≤ 86,5 NaCl ≤ 1,5 Ca^{2+}; ≤ 2,0 Mg^{2+}; нерозчинні у воді речовини ≤ 3,0%; ММВ з вмістом 15 мг/л сірководню та насичену ним. Корозійну тривкість покриттів вивчали масометричним методом [11]. Довготривалу корозійну міцність циліндричних зразків ∅ 6,4 mm з нанесеним на робочу частину покриттям – згідно зі стандартом NACE [12] та MP 185-86 [13] на установках Zst 3/3 під статичним одновісним навантаженням. Критерій опірності сірководневому корозійному розтріскуванню – порогове напруження $\sigma_{пор.}$, нижче від якого зразки не руйнувалися за бази випробувань 720 год.

У ММВ за відсутності сірководню корозійна тривкість зразків з цинковим покриттям є вищою в середньому в 1,5 рази від корозійної тривкості зразків без покриття. При насиченні ММВ сірководнем, корозійна тривкість зразків з цинковим покриттям зростає у 2 рази порівняно з такою для зразків зі сталі 20 без покриття. У середовищах менш агресивних – ММВ з вмістом сірководню 150 мг/л; 75 мг/л; 15 мг/л швидкість корозії знижується із зменшенням концентрації сірководню і складає відповідно 0,054 г/м^2·год.; 0,039 г/м^2·год.; 0,026 г/м^2·год.

а

б

Рисунок 1 - Зовнішній вигляд зразків з цинковим покриттям (а) та без покриття після витримки протягом 15 діб у морській воді, насиченій сірководнем

Джерело: розроблено автором

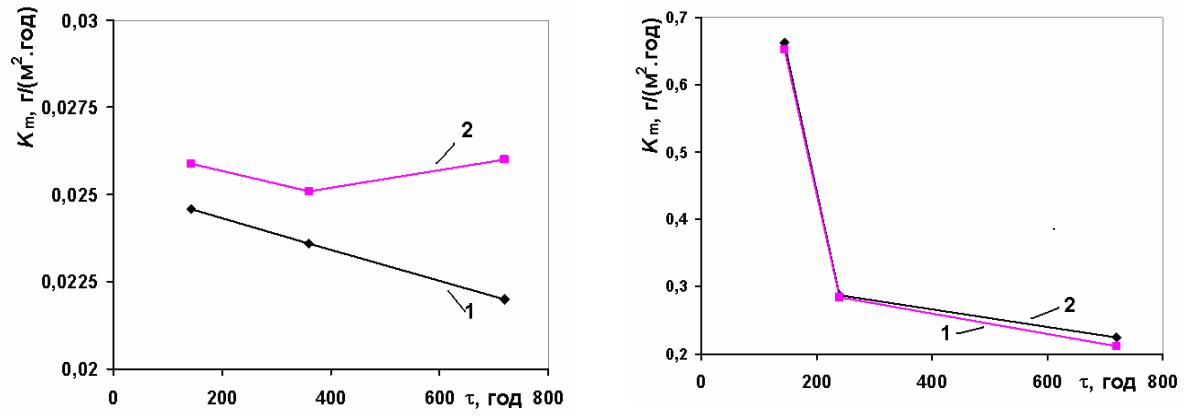
У ММВ, насиченій сірководнем, сталь 20 зазнала пухиріння, а зразок з цинковим покриттям практично втратив зовнішній цинковий шар. У середовищі NACE корозійна тривкість зразків з цинковим покриттям різко знижується і вже через добу спостерігається відшарування цинкової плівки, що свідчить про недоцільність використання таких покривів у кислих середовищах.

Зразки з алюмінієвими покриттями показали високу корозійну тривкість у всіх випробувальних середовищах.

Довготривалі випробування показали, що швидкість корозії сталі з алюмінієвим покриттям знижується в ~7,3 рази у ММВ, насиченій сірководнем, та в ~1,7 рази у розчині NACE, порівняно зі швидкість корозії сталі без покриття. Покриття не змінилося навіть після 720 годинної витримки у ММВ, насиченій сірководнем, та розчині NACE. Отже, сірководень не суттєво впливає на швидкість корозії цих зразків (рис. 2, 3).

Випробування в середовищі NACE та цьому ж розчині без сірководню виявили практично однакову швидкість корозії впродовж всього періоду випробувань: 0,2375 та 0,2252 г/(м^2·год.) відповідно.

Зовнішній вигляд зразків з алюмінієвим покриттям, витриманих у середовищах різної агресивності підтверджують високу корозійну тривкість цього покриття (рис.3).



а б

Рисунок 2 - Корозійна тривкість зразків з алюмінієвим покривом у ММВ (а) та у розчині 5% NaCl + 0,5% CH_3COOH (б): *1* – C_{H_2S} = 0; *2* – насичення H_2S

Джерело: розроблено автором

а б в

Рисунок 3 - Зовнішній вигляд зразків з алюмінієвим покриттям після витримки протягом 30 діб у ММВ(*а*);ММВ, насиченій сірководнем (*б*) та розчині NACE (*в*)

Джерело: розроблено автором

Дослідження схильності до корозійного розтріскування показали, що після нанесення алюмінієвого покриття зразки не руйнуються в розчині NACE за σ = 232 МПа (0,8$\sigma_{0,2}$ сталі 20) упродовж бази випробувань. Порогові напруження для сталі без покриття у ММВ, насиченій сірководнем, та середовищі NACE становлять відповідно 0,7$\sigma_{0,2}$ та 0,6$\sigma_{0,2}$. Отже, зразки з алюмінієвим покриттям показали вищу опірність до сірководневого корозійного розтріскування ніж зразки без покриття.

Зразки з комбінованим покриттям (металізаційне алюмінієве + Jotamastic 87GF) витримали базу випробувань за напружень 0,9$\sigma_{0,2}$ основного металу у ММВ, насиченій сірководнем та розчині NACE. Тобто комбіноване покриття виявило кращі захисні властивості, ніж тільки алюмінієве.

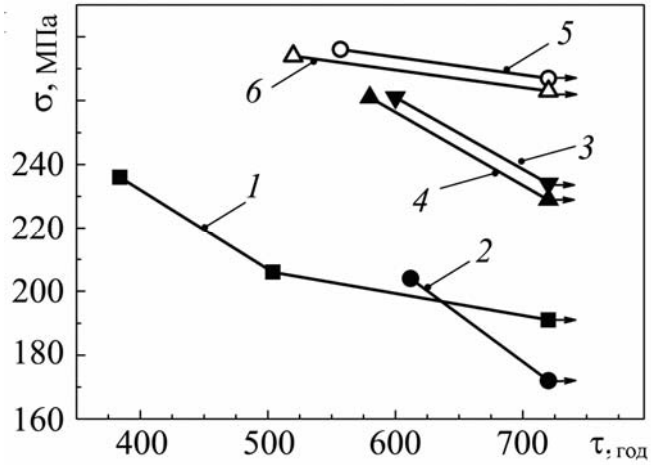


Рисунок 4 - Опірність корозійному розтріскуванню зразків зі сталі 20 без покриття (криві *1*, *2*); з алюмінієвим покриттям (*3*, *4*) і з комбінованим: металізаційне алюмінієве + епоксидне Jotamastic 87GF (*5*, *6*); *1*, *3*, *5* – ММВ + H_2S; *2*, *4*, *6* – розчин NACE

Джерело: розроблено автором

Виходячи з отриманих результатів досліджень алюмінієвих покрить, нанесених методом електродугового напилення на сталь 20 та комбінованих можна рекомендувати їх для захисту металевих поверхонь в сірководневих середовищах різної агресивності.

Висновки:

1. Встановлено, що у ММВ за відсутності сірководню корозійна тривкість зразків з цинковим покриттям є вищою в середньому в 1,5 рази від корозійної тривкості зразків без покриття. При насиченні ММВ сірководнем, корозійна тривкість зразків з цинковим покриттям зростає у 2 рази порівняно з такою для зразків зі сталі 20 без покриття. У середовищах менш агресивних – ММВ з вмістом сірководню 150 мг/л; 75 мг/л; 15 мг/л швидкість корозії знижується із зменшенням концентрації сірководню і складає відповідно 0,054 г/м^2·год.; 0,039 г/м^2·год.; 0,026 г/м^2·год. У середовищі NACE корозійна тривкість зразків з цинковим покриттям різко знижується і вже через добу спостерігається відшарування цинкової плівки, що свідчить про недоцільність використання таких покриттів у кислих середовищах.

2. Показано, що зразки з алюмінієвими покриттями мають високу корозійну тривкість у ММВ з різним вмістом сірководню та розчині NACE: швидкість корозії сталі з алюмінієвим покриттям знижується в ~7,3 рази у ММВ, насиченій сірководнем, та в ~1,7 рази у розчині NACE, порівняно зі швидкість корозії сталі без покриття. Покриття не змінилося навіть після 720 годинної витримки у ММВ, насиченій сірководнем, та розчині NACE.

2. Встановлено, що зразки з алюмінієвим покриттям показали вищу опірність до сірководневого корозійного розтріскування ($\sigma_{пор}$=0,8$\sigma_{0,2}$ сталі 20) ніж зразки без покриття (0,6$\sigma_{0,2}$ та 0,7$\sigma_{0,2}$ сталі 20 у ММВ, насиченій сірководнем, та середовищі NACE відповідно).

3. Зразки з комбінованим покриттям (металізаційне алюмінієве + Jotamastic 87GF) показали кращі захисні властивості, ніж зразки лише з алюмінієвим покриттям. Порогові напруження складають $\sigma_{пор}$=0,9 $\sigma_{0,2}$ сталі 20 у ММВ, насиченій сірководнем, та середовищі NACE відповідно.

4. Алюмінієві покриття, нанесені методом електродугового напилення на сталь 20 та комбіновані можна рекомендувати для захисту металевих поверхонь в сірководневих середовищах різної агресивності.

Список літератури

1. Соголовская А.Г., Эйчис А.П. Прогрессивные методы горячего цинкования. Киев: Техника, 1967. 124с.
2. Смирнов А.В. Горячее цинкование. Москва:Металлургия. 1953. 289с.
3. ISO 2064: 1996. Metallic and other non-organic coatings - Definitions and conventions.
4. ISO 2178 : 2016. Non-magnetic coatings on magnetic substrate's.
5. Andrewsm D. R. The Protection of Iron and Steel by Aluminium Coatings . Metallurgia, Manchr., 1960. Vol. 62. P. 153.
6. Metallizing: Aluminium and Zinc Spraying, DTD 906B.
7. Електродугові відновні та захисні покриття / В.І. Похмурський та ін. Львів, Національна академія наук України; Фізико – механічний інститут ім. Г.В. Карпенка. 2005. 192.
8. ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии» (пункт 4.7: Алюминиевые и цинковые покрытия для защиты от коррозии трубопроводов, транспортирующих газ, нефть и нефтепродукты). [Действующий от 01.07.1999]. ИПК Издательство стандартов. 1998. 42 (Госстандарт России).
9. Bland J. Corrosion Testing of Flame-Sprayed Coated Steel – A 19 Year Report. – Miami, FL: American Welding Society, 1974.
10. Conoco Norway Inc., P.O. Box 488, N-4001, Stavanger, Norway.
11. Коррозия*:* справ. изд. / Под. ред. Л. Л. Шрайера: Пер. с англ. Москва: Металлургия, 1981. 632 с.
12. NACE Standard MR-0175-96. Standard Material Requirements Sulfide Stress Cracking Resistance Metallic Materials for Oilfield Equipment. – Houston, Tx.: National Association of Corrosion Engineers (NACE), 1996. 30 p.
13. Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на склонность к коррозионному растрескиванию сталей и сплавов в жидких средах. Методические рекомендации МР 185-86. Москва: ВНИИНМАШ, 1986. 52 с.

Referencis

1. Sogolovskaja, A.G. & Jejchis, A.P. (1967). Progressivnye metody gorjachego cinkovanija [Progressive Hot Dip Galvanizing]. Kiev: Tehnika [in Russian].
2. Smirnov, A.V. (1953). Gorjachee cinkovanie [Hot galvanizing]. Moskow: Metallurgija [in Russian].
3. ISO 2064: 1996. Metallic and other non-organic coatings - Definitions and conventions [in English].
4. ISO 2178 : 2016. Non-magnetic coatings on magnetic substrate's. [in English].
5. Andrewsm, D.R. (1960). The Protection of Iron and Steel by Aluminium Coatings. Metallurgia, Manchr. Vol. *62*, 153 [in English].
6. Metallizing: Aluminium and Zinc Spraying, DTD 906B. [in English].
7. Pokhmurs'kyj, V.I., Student, M.M., Dovhunyk, V.M., Pokhmurs'ka, H.V. & Sydorak, I.J. (2005). *Elektroduhovi vidnovni ta zakhysni pokryttia [Electric arc restoration and protective coatings]*. L'viv, Natsional'na akademiia nauk Ukrainy, Fizyko – mekhanichnyj instytut im. H.V. Karpenka [in Ukrainian].
8. Truboprovody stal'nye magistral'nye. Obshhie trebovanija k zashhite ot korrozii» (punkt 4.7: Aljuminievye i cinko¬vye pokrytija dlja zashhity ot korrozii truboprovodov, transportirujushhih gaz, neft' i nefteprodukty) [Steel pipe mains. General requirements for corrosion protection]. *HOST R 51164-98 from 1 July* 1999. Moskow: IPK Izdatel'stvo standartov [in Russian].
9. Bland, J. (1974). Corrosion Testing of Flame-Sprayed Coated Steel – A 19 Year Report. – Miami, FL: American Welding Society [in English].
10. Conoco Norway Inc., P.O. Box 488, N-4001, Stavanger, Norway[in English].
11. L. L. Shrajera (Eds.). (1981). Korrozija: sprav. izd. (Trans). Moskow: Metallurgija [in Russian].
12. Standard Material Requirements Sulfide Stress Cracking Resistance Metallic Materials for Oilfield Equipment. (1996). *NACE Standard MR-0175-96*. Houston, Tx.: National Association of Corrosion Engineers (NACE) [in English].
13. Raschety i ispytanija na prochnost'. Metody ispytanij na sklonnost' k korrozion¬nomu rastreskivaniju stalej i splavov v zhidkih sredah [Calculations and strength tests. Test methods for the tendency to corrosion cracking of steels and alloys in liquid media]. (1986). *Metodicheskie rekomendacii MR 185-86.* Moskow: VNIINMASh [in Russian].

Halyna Chumalo, PhD tech. sci., Senior Researcher, **Bohdan Datsko,** Junior Researcher, **Mykhajlo Student,** DSc., **Volodymyr Hvozdetskii**, PhD tech. sci., Senior Researcher
Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine
Sergiy Marcovych, PhD tech. sci

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Investigation of the Effectiveness of Coatings on the Basis of Zinc and Aluminum in Chloride-sulfide Media

The aim of the study is to investigate the effectiveness of protective coatings: hot galvanizing, metallization aluminum and combined metal polymer: metallization aluminum with epoxy coating for possible protection against hydrogen sulfide corrosion.

To determine the possibility of protection steels from hydrogen sulfide corrosion and corrosion cracking, zinc coatings, applied with hot dip galvanizing, metallized aluminum coatings, applied by electro-arc spraying and combined metallization aluminum + epoxy in media of different aggressiveness were investigated. It is shown that the application of zinc coating on 20 steel increases the corrosion resistance on average in 1.5 times in model sea water (MSW) without hydrogen sulfide and almost in 2 times in the MSW saturated with hydrogen sulfide compared with that for non-coated 20 steel. In the NACE solution, the corrosion resistance of samples with zinc coating is sharply reduced, which indicates the inexpediency of the use of such coatings in acidic environments. Examples of aluminum coatings showed high corrosion resistance in MSW with different content of hydrogen sulfide and in NACE solution: the corrosion rate of steel with aluminum coating is reduced in ~7.3 times in the MSW saturated with hydrogen sulfide and in ~1.7 times in NACE solution compared to the corrosion rate of steel without coating.

Investigation of the susceptibility to stress corrosion cracking showed that samples with an aluminum coating showed higher resistance to hydrogen sulfide stress corrosion cracking than samples without coating. And samples with a combined coating (metallic aluminum + Jotamastic 87GF) showed better protective properties than samples with aluminum coating. Aluminum coatings applied by the method of electric arc spraying on 20 steel and combined coatings can be recommended for the protection of metal surfaces in hydrogen sulfide media of different aggressiveness.

coating, hot galvanizing, electric arc spraying, hydrogen sulfide, corrosion rate, corrosion cracking

Одержано (Received) 20.11.2018 *Прорецензовано (Reviewed) 05.02.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

УДК 553.04 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).93-102

В.М. Кропівний, проф., канд. техн. наук, **Л.А. Молокост,** викл., **О.В. Кузик,** доц., канд. техн. наук, **А.В. Кропівна,** доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: Lyudmila.Molokost1967@gmail.com

Порівняльна промислова оцінка графітових родовищ та руд України, характеристика збагачення руд

В статті розглянуто основні родовища графіту в Україні, методи збагачення графітових руд в залежності від ступеню їх фізико-хімічних змін, зроблено порівняльну промислову оцінку родовищ та визначені найбільш перспективні для освоєння об’єкти.

На прикладі трьох найбільших родовищ графіту Українського щита розглянута проблема збагачення графітових руд, а також принципи їх поділу на промислові типи, дана характеристика графітовим рудам і властивостям графіту, застосування графіту в промисловості. Властивості цього мінералу дозволяють використання його, як і вуглецю в цілому, у всіх галузях народного господарства, науки та техніки. Основні галузі застосування природного графіту: - металургія (виробництво тиглів, ливарних форм, вогнетривів, протипригарних фарб); - нафтогазова галузь; - електрохімія; - машинобудування, авіаційна та космічна техніка(гальмівні колодки і накладки, самозмащувальні механічні частини – підшипники і вкладки).Визначені особливості кон'юнктури ринку графіту, що передбачає аналіз динаміки видобутку, виробництва, споживання мінеральної сировини в Україні та світі.

графіт, графітові родовища, якість, запаси, збагачення руд

© В.М. Кропівний, Л.А. Молокост, О.В. Кузик, А.В. Кропівна, 2019

В.Н. Кропивный, проф., канд. техн. наук, **Л.А.Молокост,** викл., **А.В. Кузык,** доц., канд. техн. наук, **А.В. Кропивна,** доц., канд. техн. наук
Кировоградский национальный технический университет г. Кропивницкий, Украина

Сравнительная промышленная оценка графитовых месторождений и руд Украины, характеристика обогащения руд

В статье рассмотрены основные месторождения графита на Украине, методы обогащения графитовых руд в зависимости от степени их физико-химических изменений, сделана промышленная оценка, определены наиболее перспективные для освоения объекты.

На примере трех наибольших месторождений графита Украинского щита рассмотрена проблема обогащения графитовых руд, а также принципы их разделения на промышленные типы, дана характеристика графитовым рудам свойствам графита, применение графита в промышленности. Основные области применения природного графита: - металлургия (производство тиглей, литейных форм, огнеупоров, противопригарные красок) - нефтегазовая отрасль; - електрохимия; - машиностроение, - авиационная и космическая техника (тормозные колодки и накладки, самосмазывающиеся механические части - подшипники и вкладки).Определены особенности коньюктуры рынка графита, что предусматривает анализ динамики добычи, производства, потребления минерального сырья в Украине та мире.

графит, графитовые месторождения, качество, запасы, обогащение руд

Постановка проблеми. Родовища та прояви графіту утворюють на території України чотири графітоносні райони і входять до єдиної Української графітоносної провінції. Всього на території України, окрім балансових родовищ налічується також близько 100 рудопроявів та 400 точок підвищеної графітової мінералізації. Більшість із цих об’єктів пройшли лише попередню оцінку або віднесені до прогнозних ресурсів і вивчені недостатньо. Тією чи іншою мірою розвідані лише деякі рудопрояви (їх запаси віднесені до категорій A,B,C_1+C_2), які раніше вважались родовищами, але, в результаті дорозвідки більш перспективних об’єктів, втратили першочергову промислову значимість (Водянське, Бабенківське, Старокримське).

На сьогоднішній день виробництво кристалічного графіту в Україні зменшується. Цей факт вимагає визначення нових перспективних об’єктів видобутку, причому з сировиною відповідної якості. Нові родовища графіту, розвідані за останні десятиліття, можуть скласти значну конкуренцію раніше розвіданим об’єктам і служити базою для створення нових промислових осередків графітовидобутку в Україні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Україна є однією з перших серед країн СНД за запасами, видобутком руди та виробництвом кристалічного графіту. Графітоносність Українського щита (УЩ) досліджували Є.П. Петровський та Н.І. Безбородько. Питання промислових типів руд графітових родовищ Українського щита в науковій літературі розглядались А. Д. Додатком та Н. Н. Янгічером, а основні дослідження в галузі збагачення руд були проведені В. Б. Чижевським, М. В Бондаренко, Н. С. Власовою та ін. Розробка схем та режимів збагачення графітових руд проводилась Інститутом мінеральних ресурсів (м.Сімферополь). Технологічні дослідження збагачуваності різних типів графітових руд були виконані Завалівським гірничозбагачувальним комбінатом (ГЗК).

Постановка завдання. Метою роботи є огляд основних родовищ графіту та характеристика промислових типів руд найбільших за запасами графіту родовищ Українського щита, порівняти області застосування продуктів збагачення за результатами лабораторних та напівпромислових досліджень, визначити основні проблеми, пов'язані з їх збагаченням та розглянути досвід Завалівського ГЗК при вирішенні цих проблем.

Виклад основного матеріалу. В даний час промисловістю виробляється понад 500–600 найменувань сортів і марок графітової продукції. Графіт у природі є досить

поширеним мінералом. Завдяки своїй унікальній структурі і властивостям (мастильність, низький ко ефіцієнт температурного розширення, гарні тепло- і електропровідність, податливість і в'язкість в широких температурних межах, хімічна інертність і нетоксичність та ін.) при родний графіт має широке застосування в різних галузях: металургії, електротехнічній та хімічній промисловостях, машинобудуванні, зокрема для виробництва ливарних форм, тиглів, реторт, вогнетривів, акумуляторів, електродів, метало-графітових виробів, колоїдно-графітових препаратів тощо. Окрім того, як алотропна модифікація вуглецю, графіт має надзвичайно важливе наукове значення, зокрема для аналізу походження та еволюції органічного світу, вуглеводнів та ін. На даний час, завдяки новітнім досягненням світової науки, галузі використання вуглецю постійно розширюються. Достатньо згадати такі природні та синтезовані різновиди як алмаз, лонсдейліт, карбін, фулерени та ін. Фулере́ни або бакіболи – одна з кількох алотропних модифікацій Карбону. Найвідоміший фулерен – молекула C_{60}, яка має ідеальну форму футбольного м'яча. Відкриті в 1985 Робертом Керлом, Гарольдом Крото й Річардом Смолі, ці молекули, що складаються тільки з атомів Карбону, отримали свою назву на честь Річарда Бакмінстера Фулера – архітектора, що прославився побудовою ажурних куполів. Першовідкривачі отримали Нобелівську премію з хімії в 1996 році. Останніми роками на основі графіту було отримано новий перспективний матеріал – графен [6, 7].

Цей вид сировини належить до категорії В. Родовища кристалічного графіту виявлені в межах Українського кристалічного щита. Державним балансом запасів корисних копалин враховано шість родовищ кристалічного графіту із загальними запасами 17,4 млн тонн графіту (рис.1).

Рисунок 1 – Нерудні корисні копалини

Джерело:[1]

Розробляється Завальївське родовище із загальними запасами 6,8 млн тонн графіту а також Балахівське родовище, загальні запаси якого становлять 2,1 млн тонн графіту.У цьому напрямі передбачається пошукова оцінка запасів та ресурсів графіту на перспективних ділянках та на флангах відомих родовищ [1].

Категорія В - види мінеральної сировини, родовища яких в Україні наявні, запаси їх (у тому числі значні) розвідані, але сировина видобувається в обмежених обсягах або не видобувається взагалі. Згідно з техніко-економічними розрахунками така мінеральна сировина при сучасному становищі економіки країни не є конкурентоспроможною порівняно з імпортною сировиною і не може бути рентабельно перероблена на вітчизняних підприємствах відповідно до діючих технологій. Водночас

потреба в такій сировині може відновитися як результат освоєння новітніх технологій збагачення або попередньої переробки відповідних руд [1].

Графітові руди за структурно-текстурними ознаками поділяються на явно та приховано кристалічні. Перший тип поділяється на щільнокристалічний та лускатий різновиди, що мають найбільшу промислову цінність. Лускаті руди з вмістом графіту понад 3% є промисловими внаслідок спрощеної технології збагачення, що полягає в розмелюванні і селективній флотації графіту з одержанням концентратів високої чистоти. Щільнокристалічний різновид утворює масивні чи вкраплені руди з вмістом 15-90% графіту. Багаті руди піддають ручній рудорозборці, бідні збагачують. Серед прихованокристалічного графіту виділяють щільну та тонкодисперсну відміни, він набуває промислового значення при вмісті його в рудах 80-90%, оскільки не збагачується флотаційним методом, а піддається тільки розмелюванню. Руди графіту контрастні в геоелектричних полях і добре фіксуються методами електророзвідки завдяки дуже низькому опору.

Основні галузі застосування природного графіту: - металургія (виробництво тиглів, ливарних форм, вогнетривів, протипригарних фарб); - нафтогазова галузь; - електрохімія; -машинобудування, авіаційна та космічна техніка(гальмівні колодки і накладки, самозмащувальні механічні частини – підшипники і вкладки). У зв'язку з заміною азбесту у виробництві гальмівних накладок різко зросла доля графітного компоненту з 1-2 до 15%; - атомна промисловість використовує виготовлені з графіту блоки та деталі реакторів. Традиційною галуззю застосування графіту залишається виробництво олівців. На сучасному етапі світові запаси графіту є значними, ними володіють більшість країн світу. Проте, розподіл цих запасів територіально нерівномірний, тому лише деяких держав видобуток даної сировини є рентабельним. Основні поклади графітових руд (86 %) зосереджені в Китаї. Значними запасами, особливо з огляду на порівняно невелику територію, володіють Мексика, Чехія та Мадагаскар. Темпи видобутку графіту в кожній з цих країн різні. Так, наприклад, країна, що володіє меншими запасами (Бразилія), видобуває більше сировини, ніж країна з більшими запасами (Мексика). Тобто для економіки кожної держави графітовидобувна галузь має різну значимість. Вартість природного графіту та диференціація цін визначається за його сортами – найбільша ціна визначена для типу графіту з максимальним вмістом вуглецю в даному сорті. У 2006 р., коли постачання природного графіту були широко доступні, головним чином – з Китаю, ціни на сировину були низькі. До 2008-2009 рр. ціни досягають максимуму внаслідок браку постачань (рис. 3). Причиною стало зниження обсягів експорту китайського графіту в 2008 р. Ціновий максимум на природний графіт відзначений у серпні-вересні 2008 р., на початку 2009 р., після незначного спаду, ціни знову починають рости. Середня ціна за тонну кристалічного графіту з вмістом вуглецю 94-97 % за період часу 2004- 2009 рр. збільшилася в середньому на 44-50 % [3].

За запасами, видобутком руди та виробництвом кристалічного графіту Україна є однією з перших серед країн СНД. На території України родовища і прояви графіту приурочені до порід архею та нижнього протерозою. Графітоносна провінція Українського щита включає в себе чотири графітоносні райони – Волинський (Буртинське), Побузький (Завалівське), Криворізький (Балахівське, Петрівське родовища) та Приазовський (Троїцьке, Маріупольське) [2]. Адміністративно родовища приурочені до Запорізької, Кіровоградської, Донецької та Хмельницької областей. Найбільша кількість запасів графіту припадає на Кіровоградську область за рахунок розміщення на її території запасів Завалівського та Балахівського родовищ (рис. 2,

табл.2). Значні запаси Хмельницької області обумовлені розміщенням на її території Буртинського графітового родовища (табл. 2).

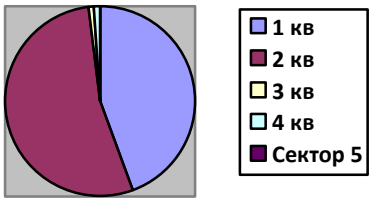


Рисунок 2 - Розподіл запасів графіту по областях: 1- Хмельницька (44,58%); 2 – Кіровоградська (53,41); 3 – Запоріжська (1,1%); 4- Донецька (0,9%)

Джерело: [6]

Балахівське родовище графіту розташоване в Петрівському районі Кіровоградської області, за1,0 км на північний схід від с.Балахівка.

Згідно з державним балансом запасів корисних копалин України «Графіт» станом на 01.01.2018 р. запаси Південної ділянки Балахівського родовища становлять (табл.1).

Таблиця 1 – Запаси корисних копалин Балахівського родовища

	B	C_1	$B+C_1$	C_2
Руда, тис.т.	4326	19610	23936	18469
Графіт, тис.	289	1013	1302	820

Джерело: [1]

Таблиця 2 – Ступінь геологічної вивченості та величина запасів

Родовище	Запаси графіту на основних графітових родовищах України, тис. т									
	A		B		C1		A+B+C1		C2	
	руда	графіт	Руда	графіт	руда	графіт	руда	графіт	руда	графіт
Троїцьке							20,27	163	252	14
Петрівське	2002	125	650	42	4871	373	7523	540	1696	115
Маріупольське	149	7	248	10	3043	118	3440	135	1347	41
Завалівське			17489,1	1210,4	77701	4836,8	62526	263	14613	744,2
Балахівське			4326	289	19610	1013	23,936	1,302	18469	820
Буртинське			28165,3	1736	85225,6	4848,7	113390,6	6584,7	16586,7	898,9

Джерело: [1]

Видобуток графіту в Україні, з огляду на різні, переважно економічні причини, має досить непостійний характер (рис. 1). На сучасному етапі промисловому освоєнню піддаються руди Завалівського родовища (Кіровоградська обл.), розвідані запаси яких за категоріями $A+B+C_1$ та C_2 становлять відповідно 62526 тис. і 14613 тис. тонн. Родовище розташоване біля р. Південний Буг на території Гайворонського району Кіровоградської області і, частково, Савранського району Одеської області. В районі Завалівського родовища (до 30 км від комбінату) виявлено низку перспективних рудопроявів графіту. Вони сконцентровані переважно на родючих орних землях і характеризуються значною потужністю розкривних порід.

У наведених нижче таблицях дано основну характеристику графітових родовищ України, що враховані державним балансом: середній вміст графіту, група складності родовища, потужності рудних тіл та порід перекриття, ступінь геологічної вивченості,

величина запасів тощо. Дані показники в багатьох випадках визначають перспективність родовища для промислової розробки. Важливою умовою при освоєнні родовища є характер порід перекриття, адже більш економічно привабливим є родовище, де породи перекриття також викликають промисловий інтерес і можуть розроблятися супутньо (Завалівське, Балахівське, Буртинське) (табл. 3).

На даний час експлуатується Завалівське родовище (ВАТ "Заваллівський графітовий комбінат" державного концерну "Укрцемент" розробляє Південно-Східну ділянку, проектна потужність – 35 тис. т. графітового концентрату), Балахівське та Буртинське готуються до використання і перебувають на державному балансі України.

Таблиця 3 – Основні геологічні параметри графітових родовищ України

Потужність порід	Родовище пере-криття	Група складності геологічної будови	Потужність рудного тіла, м (макс.)	Вміст графіту (середній)		Промислове значення та характер порід перекриття
				від	до	
Троїцьке	3	300	8,04	0,2	8	розміщено в санітарно-охоронній зоні Бердянського водосховища
Петрівське	3	50	7,18	3,5	20	малопродуктивні землі
Маріупольське	2	250	3,92	0,7	35	орні та малопродуктивні землі
Завалівське	2	80	6,2	8	45	будівельний камінь, піски, глини (пром.знач)
Балахівське	2	300	4,94	2	10,3	піски та глини (пром.зн)
Буртинське	2	49	5,85	20	36	глини (пром.зн.)

Джерело: [6]

Хоча Маріупольське родовище не розробляється, Маріупольський графітовий комбінат, який був повністю зруйнований та відновлений на новому місці східної частини міста, активно експлуатується ВАТ "Маркограф" і випускає графітову продукцію. Сировиною для комбінату слугують відходи металургійних комбінатів, підприємств електротехнічної промисловості та ін. Частково ввозиться концентрат із Завалівського комбінату. Маріупольський комбінат випускає 3 види графіту: акумуляторний, мастильний і графіт для спецсталі.Система управління якістю виробництва продукції сертифікована згідно з міжнароднис стандартом ISO 9001.

Гнучкість виробництва, наявність достатніх технологічних ресурсів дозволяють виготовляти як традиційні види продукції, так і нові марки графітів і змазок за індивідуальними заказами споживачів в відповідних об’ємах та строках.У найбільшому та освоєному Побузькому районі на базі Завалівського родовища діє однойменний графітовий комбінат, що на 70-80 % забезпечував усі потреби колишнього СРСР, а Україна була практично монополістом із виробництва графітової продукції. З глибиною мінеральний склад та фізичні властивості руд, від яких залежить послідовність флотаційного процесу, змінюються. У зв'язку з цим виділено три основних промислових типи руд: пухкі, напівпухкі та щільні. Найбільшої зміни мінерального складу зазнають пухкі руди, які в залежності від набору гіпергенних мінералів та їх кількості поділяються на окремі підтипи, що передбачають використання їх в процесі усереднення та збагачення. Характеристика типів руд та їх збагачуваності подана нижче.

Руди Буртинського графітового родовища близькі за хімічним складом до руд Завалля (табл. 4). В рудах спостерігається порівняно підвищений вміст сірки сульфідної, окисного і закисного заліза, що пов'язано з наявністю більшої кількості сульфідних мінералів. Породоутворюючі мінерали руд на обох родовищах досить близькі. У той же час на Завалівському родовищі в значній кількості присутній гранат (20%), а також помітно вищий вміст сульфідів (2–7%) порівняно з Буртинським.

За фізично-механічними властивостями на Городнявській ділянці виділяються три основні типи руд: (каолін-жорств'яниста кора вивітрювання), напівпухкі (зона дезінтеграції з частковою каолінізацією) і щільні руди (скельні породи).

До щільного різновиду руд віднесені графітові руди, пов'язані із свіжими не порушеними процесами вивітрювання графітовмісними породами. Найбільш характерною особливістю цих руд є їх висока (в порівнянні з рудами з кори вивітрювання) міцність, а також те, що луски графіту знаходяться в щільному зростанні з іншими мінералами материнської породи. Це негативно впливатиме на показники збагачуваності руд. Попередньо до промислового типу А. Д. Додатком та М. М. Янгічером [9] було запропоновано відносити лише пухкі руди, що пояснювалось відпрацьованою, перевіреною та економічно обґрунтованою технологією їх збагачення. Однак вивчення технологічних проб різних типів руд Завалівського родовища показало, що отриманий графіт щільних руд повністю відповідає вимогам промисловості.

Таблиця 4 – Порівняльна таблиця хімічного складу графітових руд Завалівського родовища і Городнявської ділянки Буртинського родовища

Компоненти	Вміст компонентів, %%					
	Завалівське родовище			Буртинське родовище		
	пухка руда	напівпухка руда	щільна руда	пухка руда	напівпухка руда	щільна руда
SiO_2	63,81	56,55	59,24	62,47	64,12	63,43
Al_2O_3	12,44	14,58	11,03	14,10	13,83	13,51
Fe_2O_3	6,98	0,91	6,53	2,72	1,79	2,16
FeO	-	11,20	-	1,23	1,57	1,45
TiO	2 0,60	0,97	0,37	0,54	0,52	0,46
MnO	0,10	0,35	0,14	0,05	0,05	0,05
CaO	0,39	1,56	3,30	1,09	1,31	0,96
MgO	2,09	5,20	4,21	1,06	1,28	1,26
K_2O	2,83	2,07	2,18	2,51	2,94	3,06
Na_2O	0,07	0,37	1,08	1,76	2,33	2,59
P_2O_5	0,09	0,23	0,13	0,32	0,11	0,13
Sсульф	2,81	2,60	3,92	0,65	1,34	1,48
SO_3	-	-	-	0,23	0,32	0,24
п.п.п.	8,46	5,81	7,98	11,07	8,56	9,04
Σ	100,30	100,09	100,11	99,80	100,07	99,82
H_2O	0,62	0,54	0,67	0,68	0,57	0,25

Джерело: [6]

На сьогоднішній день в експлуатації перебуває Завалівське родовище, на базі якого діє однойменний збагачувальний комбінат.Руди Завалля збагачуються способом флотації. Така ж схема збагачення, згідно з технологічними випробуваннями, передбачена для руд Балахівського та Буртинського родовищ. Проте, в залежності від

мінерального складу та фізичного стану руд схема флотаційного процесу кожного з типів руд відмінна.

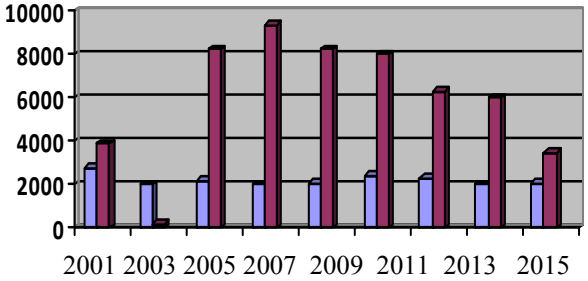


Рисунок 3 - Споживачі та об'єми споживання українського графіту: перша колонка – кількість графіту, що надійшла підприємствам України, т.; друга колонка - кількість графіту, що надійшла на підприємства Близького та далекого зарубіжжя,т.

Джерело: [6]

Основною задачею збагачення є отримання концентрату графітового вуглецю з мінімально можливим вмістом мінеральних домішок. Попередньо для визначення доцільності збагачення графіту на стадіях попередньої розвідки проводиться термічна обробка проб графіту в різних температурних інтервалах, у відповідності з якими, та кількістю вуглецю, що згорає, графітвмістна порода характеризується таким чином. Всі породи, в яких графіт вигорає до температури 510°С, містять графіт непромислової якості; якщо вуглець вигорає більше ніж на 60% в температурному інтервалі 510–695°С – породи становлять промисловий інтерес, в разі, якщо в інтервалі 695–800°С вигорає 1–2% вуглецю – породи мають промислову цінність і повинні піддаватись технологічним дослідженням для розробки методів і режимів збагачення.

Метод збагачення залежить від шкідливих домішок, характеру вміщуючих порід, структури графіту та призначення продукту. На сьогодні в залежності від характеристики руд використовують такі методи, як ручне сортування, вибіркове подрібнення, хімічне, магнітне, термічне збагачення, флотацію. Для збагачення графітових руд УЩ найбільш ефективним є флотаційний метод, як додаткові використовують також магнітну та повітряну сепарацію, хімічне дозбагачення. Флотація дає можливість збагачувати руди з вмістом графіту 3–5%. При цьому флотаційні властивості графіту залежать від структури: кристалічні та лускаті графіти флотуються легко, тоді як прихованокристалічні (аморфні) – погано. Режим флотаційного процесу залежить від мінерального складу (наявність гіпергенних мінералів, наприклад, наявність окислів в рудах знижує гідрофобні властивості графіту в процесі флотації, ускладнюючи збагачення), структурних особливостей (графіт перебуває в зростках з іншими мінералами або вивільнений в результаті їх руйнування) та фізико-механічного стану руд (щільність, тріщинуватість) і визначається після лабораторно-технічних та напівпромислових випробувань руд. Кінцевим етапом флотаційного процесу є марочна класифікація концентрату згідно ДСТУ. Насамперед оцінюється вихід крупнолускатого (тигельного) графіту. За ДСТУ 1702281, вміст класу +0,2 мм в тигельному графіті повинен бути не менше 75%. Решта концентрату розподіляється за зольністю, фізико-хімічними показниками та класом крупності.

Вихід товарних марок Завалівського родовища за даними технологічних випробувань наведено в табл. 5.

Таблиця 5 – Товарні марки графіту

Марка графіту	Тип
Ливарний	ГЛ 1,2,3 – до 45,2%
Тигельний	ГТ-1, ГТ-2, ГТ-3 ГОСТ 457675 – до 15,5%
Елементний	ГЕ-1,ГЕ-2 (крупний) – до 10%; ГЕ-3, ГЕ-4 (дрібний), ГОСТ 747875 - до 12,7%
Олівцевий спеціальний	ГП-1,2,3, ГК-3 – до 16,6%

Джерело: [9]

На даний час в Україні існують перспективи розширення сировинної бази графіту. Руди з високим вмістом графіту виявлені на Млинківській площі в Кіровоградській області; на Середньому Побужжі виявлено 7 перспективних ділянок (Дубінівська, Демов´ярська, Собатинівська, Східно-Савранська, Котовська, ПівденноХащуватська, Шамраївська). Напрямки розвитку графітовидобувної галузі України прописані у "Загальнодержавній програмі розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року" [1, с. 241], де першочерговими завдяннями є виявлення активних запасів графіту на території Української графітоносної провінції, проведення оціночних робіт по вже виявлених ділянках та модернізація виробництва на Завалівському графітовому комбінаті за рахунок випуску принципово нових дефіцитних виробів із терморозширеного та силіцируваного графіту для різних галузей промисловості, ракетно-космічної техніки тощо

Висновки. 1. Промислові типи руд найбільших за запасами родовищ УЩ визначаються за рядом ознак: фізичний стан порід, мінералогічний склад, спосіб збагачення. Останній визначає необхідність виділення та врахування при усередненні підтипів пухких руд, що включають монтморилоніт-гідрослюдисту та каолінову відміни на Завалівському родовищі, каолініт-хлорит-гідрослюдисту та каолінову на Балахівському та каолінову на Буртинському родовищах.

2. Промислове значення руд Завалівського родовища є вищим, ніж решти об'єктів, оскільки їх збагачення дозволяє отримати майже всі товарні марки графіту. Якщо враховувати, що найбільш цінним є графіт тигельний (ГТ), то за цим показником Завалівське родовище помітно перевищує Буртинське майже в чотири рази.

3. Технології збагачення руди, що використовуються Завалівським ГЗК, передбачають застосування найбільш економічно вигідних складових флотації та забезпечують ефективне використання руд.

Список літератури

1. Державний баланс запасів України. Київ. 2018.
2. Закон України «Про затвердження Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року», від 10.06.2012 р.
3. Загнітко В., Лижеченко Н. Динаміка видобування та реалізація графіту в Україні та світі. *Вісник КНУ ім. Тараса Шевченка. Геологія.* 2012. Вип.58. С. 32-35.
4. Металічні і неметалічні корисні копалини України : монографія. Т. 1. Металічні корисні копалини / Д. С. Гурський та ін.; Держ. геол. служба України НАН України. К. : Центр Європи. 2006. 739 с.
5. Каталог базових цін на матеріальні ресурси, що використовуються при геолого-розвідувальних роботах // Міністерство охорони навколишнього природного середовища. УкрДГРІ.
6. Мінеральні ресурси України. Державне науково-виробниче підприємство “Геоінформ України”. Київ 2009. 602 с.
7. Geim, A.K. Graphene: status and prospects. Manchester Centre for Mesoscience and Nanotechnology, University of Manchester, Oxford Road, Manchester. DOI: 10.1126/science.1158877

8. Брагина В. И., Брагин В. И. Флотационные методы обогащения: учебное пособие. Красноярск, 2010. 277 с.
9. Додатко А. Д., Янгичер Н. Н., Карпенко Н. Н. К вопросу о промышленных типах руд графитовых месторождений Украинского щита. *Геологический журнал*. 1981. Т. 41, № 2. С.143–147
10. Заяц Н. Н. Производство и применение чешуйчатого графита Завальевского месторождения: монография (рукопись). Завалье. 2004. 24 с.
11. Смирнов В. О., Білецький В. С. Флотаційні методи збагачення корисних копалин. Донецьк: Схід. видавн. дім. 2010. 492 с.

Referencis

1. *State balance of stocks of Ukraine*. (2018). Kyiv [in Ukrainian].
2. The Law of Ukraine "On Approval of the National Program for the Development of the Mineral Resources of Ukraine until 2030". (n.d.). (dated 10.06.2012) [in Ukrainian].
3. Zahnitko, V. & Lyzhechenko, N. (2012). Dynamika vydobuvannia ta realizatsiia hrafitu v Ukraini ta sviti [[Dynamics of extraction and sale of graphite in Ukraine]. *Visnyk KNU im. Tarasa Shevchenka. Heolohiia Visnyk – Visnyk Taras Shevchenko National University of Kyiv. GEOLOGY*, *Vol.58,* 32-35 [in Ukrainian].
4. Hurs'kyj, D.S. et al. (2006*). Metalichni i nemetalichni korysni kopalyny Ukrainy [Metallic and nonmetallic minerals of Ukraine]*, *Vol. 1*. Metalichni korysni kopalyny; Derzh. heol. sluzhba Ukrainy NAN Ukrainy. Kyiv: Tsentr Yevropy [in Ukrainian].
5. *Catalog of basic prices for material resources used in geological exploration works.* Ministerstvo okhorony navkolyshn'oho pryrodnoho seredovyscha. UkrDHRI [in Ukrainian].
6. *Mineral'ni resursy Ukrainy [Mineral resources of Ukraine]*. (2009). Derzhavne naukovo-vyrobnyche pidpryiemstvo "Heoinform Ukrainy". Kyiv [in Ukrainian].
7. Geim, A.K. (2009). Graphene: status and prospects. Manchester Centre for Mesoscience and Nanotechnology, University of Manchester, Oxford Road, Manchester. DOI: 10.1126/science.1158877
8. Bragina, V.I. & Bragin, V.I. (2010). *Flotacionnye metody obogashhenija [Flotation methods of enrichment]*. Krasnojarsk [in Russian].
9. Dodatko, A.D., Jangicher, N.N. & Karpenko, N. N. (1981). K voprosu o promyshlennyh tipah rud grafitovyh mestorozhdenij Ukrainskogo shhita. [On the issue of industrial types of ore from graphite deposits of the Ukrainian shield]. *Geologicheskij zhurnal - Geological Journal. Vol. 41, № 2*. 143–147 [in Russian].
10. Zajac, N.N. (2004). *Proizvodstvo i primenenie cheshujchatogo grafita Zaval'evskogo mestorozhdenija [Production and application of flake graphite Zavalievskogo field]*. Zaval'e [in Russian].
11. Smyrnov, V.O. & Bilets'kyj, V.S. (2010). *Flotatsijni metody zbahachennia korysnykh kopalyn [Flotation methods of copying kalinis]*. Donets'k: Skhid. vydavn. dim [in Ukrainian].

Volodymyr Kropivnyy, Prof., PhD tech. sci., **Ludmila Molokost,** lecturer**, Olexandr Kuzyk,** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Alena Kropivnaya,** Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Comparative Industrial Assessment of Graphite Deposits and Ores of Ukraine, Characteristics of Ore Concentration

In the article the basic deposits of graphite in Ukraine, methods of enrichment of graphite ores depending on degree of their physical and chemical changes are considered, the industrial estimation is made, the most perspective objects for development are defined.

On the example of the three largest graphite deposits of the Ukrainian shield, the problem of enrichment of graphite ores, as well as the principles of their separation into industrial types, the characteristic of graphite ores and properties of graphite, the use of graphite in industry are given. The properties of this mineral allow you to use it as and carbon in General, in all sectors of the national economy, science and technology. The main fields of application of natural graphite: - metallurgy (production of crucibles, foundry molds, refractories, anti-stick paints); - oil and gas industry; -electrochemistry; -engineering, aviation and space technology (brake pads and pads, self-lubricating mechanical parts - bearings and pads).

Peculiarities of graphite market conjuncture are determined that provides analysis of dynamics of extraction, production, consumption of mineral raw materials in Ukraine and in the world.

graphite, graphite deposits, quality, reserves, ore concentration

Одержано (Received) 25.04.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 30.04.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ В МАШИНАХ

УДК 531.43:621.891 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).103-113

В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук, **С.В. Лисенко,** доц., канд. техн. наук, **А.В. Гриньків,** канд. техн. наук, ст. наук. співр., **В.В. Яцун,** доц., канд. техн. наук, **І.О. Скриннік**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: AulinVV@gmail.com
А.Б. Гупка, канд. техн. наук
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, e-mail: gypkab@gmail.com

Напружено-деформований стан поверхневого шару деталей при реалізації триботехнологій припрацювання і відновлення

З теоретичної точки зору розглянуто вплив триботехнологій припрацювання і відновлення на формування напружено-деформованого стану поверхневих шарів спряжених деталей систем і агрегатів транспортних засобів. Визначено, що переважна більшість їх трибоспряжень працюють в умовах пластичного насиченого або ненасиченого контактів. Модифікований поверхневий шар сформований реалізацією триботехнологій припрацювання і відновлення спряжених деталей розглядали як конструктивно-ортотропні оболонки. Враховуючи систему діючих сил і моментів сил показано, що вони задовольняють рівнянням рівноваги, що характерні для тонких однорідних оболонок Компоненти напруження і деформації поверхневого шару отримані відповідно до узагальненого закону Гука, з урахуванням гіпотези Кірхгофа-Ляве. Ці вирази можна використовувати для оцінки напружено-деформованого стану спряжених поверхонь деталей при їх модифікуванні або впливі в процесі реалізації триботехнологій припрацювання та відновлення для підвищення їх ресурсу.
напружено-деформований стан, триботехнічне припрацювання, триботехнічне відновлення, моделювання, поверхневий шар, напруження

В.В. Аулин, проф., д-р техн. наук, **С.В. Лысенко,** доц., канд. техн. наук, **А.В. Гринькив,** канд. техн. наук, ст. научн. сотр., **В.В. Яцун,** доц., канд. техн. наук, **И.А. Скринник,** доц., канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина
А.Б. Гупка, канд. техн. наук
Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, г. Тернополь, Украина

Напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя деталей при реализации технологий триботехнической приработки и восстановления

С теоретической точки зрения рассмотрено влияние триботехнологий приработки и восстановления на формирование напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев сопряженных деталей систем и агрегатов транспортных средств. Определено, что подавляющее большинство их трибосопряжений работают в условиях пластического насыщенного или ненасыщенного контактов. Модифицированный поверхностный слой сформированный реализацией триботехнологий приработки и восстановления сопряженных деталей рассматривали как конструктивно-ортотропные оболочки. Учитывая систему действующих сил и моментов сил показано, что они удовлетворяют уравнениям равновесия, характерным для тонких однородных оболочек Компоненты напряжения и деформации поверхностного слоя полученные в соответствии с обобщенного закона Гука, с учетом гипотезы Кирхгофа-Ляве. Эти выражения можно использовать для оценки напряженно-деформированного состояния сопряженных поверхностей деталей при их модифицировании или воздействии в процессе реализации триботехнологий приработки и восстановления для повышения их ресурса.
напряженно-деформированное состояние, триботехническая приработка, триботехническое восстановления, моделирование, поверхностный слой, напряжение

© В.В. Аулін, С.В. Лисенко, А.В. Гриньків, В.В. Яцун, І.О. Скриннік, А.Б. Гупка, 2019

Постановка проблеми. Подовження ресурсу та підвищення ефективності експлуатаційної надійності трибоспряжень деталей систем і агрегатів транспортної техніки модифікуванням їх елементів різними технологіями не викликає сумнівів. В останній час широке розповсюдження отримали методи інженерінгу поверхонь деталей та подовження ресурсу їх спряжень за допомогою триботехнологій припрацювання (ТТП) і відновлення (ТТВ) [1, 2]. Однак недостатність обсягу інформації про ТТП і ТТВ, частково внаслідок їх комерційної закритості, а частково й через її відсутність, заважає широкому застосуванню таких таких ефективних та перспективних технологій на транспорті. Тому розкриття фізичної сутності процесів, що відбуваються в поверхневих шарах матеріалів деталей і на поверхнях тертя сформованих покриттів з використанням композиційних мастильних середовищ, є актуальним науковим завданням. Поряд з експериментальними дослідженнями процесів припрацювання і відновлення робочих поверхонь спряжених деталей [3] перспективними є методи інженерно-математичного моделювання характеристик і властивостей сформованих поверхневих шарів їх матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо [4-7], що при реалізації ТТП і ТТВ в трибоспряженнях деталей, утворюються поверхневі шари специфічної структури, змінюється їх склад та властивості. Склад залежить передусім від застосованої композиційної оливи. При використанні геомодифікаторів завжди формується металокерамічне покриття [8]. Передумови створення концептуальної моделі напружено-деформованого стану (НДС) поверхневого шару матеріалу [9], а також покриття сформованого на деталях трибоспряжень проаналізовані в роботах [1,10,11].

Математичній постановці завдань визначення характеристик контакту силової взаємодії спряжених пружних поверхонь зразків і деталей присвячені роботи [12]. У роботі [12] розвинено метод інженерінгу для вирішення контактних завдань, що приводять до одержання наближених аналітичних виразів визначення параметрів контакту. В роботі [13], на основі цього методу були отримані вирази для взаємодії циліндричного штампу із пружним двошаровим півпростором. Моделюванню контакту сферичних поверхонь із урахуванням шорсткості, хвилястості, макровідхилень і фізико-механічних властивостей поверхневого шару присвячена роботи [1, 11].

На сьогодні відома достатньо велика кількість моделей і зроблені обчислення характеристик контакту для поверхонь різних конфігурацій. Недоліком запропонованих методик оцінки характеристик покриттів є те, що параметри їх стану враховуються не повною мірою. Відомо, що матеріали, що працюють в умовах контактної взаємодії й тертя ковзання, мають здатність трансформувати вихідну структуру. Установлено, що при роботі важко навантажених трибоспряжень деталей при контактних навантаженнях $\sigma = 700...1800$ МПа в процесі припрацювання має місце збільшення спотворень кристалічної структури та щільності дислокацій, викликані великим ступенем деформації мікропрофілю [14].

Перехід від вихідного стану поверхні спряжених деталей до експлуатаційного й наступного руйнування супроводжується складними фізико-механічними й структурними перетвореннями в поверхневих шарах матеріалу деталей [15], які доцільно враховувати в розрахунках параметрів контакту, оцінках ресурсу та рівня надійності. Тому розгляд напружено-деформованого стану (НДС) поверхневого шару матеріалу деталей може базуватися на підході, що враховує основну реологічну відмінність у порівнянні із класичним тертям. Найбільш застосовним підходом при аналізі процесів і станів самоорганізації матеріалів деталей [16] є інформаційно-статистичний підхід, який, у свою чергу, не може бути проведений без аналізу діючих

на них сил і моментів.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка підходу фізико-математичного моделювання напружено-деформованого стану поверхневого шару деталей при реалізації ТТП і ТТВ з використанням геомодифікаторів в композиційній оливі та побудова концептуальної моделі на основі аналізу властивостей поверхневих шарів матеріалів деталей спряжень систем і агрегатів засобів транспорту.

Виклад основного матеріалу. В процесі експлуатації з реалізацією ТТП і ТТВ матеріали спряжених деталей мають складний напружено-деформований стан, кожний з яких визначається системою "основний матеріал-поверхневий шар (покриття)" [14,17]. На поверхневий шар деталі одночасно діє цілий комплекс напружень: дотичні напруження деформацій зсуву і кручення, а також нормальні напруження деформацій розтягу і стиску та поздовжнього вигину. Реальну картину НДС можна оцінити по величині еквівалентних напружень, відомих за IV енергетичною гіпотезою міцності С.П. Тимошенко [18]:

$$\sigma_{екв.IV} = \sqrt{\sigma_{\Sigma}^2 + 3\tau_{\Sigma}^2}\,, \tag{1}$$

де σ_{Σ}^2, τ_{Σ} – сумарні нормальні та дотичні напруження в небезпечному перерізі поверхневого шару деталі. Небезпечним перерізом буде перетин, де діє максимальне контактне напруження $q_{\max}$.

Для визначення величини σ_{Σ} використовуємо вираз для оцінки нормальних усереднених напружень у зонах контакту абсолютно твердої кулі із плоскою поверхнею пружно-деформованого матеріалу, тобто об'ємну модель Вінклера [19]:

$$\sigma_n = \frac{0{,}42E_{зв}}{(1-\mu_{зв})}\sqrt{\frac{h_{деф}}{R_к}}\,, \tag{2}$$

де $R_к$ – радіус кулі-індентора;

$\mu_{зв}$, $E_{зв}$ – зведені коефіцієнт Пуассона та модуля пружності матеріалу поверхневого шару;

$h_{деф}$ – товщина зони деформованого шару.

В процесі експлуатації поверхневий шар деталі, сформований ТТП або ТТВ, перебуває в умовах пластичності й повзучості. Оскільки він створюється в умовах нестаціонарного зовнішнього навантаження, то є сенс вважати його повзучість динамічною. Розрахунок на динамічну повзучість зводиться до визначення довговічності зміцнення деталей ТТП або ТТВ при відомих або заданих наступних параметрах: температурі, еквівалентному напруженні й граничній деформації.

Довговічність поверхневого шару сформованого ТТП або ТТВ, що відповідає характерному напруженню $\sigma_{екв}$ або σ_{-1}, можна встановити, задаючись граничною відносною деформацією ε, і використовуючи криву Велера для даної температури. Аналогічно чином можливе вирішення й зворотного завдання – визначення граничних напружень по заданій довговічності і граничній відносній деформації ε.

Відомо, що при пружних деформаціях у зонах контакту циклічна довговічність до руйнування матеріалу поверхневого шару визначається моделлю Вінклера:

$$n = \left(\sigma_в / \sigma_{р-с}\right)^m, \tag{3}$$

де n – число циклів;

$\sigma_в$ – межа міцності;

$\sigma_{р-с}$ – напруження розтягу-стиску, викликані силами тертя;

m – показник степеня у рівнянні Велера, залежний від фізико-механічних

властивостей матеріалу деталей. Для високолегованих жаростійких конструкційних сталей цей параметр дорівнює $m = 4$ [19].

У випадку пластичного ненасиченого контакту багаторазове пластичне деформування сформованого шару та покриттів викликає зношування від малоциклової утоми. У цьому випадку число циклів *n* до руйнування дорівнює:

$$n = \left(2\varepsilon_в / \varepsilon_t\right)^m, \tag{4}$$

де $\varepsilon_в$ – деформація, що відповідає межі міцності $\sigma_в$;

ε_t – деформація, що виникає під дією сил тертя.

Установлено, що $\varepsilon_t = 0{,}025 f_{тр} \mathrm{tg}\theta$, де $f_{тр}$ – коефіцієнт тертя; θ – кут нахилу мікронерівності до площини її основи. При пружному ненасиченому контакті дотичне напруження дорівнює:

$$\tau_n = \tau_0 + \beta p_{\max}, \tag{5}$$

де τ_0 й β – фрикційні характеристики, що залежать від умов роботи трибоспряжень деталей. При цьому основні триботехнічні характеристики коефіцієнт тертя $f_{тр}$, інтенсивність зношування I_u, питомий тиск $p_{\max}$ у зоні контакту, враховуючи фізико-механічні параметри та НДС, можна оцінити за формулами:

$$f_{тр} = 1{,}4\left[\frac{\tau_0\left(1-\mu_{зв}^2\right)}{E_{зв}}\right] + \beta;\ I_u = \frac{1{,}5}{n\alpha}\left(\frac{h}{R}\right)^{1/2};\ p_{\max} = 1{,}66\left[\frac{\tau_0 E_{зв}}{(1-\mu_{зв}^2)\alpha}\right]^{1/2}. \tag{6}$$

де α – коефіцієнт, що характеризує напружений і кінематичний стан матеріалу деталі у зоні контакту. Для пружного ненасиченого контакту рекомендується вважати $\alpha \approx 0{,}75$, а для насиченого – $\alpha \approx 0{,}88$ [11].

Зазначимо, що переважна більшість трибоспряжень деталей систем і агрегатів засобів транспорту працюють в умовах пластичного насиченого або ненасиченого контактів. Насиченим є контакт двох шорстких спряжених поверхонь, при якому число контактуючих нерівностей дорівнює числу нерівностей, розташованих на контурній площі контакту. Такий вид контакту характерний для умов ковзання шорсткої поверхні матеріалу деталі з великою твердістю по поверхні матеріалу спряженої деталі, що має меншу шорсткість і меншу твердість. Ненасичений контакт виникає, коли число контактів нерівностей менше числа нерівностей, розташованих на контурній площі контакту. Ненасичений контакт виникає при терті деталей, твердість матеріалів яких практично не відрізняється [1,11].

Якщо у виразі (3) $n \to +\infty$, що має місце при реалізації ТТП і ТТВ, то при цьому матеріал поверхневого шару деталі в експлуатації поводить себе як квазів'язкий, $\sigma_в \to 0$. Можливе також одночасне прагнення $m \to +\infty$. В таких умовах матеріал сформованих поверхневих шарів деталей переходить із пружної області в область динамічної повзучості.

Виходячи з гіпотези Кірхгофа-Ляве [20], складні просторові завдання аналізу НДС матеріалу поверхневого шару деталей, як конструктивно-ортотропної системи, можна звести до зведеної поверхні двовимірними процесами деформування.

Розглянемо модифікованій поверхневій шари сформовані на деталях реалізацією ТТП або шари покриття – при ТТВ, як конструктивно-ортотропні оболонки. При цьому поверхні зведення визначаються параметром z_0 (рис. 1).

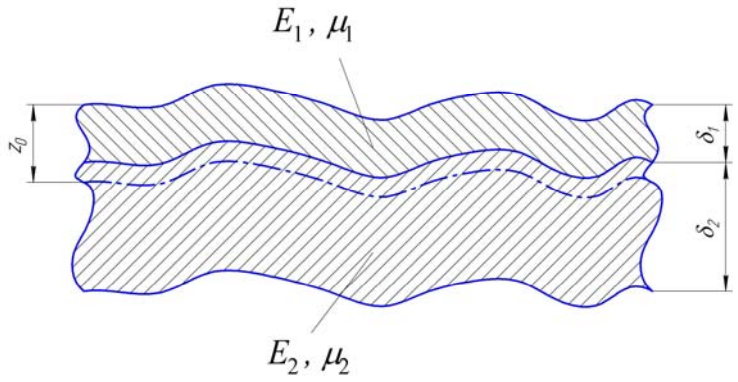


Рисунок 1 – Схема поверхневого шару деталі для визначення параметру z_0: E_1, E_2; μ_1, μ_2 – модулі пружності і стала Пуассона для двох підшарів; δ_1, δ_2 – товщини першого та другого підшарів

Джерело: розроблено авторами

Виходячи з роботи [11], параметр z_0 оцінюється за формулою:

$$z_0 = \frac{E_1\delta_1^2 + 2E_2\delta_1\delta_2 + E_2\delta_2^2}{2\left(E_1\delta_1 + E_2\delta_2\right)}. \quad (7)$$

Для поверхонь зведення можливі наступні співвідношення:

– для верхньої частини шару: $E_1\delta_1^2 > E_2\delta_2^2$;

– для нижньої частини шару: $E_1\delta_1^2 < E_2\delta_2^2$;

– для поверхні поділу фаз: $E_1\delta_1^2 = E_2\delta_2^2$.

Зазначене визначає фізичний зміст умови зведення Вілларсо. Якщо положення точки на поверхні зведення визначає ортогональна система криволінійних координат α_1, α_2, а координатні лінії збігаються з лініями кривизни цієї поверхні, то розташування їх по товщині визначатиметься відстанню z від поверхні зведення. При цьому відстань z буде позитивною z>0, якщо точки розташовані з боку зовнішньої нормалі і негативною z<0 – у протилежному випадку.

Відносні деформації розтягу й зсув поверхні зведення позначимо через ε_1, ε_2, $\omega = 2\varepsilon_3$, а зміни кривизни і деформації кручення – через ξ_1, ξ_2, ξ_3. Ці параметри повністю визначають деформований стан поверхневого шару як двошарової оболонки й подаються через компоненти переміщення уздовж координатних ліній S_1, S_2 і по зовнішній нормалі S_3.

Напружений стан оболонки, що виникає в нормальних перетинах, описується цілком певними функціями координати z незалежно від структури оболонки поверхневого шару по товщині. Підсумовуючи напруження по товщині оболонки, систему напружень можна замінити статично еквівалентною системою сил і моментів $\vec{T}_1$, $\vec{T}_2$, $\vec{S}$, $\vec{G}_1$, $\vec{G}_2$, $\vec{M}_1$, $\vec{M}_2$, розрахунок оболонки зводиться до розв'язання завдання дослідження станів рівноваги й деформування зведеної поверхні (рис. 2).

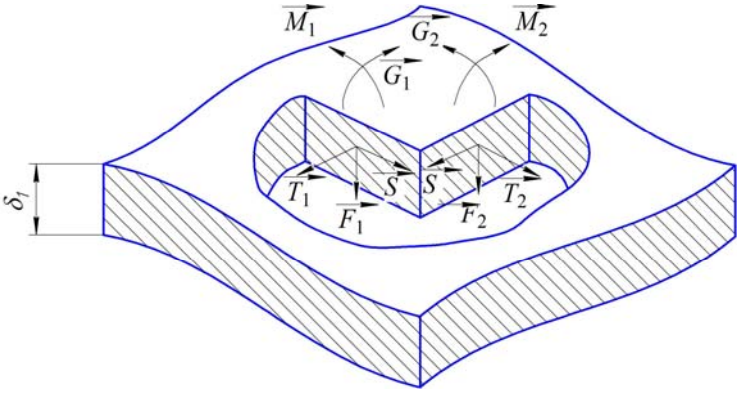


Рисунок 2 – Позитивні напрямки зусиль $\vec{T}_1$, $\vec{T}_2$, $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{S}$, $\vec{G}_1$, $\vec{G}_2$ і моментів $\vec{M}_1$, $\vec{M}_2$, що діють на зсувний поверхневий шар сформований під час реалізації ТТП і ТТВ

Джерело: розроблено авторами на основі [21]

Незалежно від структури поверхні сформованого шару, діючі сили й моменти сил задовольняють звичайним рівнянням рівноваги, які використовуються в теорії тонких однорідних оболонок:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial(\lambda_2,T_1)}{\partial\alpha}+\dfrac{\partial(\lambda_1,S)}{\partial\alpha_2}-T_2\dfrac{\partial\lambda_2}{\partial\alpha_2}+S\dfrac{\partial\lambda_1}{\partial\alpha_2}-\lambda_1\lambda_2\dfrac{F_1}{R_1}+\lambda_1\lambda_2N_x=0; \\ \dfrac{\partial(\lambda_1,T_2)}{\partial\alpha_1}+\dfrac{\partial(\lambda_2,S)}{\partial\alpha_2}-T_1\dfrac{\partial\lambda_1}{\partial\alpha_2}+S\dfrac{\partial\lambda_2}{\partial\alpha_1}-\lambda_1\lambda_2\dfrac{F_2}{R_2}+\lambda_1\lambda_2N_y=0; \\ \dfrac{\partial(\lambda_2,F_1)}{\partial\alpha_1}+\dfrac{\partial(\lambda_1,F_2)}{\partial\alpha_2}+\lambda_1\lambda_2\left(\dfrac{T_1}{R_1}+\dfrac{T_2}{R_2}\right)-\lambda_1\lambda_2N_z=0; \\ \dfrac{\partial(\lambda_2,G_1)}{\partial\alpha_1}+\dfrac{\partial(\lambda_1,M_2)}{\partial\alpha_2}-G_2\dfrac{\partial\lambda_2}{\partial\alpha_1}+M_1\dfrac{\partial\lambda_1}{\partial\alpha_2}-\lambda_1\lambda_2F_1=0; \\ \dfrac{\partial(\lambda_1,G_2)}{\partial\alpha_2}+\dfrac{\partial(\lambda_2,M_1)}{\partial\alpha_1}-G_1\dfrac{\partial\lambda_1}{\partial\alpha_1}+M_2\dfrac{\partial\lambda_2}{\partial\alpha_1}-\lambda_1\lambda_2F_2=0. \end{cases} \quad (8)$$

де λ_1, λ_2, R_1, R_2 – параметри Ляме – показники анізотропії та найменші радіуси кривизни у взаємоперпендикулярних площинках; N_x, N_y, N_z – компоненти навантаження на поверхню; $S_1 = S_2 = S$.

Систему рівняння (8) розв'яжемо для граничних умов, коли граничним контуром є лінія $\alpha_1 = \text{const}$:

– якщо край поверхневого шару вільний:

$$T_1 = S = F_1 + \frac{1}{\lambda_2}\frac{\partial M_1}{\partial\alpha_2} = G_1 = 0;$$

– якщо край поверхневого шару жорстко закріплений:

$$S_1 = S_2 = S_3 = \frac{1}{\lambda_1}\frac{\partial S_3}{\partial\alpha_1} - \frac{U}{R_1} = 0;$$

– якщо край поверхневого шару нерухомо обпертий:

$S_1 = S_2 = S_3 = 0$; $G_1 = 0$ і т.д.

Визначивши, таким чином, компоненти переміщення S_1, S_2, S_3, знаходимо пружні сил й моменти сил, що діють на поверхневий шар при реалізації ТТП або ТТВ:

$$T_1 = E_{1e}\delta_1(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2); \qquad T_2 = E_{1e}\delta_1(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1);$$

$$G_1 = -\frac{E_{1e}\delta_1^3}{12}(\xi_1 + \mu\xi_2); \qquad G_2 = -\frac{E_{1e}\delta_1^3}{12}(\xi_2 + \mu\xi_1);$$

$$S = E_{1e}\delta_1(1-\mu)\varepsilon_3; \qquad M = \frac{E_{1e}\delta_1^3}{12}(1-\mu)\xi_3,$$

де $E_e = E_1/\left(1-\mu_1^2\right)$ – ефективний модуль пружності покриття. Компоненти деформацій, враховуючи попереднє, дорівнює:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \dfrac{1}{H_{зв}^{рс}(1-\mu_{зв}^2)}(T_1 - \mu_{зв}T_2); \\ \varepsilon_2 = \dfrac{1}{H_{зв}^{рс}(1-\mu_{зв}^2)}(T_2 - \mu_{зв}T_1); \\ \varepsilon_3 = \dfrac{1}{H_{зв}^{рс}(1-\mu_{зв}^2)}S; \\ \xi_1 = -\dfrac{1}{H_{зв}^{в}(1-\mu_{зв}^2)}(G_1 - \mu_{зв}G_2); \\ \xi_2 = -\dfrac{1}{H_{зв}^{в}(1-\mu_{зв}^2)}(G_2 - \mu_{зв}G_1); \\ \xi_3 = -\dfrac{1}{H_{зв}^{в}(1-\mu_{зв}^2)}M_{1(2)}, \end{cases}$$

де $\mu_{зв} = \left(\mu_1E_1\delta_1 + \mu_2E_2\delta_2\right)/\left(E_1\delta_1 + E_2\delta_2\right)$; $H_{в_{зв}}^{рс}$ – зведена твердість двошарової системи при деформаціях розтягу-стиску $H_{зв}^{рс} = \left(E_1\delta_1 + E_2\delta_2\right)/\left(1-\mu_{зв}^2\right)$; $H_{зв}^{в}$ – зведена твердість двошарової системи при деформації вигині,

$$H_{зв}^{в} = \frac{E_1^2\delta_1^4 + 4E_1E_2\delta_1^3\delta_2 + 6E_1E_2\delta_1^2\delta_2^2 + 4E_1E_2\delta_1\delta_2^3 + E_2^2\delta_2^4}{12(E_1\delta_1 + E_2\delta_2)}.$$

Визначити компоненти деформації поверхневого шару деталі можна також через компоненти переміщень S_1, S_2, S_3:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \dfrac{1}{\lambda_1}\dfrac{\partial S_1}{\partial\alpha_1} + \dfrac{S_2}{\lambda_1\lambda_2}\dfrac{\partial\lambda_1}{\partial\alpha_2} + \dfrac{S_3}{R_1}; \\ \varepsilon_2 = \dfrac{1}{\lambda_1}\dfrac{\partial S_2}{\partial\alpha_2} + \dfrac{S_1}{\lambda_1\lambda_2}\dfrac{\partial\lambda_2}{\partial\alpha_1} + \dfrac{S_3}{R_2}; \\ 2\varepsilon_3 = \dfrac{\lambda_2}{\lambda_1}\dfrac{\partial}{\partial\alpha_1}\left(\dfrac{S_2}{\lambda_2}\right) + \dfrac{\lambda_1}{\lambda_2}\dfrac{\partial}{\partial\alpha_2}\left(\dfrac{S_1}{\lambda_1}\right); \\ \xi_1 = \dfrac{1}{\lambda_1}\dfrac{\partial}{\partial\alpha_1}\left(\dfrac{1}{\lambda_1}\dfrac{\partial S_3}{\partial\alpha_1}\dfrac{S_1}{R_1}\right) - \dfrac{1}{\lambda_1\lambda_2}\dfrac{\partial\lambda_1}{\partial\alpha_2}\left(\dfrac{1}{\lambda_1}\dfrac{\partial S_3}{\partial\alpha_2}\dfrac{S_1}{R_2}\right); \\ \xi_2 = \dfrac{1}{\lambda_1}\dfrac{\partial}{\partial\alpha_2}\left(\dfrac{1}{\lambda_1}\dfrac{\partial S_3}{\partial\alpha_2}\dfrac{S_2}{R_2}\right) - \dfrac{1}{\lambda_1\lambda_2}\dfrac{\partial\lambda_2}{\partial\lambda_1}\left(\dfrac{1}{\lambda_1}\dfrac{\partial S_3}{\partial\alpha_1}\dfrac{S_1}{R_1}\right); \\ \xi_3 = \dfrac{1}{\lambda_1\lambda_2}\left(\dfrac{\partial^2 S_3}{\partial\alpha_1\partial\alpha_2} - \dfrac{1}{\lambda_1}\dfrac{\partial\lambda_1}{\partial\alpha_2}\dfrac{\partial S_3}{\partial\alpha_1} - \dfrac{1}{\lambda_2}\dfrac{\partial\lambda_2}{\partial\alpha_1}\dfrac{\partial S_3}{\partial\alpha_2}\right) + \\ + \dfrac{1}{R_1}\left(\dfrac{1}{\lambda_2}\dfrac{\partial S_1}{\partial\alpha_2} - \dfrac{S_1}{\lambda_1\lambda_2}\dfrac{\partial\lambda_1}{\partial\alpha_2}\right) + \dfrac{1}{R_2}\left(\dfrac{1}{\lambda_2}\dfrac{\partial S_2}{\partial\alpha_1} - \dfrac{S_2}{\lambda_1\lambda_2}\dfrac{\partial\lambda_2}{\partial\alpha_1}\right). \end{cases}$$

Після визначення компонентів деформації зведеного поверхневого шару переходимо до визначення напружень у нормальних перерізах двошарової системи відповідно до узагальненого закону Гука, з урахуванням гіпотез Кірхгофа-Ляве у верхньому його підшарі покриття:

$$\begin{cases} \sigma_1^{(1)} = E_1\left[\varepsilon_1 + \mu_1\varepsilon_2 + z(\xi_1 + \mu_1\xi_2)\right]; \\ \sigma_2^{(1)} = E_1\left[\varepsilon_2 + \mu_1\varepsilon_1 + z(\xi_2 + \mu_1\xi_1)\right]; \\ \tau^{(1)} = E_1(1-\mu_1)(\varepsilon_3 + z\xi_3); \end{cases}$$

у нижньому підшарі системи:

$$\begin{cases} \sigma_1^{(2)} = E_2\left[\varepsilon_1 + \mu_2\varepsilon_2 + z(\xi_1 + \mu_2\xi_2)\right]; \\ \sigma_2^{(2)} = E_2\left[\varepsilon_2 + \mu_2\varepsilon_1 + z(\xi_2 + \mu_2\xi_1)\right]; \\ \tau^{(2)} = E_2(1-\mu_2)(\varepsilon_3 + z\xi_3). \end{cases}$$

Таким чином, теоретично визначено вирази, за якими можливе проведення оцінки напружено-деформованого стану поверхневого шару або покриттів при реалізації триботехнологій припрацювання та відновлення.

Висновки:

1. Розроблено загальний теоретичний підхід до моделювання напружено-деформованого стану поверхневого шару матеріалу і оцінки його характеристик при реалізації триботехнологій припрацювання і відновлення. Проведено попередню оцінку напружено-деформованого стану поверхневого шару як двопідшарової структури.

2. Запропоновано концептуальну модель напружено-деформованого шару, сформованого під дією триботехнологій припрацювання і відновлення, як системи, що дозволяє визначити компоненти деформацій і напружень у зовнішній та у внутрішній його частинах.

3. Проведені попередні оцінки за допомогою цієї моделі показали, що міцність основи деталей трибоспряжень та їх довговічність не погіршуються, а навіть збільшуються на 3...5%. Це свідчить про те, що застосування геомодифікаторів в оливному середовищі під час реалізації триботехнологій припрацювання і відновлення приводить не тільки до поліпшення триботехнічних характеристик робочих поверхонь деталей спряжень, але й не погіршують механічних критеріїв їх працездатності. Аналітичне обґрунтування може стати основою для створення повноцінної математичної моделі при прогнозування поведінки деталей спряжень.

Список літератури

1. Замота Т.Н., Аулин В.В. Управление процессами приработки основных сопряжений деталей машин при изготовлении и ремонте: Монография. Кировоград: изд. Лысенко В.Ф. 2015. 303 с.
2. Трибофізичні основи підвищення надійності мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки технологіями триботехнічного відновлення: монографія / Аулін В.В. та ін.; за ред. В.В. Ауліна. Кропивницький: Лисенко В. Ф. 2016. 303 с.
3. Аулін В.В., Кузик О.В. Зміна стану зон тертя деталей машин та динамічне трибоматеріалознавство їх поверхневих шарів. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* 2013. Вип. 26. С.32-40.
4. Аулін В.В., Лисенко С.В., Замота Т.М. Зменшення механічних втрат в основних спряженнях деталей дизелів МСГТ і АТТ триботехнологіями відновлення. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Сер.: Техніка та енергетика АПК.* 2017. Вип.262. С.211-227.
5. Трибологические переходы при приработке поверхностей трения сопряжений деталей / Аулин В.В. и др. *Проблеми трибології.* 2017. № 4. С. 87-96.
6. Фізико-мезомеханічний підхід до виявлення характеру зношування спряжень деталей

сільськогосподарської і автотранспортної техніки / Аулін В.В., Лисенко С.В., Кузик О.В., Жилова І.В. *Проблеми трибології.*. 2017. № 4. С. 82-86.
7. Можливості технологій триботехнічного відновлення для підвищення зносостійкості і довговічності спряжень деталей транспортних засобів / Аулін В.В. та ін. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті: науковий журнал.* 2018. №1(10). С. 5-11.
8. Перспективы развития триботехнологий повышения долговечности деталей дизелей мобильной техники / Аулин В.В., Соловых Е.К., Лысенко С.В., Кузык А.В. *Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 100-летию со дня рождения профессора Вадивасова Д.Г.* Саратов: СГАУ. 2009. С.10-16.
9. Аулін В.В., Лисенко С.В. Фізико-технологічні засади підвищення надійності трибосистем дизелів мобільної сільськогосподарської техніки. *Вісник ЖНАЕУ: науково-теоретичний збірник.* 2014. вип. № 2 (45), т.4, ч.ІІ. С. 56-68.
10. Аулин В.В., Замота Т.Н., Лысенко 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. No.2. P. 89-96.
11. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / отв. ред. А.Ю. Ишлинский. Москва: Наука. 2001. 478 с.
12. Аулин В.В., Замота Т.Н. Развитие площади пятна контакта при макроприработке поверхностей трения. *Проблеми трибології.* 2012. №1. С.9-13.
13. Воронин Н.А. Инженерный метод решения контактной задачи о взаимодействии цилиндрического штампа с упругим двухслойным полупространством. *Трение и износ*. 1994. Т.14, № 5. С. 754-763.
14. Аулин В.В. Замота Т.Н., Лысенко С.В. Повышение долговечности мобильной сельскохозяйственной и автотранспортной техники триботехнологиями приработки основных сопряжений деталей двигателей. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів.* 2017. №8. С. 55-68.
15. Аулін, В.В., Лисенко С.В., Білик А.П. Трибофізичне та фізико-технологічне обґрунтування комбінованого функціонально-спрямованого зміцнення та модифікування деталей і робочих органів СГТ. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник.* 2014. Вип. 44. С. 92-103.
16. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах: монографія. Кіровоград: Вид. Лисенко В.Ф. 2014. 370 с.
17. Масштабно-рівневий підхід до аналізу процесів в матеріалах трибоспряжень деталей мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки / Аулін В.В., Лисенко С.В., Великодний Д.О., Гупка А.Б. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин.* 2017. Вип.47, ч.І. С.52-59.
18. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости: пер. с англ. / под ред. Г.С. Шапиро 2-е изд., Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. 560 с.
19. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / Биргер И.А. и др. – 4-е изд., перераб. и доп., Москва: Машиностроение. 1993. 640 с.
20. Аулін В. В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки: дис. д-ра. техн. наук : 05.02.04 / КНТУ. Кіровоград, 2014. 447 с.
21. Джус Р.М., Приймаков О.Г., Приймаков Г.О. Моделювання процесів відновлення трібосполучень військової техніки застосуванням ревіталізантів. *Системи обробки інформації.* 2007. Вип.2. С. 16-19.

References

1. Zamota, T.N., Aulin, V.V. (2015). *Upravlenie protsessami prirabotki osnovnyih sopryazheniy detaley mashin pri izgotovlenii i remonte: Monografiya [Management of the running-in processes of the main interfaces of machine parts in the manufacture and repair: Monograph]*. Kirovograd: izd. Lyisenko V.F. [in Russian].
2. Aulin, V.V. at all. (2016). *Trybofizychni osnovy pidvyshchennia nadiinosti mobilnoi silskohospodarskoi ta avtotransportnoi tekhniky tekhnolohiiamy trybotekhnichnoho vidnovlennia: monohrafiia [Tribophysical fundamentals of increasing the reliability of mobile agricultural and motor vehicles with tribotechnical recovery technologies: monograph]*. Kropyvnytskyi: Lysenko V.F. [in Ukrainian].
3. Aulin, V.V., Kuzyk, O.V. (2013). Zmina stanu zon tertia detalei mashyn ta dynamichne trybomaterialoznavstvo yikh poverkhnevykh shariv [Changing the state of friction zones of machine parts and the dynamic tribomateriality of their surface layers]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Collection of scientific works of Kirovohrad National Technical*

University. Engineering in agricultural production, industry engineering, automation. Issue 26, 32-40 [in Ukrainian].

4. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Zamota, T.M. (2017) Zmenshennia mekhanichnykh vtrat v osnovnykh spriazhenniakh detalei dyzeliv MSHT i ATT trybotekhnolohiiamy vidnovlennia [Reduction of mechanical losses in the main conjugations of the details of the MSCM and MV diesels with tribotechnology of restoration]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Ser.: Tekhnika ta enerhetyka APK – Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Ser.: APC Engineering and Energy, Issue 262,* 211-227 [in Ukrainian].
5. Aulin, V.V. at al. (2017). Tribologicheskie perehody pri prirabotke poverhnostej treniya sopryazhenij detalej [Tribological transitions in the fitting of friction surfaces of joints of parts]. *Problemy trybolohii - Problems of tribology, № 4,* 87-96 [in Russian].
6. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Kuzyk, O.V., Zhylova, I.V. (2017). Fizyko-mezomekhanichnyi pidkhid do vyiavlennia kharakteru znoshuvannia spriazhen detalei silskohospodarskoi i avtotransportnoi tekhniky [Physico-mesomechanical approach to detecting the nature of the wear of the coupling of agricultural and motor vehicle parts]. *Problemy trybolohii - Problems of tribology, № 4,* 82-86 [in Ukrainian].
7. Aulin, V.V. et al. Mozhlyvosti tekhnolohii trybotekhnichnoho vidnovlennia dlia pidvyshchennia znosostiikosti i dovhovichnosti spriazhen detalei transportnykh zasobiv [Possibilities of tribotechnical restoration technologies to improve the durability and durability of the conjugations of vehicle parts]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti: naukovyi zhurnal – Modern technologies in mechanical engineering and transport: scientific journal, №1(10),* 5-11 [in Ukrainian].
8. Aulin, V.V., Solovyh, E.K., Lysenko, S.V., Kuzyk, A.V. (2009). Perspektivy razvitiya tribotehnologij povysheniya dolgovechnosti detalej dizelej mobilnoj tehniki [Prospects for the development of tribotechnologies for increasing the durability of diesel engine parts of mobile equipment]. *Materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashennoj 100-letiyu so dnya rozhdeniya professora Vadivasova D.G. – Materials Intern. scientific-practical Conf., dedicated to the 100th anniversary of Professor Vadivasov D.G., (pp.10-16)* Saratov: SGAU [in Russian].
9. Aulin, V.V., Lysenko, S.V. (2014). Fizyko-tekhnolohichni zasady pidvyshchennia nadiinosti trybosystem dyzeliv mobilnoi silskohospodarskoi tekhniky [Physico-technological principles of increasing the reliability of tribosystems of diesels of mobile agricultural machinery]. *Visnyk ZhNAEU: naukovo-teoretychnyi zbirnyk - ZhNAEU Bulletin: scientific and theoretical collection, issue. № 2(45), T. 4, part II.* 56-68 [in Ukrainian].
10. Aulin, V.V., Zamota, T.N., Lysenko, S.V. (2016). Povyshenie ekspluatacionnoy iznosostoykosti detaley mashin ih tribotehnicheskim vosstanovleniem i upravleniem processami prirabotki [Improving the operational wear resistance of machine parts by their tribotechnical restoration and management of running-in processes]. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, Vol.18, No.2,* 89-96 [in Russian].
11. Goryacheva, I.G. (2001). *Mehanika frikcionnogo vzaimodeystviya [Friction Mechanics].* Moskow: Nauka [in Russian].
12. Aulin, V.V., Zamota, T.N. (2012). Razvitie ploschadi pyatna kontakta pri makroprirabotke poverhnostey treniya [The development of the area of the contact spot during macroprocessing of friction surfaces]. *Problemi tribologiї – Problems of tribology,* №1, 9-13 [in Russian].
13. Voronin, N.A. (1994). Inzhenernyy metod resheniya kontaktnoy zadachi o vzaimodeystvii cilindricheskogo shtampa s uprugim dvuhsloynym poluprostranstvom [An engineering method for solving the contact problem of the interaction of a cylindrical stamp with an elastic two-layer half-space]. *Trenie i iznos – Friction and wear, V.14, No.5,* 754-763 [in Russian].
14. Aulin, V.V., Zamota, T.N., Lysenko, S.V. (2017). Povyshenie dolgovechnosti mobil'noy sel'skohozyaystvennoy i avtotransportnoy tehniki tribotehnologiyami prirabotki osnovnyh sopryazheniy detaley dvigateley [Improving the longevity of mobile agricultural and motor vehicles with tribotechnologies of running-in of the main interfaces of engine parts]. *Tekhnichnyi servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv – Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes, №8,* 55-68 [in Russian].
15. Aulin, V.V., Lysenko S.V., Bilyk A.P. (2014). Trybofizychne ta fizyko-tekhnolohichne obgruntuvannia kombinovanoho funktsionalno-spriamovanoho zmitsnennia ta modyfikuvannia detalei i robochykh orhaniv SHT [Tribophysical and physico-technological substantiation of combined functionally directed strengthening and modification of parts and working bodies of the SGT]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn: Zahalnoderzhavnyi mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk – Design, production and operation of agricultural machines: National interagency scientific and technical collection, Vol. 44,* 92-103 [in Ukrainian].

16. Aulin, V.V. (2014). *Fizychni osnovy protsesiv i staniv samoorhanizatsii v trybotekhnichnykh systemakh: monohrafiia [Physical bases of processes and states of self-organization in tribotechnical systems: monograph]*. Kirovohrad: Vyd. Lysenko V.F. [in Ukrainian].
17. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Velykodnyi, D.O., Hupka, A.B. (2017). Masshtabno-rivnevyi pidkhid do analizu protsesiv v materialakh trybospriazhen detalei mobilnoi silskohospodarskoi ta avtotransportnoi tekhniky [A scale-level approach to the analysis of processes in tribal materials of details of mobile agricultural and motor vehicles] *Zahalnoderzhavnyi mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk. Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn – National interagency scientific and technical collection. Design, production and operation of agricultural machines, Issue 47, Part II,* 52-59 [in Ukrainian].
18. Timoshenko, S.P., Gud'er Dzh. (1979). *Teoriya uprugosti [Theory of elasticity]*. Moscow: Science. The main edition of the physical and mathematical literature [in Russian].
19. Birger, I.A. et al. (1993). *Raschet na prochnost' detaley mashin: Spravochnik* [*The calculation of the strength of machine parts: Reference*]. M.: Mashinostroenie [in Russian].
20. Aulin, V.V. (2014). 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]. Doctor's thesis. Kirovograde [in Ukrainian].
21. Dzhus, R.M., Pryimakov, O.H., Pryimakov, H.O. (2007). Modeliuvannia protsesiv vidnovlennia tribospoluchen viiskovoi tekhniky zastosuvanniam revitalizantiv [Modeling of the process of restoration of military equipment tribulations by the use of revitalizers]. *Systemy obrobky informatsii – Information processing systems, Issue 2,* 16-19 [in Ukrainian].

Viktor Aulin, Prof., DSc., **Serhiy Lysenko,** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andriy Grinkiv,** PhD tech. sci., Senior Researcher, **Volodymyr Yatsun,** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ivan Skrynnik,** Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
Andriy Gupka, PhD tech. sci.
Ternopol National Technical University named after Ivan Puluy, Ternopol, Ukraine

Stress-strain State of the Surface Layer of Parts During the Implementation of Tribotechnical Running-in and Recovery Technologies

When solving the problem of increasing the wear resistance and reliability of machine systems and assemblies, an important factor is to take into account the stress-strain state of the working surface layer of parts. This state changes if the part is purposefully strengthened during coating or when the operating modes of the tribological conjugations of the parts are changed. In this work, the tribotechnologies of running-in and recovery are taken as modifying actions and the concept of a dynamic approach to changing stress and strain fields is developed. An attempt is made to simulate a stress-strain layer of a part during operation.

From a theoretical point of view, the influence of tribological technologies of running-in and recovery on the formation of the stress-strain state of the surface layers of the conjugate parts of systems and assemblies of vehicles is considered. It was determined that the vast majority of their tribological conjugations work under conditions of plastic saturated or unsaturated contacts. The modified surface layer formed by the implementation of tribological technologies of running-in and recovery of mating parts was considered as structural-orthotropic shells.

Given the system of acting forces and moments of forces, it is shown that they satisfy the equilibrium equations characteristic of thin homogeneous shells. The stress and strain components of the surface layer obtained in accordance with the generalized Hooke law, taking into account the Kirchhoff-Lave hypothesis. These expressions can be used to assess the stress-strain state of the mating surfaces of parts when they are modified or exposed during the implementation of tribological technologies of running-in and recovery to increase their resource. It should be noted that in the formulas the average values of the value characterizing the stress-strain state of the material of the part are used.

stress-strain state, tribotechnical running-in, tribotechnical recovery, modeling, surface layer, stress

Одержано (Received) 27.02.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 14.03.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

УДК 621.792.4 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).114-122

Maxym Ageev, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Kherson State Maritime Academy, Ship Power Plant Operation, c. Kherson, Ukraine
e-mail: maxageev73-73@ukr.net
Sergiy Dovzhuk, head of academic laboratory
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
e-mail:beryuza@ukr.net
Volodymyr Nikolaychuk, assistent, **Tetiana Khrypko,** assistent
Vinnytsia national agrarian unsversits, c. *Vinnytsia, Ukraine*
e-mail: niko-v@ukr.net

The Influence of Design Parameters for Electric arc Equipment on the Factors of Spray Process and Properties of Coatings

The paper considers possibilities to increase the wear resistance, corrosion resistance, and service life for parts machines and mechanisms via their hardening and renovating using electric arc coatings characterized by high density, adhesion strength, and micro hardness thanks to activation of the spraying process. Also, the possibility of controlling the properties of restored surfaces owing to choice of the related equipment with required structure and characteristics in order to prolong the service life of machinery parts is shown. The right choice of equipment for spraying makes it possible to increase the speed and temperature of the spraying gas and particles, reduce the droplet diameter, increase the density and reduce the oxidation of coatings. The influence of spray factors such as the flow rate and pressure of working gases, composition of combustion mixture, spraying distance, dispersion of the spray, properties of wire material, etc. on the properties of the coatings obtained has been investigated.
electric arc spraying, spraying process, wear resistance, corrosion resistance, adhesion strength, protective coating, electric arc coating

М.С. Агеев, доц., канд. тех. наук
Херсонская морская академия, г. Херсон, Украина
С.А. Довжук, зав. лаб.
Центральноукраинский Национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина
В.Я. Николайчук, ассист., **Т.Е. Хрипко,** асист.
Винницкий национальный аграрный университет, г. Винница, Украина

Влияние конструктивных параметров оборудования для электродугового напыления на факторы процесса напыления и свойства покрытий

В работе предложено повышать износостойкость, коррозионную стойкость и срок службы деталей машин и механизмов при их упрочнении и реновации ЭДН-покрытиями с высокой плотностью, прочностью сцепления и микротвердостью за счет активации процесса напыления. В работе рассмотрена возможность за счет выбора конструктивных параметров и характеристик оборудования для ЭДН управлять свойствами восстановленных поверхностей с целью повышения ресурса деталей машин. Правильный выбор конструкции оборудования для напыления позволит увеличить скорость и температуру струи транспортирующего газа и частиц, уменьшить диаметр капель, повысить плотность и снизить окисляемость покрытий. В работе исследование влияния факторов процесса напыления: расхода и давления рабочих газов, состава горючей смеси, дистанции напыления, дисперсности распыления, свойств материала проволоки и др. на свойства ЭДН-покрытий.
электродуговое напыление, активирование процесса напыления, износостойкость, коррозионная стойкость, прочность сцепления, плотность, электродуговые покрытия

© Maxym Ageev, Sergiy Dovzhuk, Volodymyr Nikolaychuk, Tetiana Khrypko, 2019

Statement of the problem. The use of coatings makes it possible to increase the wear and corrosion resistance of working surfaces of machine parts and mechanisms, in particular ship parts, and so to reduce the costs of alloyed steels and alloys [1].

The coatings application is associated with implementation of a fundamentally new approach, according to which the strength and carrying capacity of a part is provided by its basic material, whereas the resistance to corrosion, wear, and other factors may be increased *via* using hardening protective coatings. There are many alternative methods for producing coatings, from which it is advisable to choose an optimal, easy to implement, and inexpensive one [2].

Of the variety of methods for hardening coating deposition, the most common technologies used to restore and improve the performance properties of parts are gas-thermal spraying techniques [1, 2], among which the cheapest and simplest method is electric arc spraying (EAS), whose current improvement is aimed at modifying and activating the spraying process [1, 2].

A significant increase in the properties of EAS coatings is possible through combining arc spraying with ultrasonic [3], electric-spark [3], laser [4, 5-7], electron-beam, and other processing techniques [9].

High wear resistance, hardness, and other surface properties of EAS coatings from iron based alloys can be provided by methods of chemical heat treatment [1, 2]. The use of a combination of techniques for EAS and subsequent chemical heat treatment opens up great opportunities in creating composite coatings with special properties. Methods for improving the quality of electric arc coatings *via* subsequent heat treatment or modification are easily implemented in practice, in particular when part dimensions permit it. Such combined technologies do not require additional expensive equipment and operations, which predetermines a reduction in the cost of hardening processes.

Analysis of recent researches and publications. From the standpoint of these conditions, the use of electric arc spraying (EAS) is promising [3]. In the world practice of hardening, recovery, and anticorrosion protection, EAS has become widespread as the most technologically advanced and productive method (productivity is 3-4 times that for flame spraying) [3]. EAS is widely used in the European countries and displaces the traditional gas-flame method [3]. This is due to the simplicity of the equipment, the availability of energy source for metal melting, higher thermal efficiency, which reaches 57% compared to 13 and 17% for gas and flame spraying [3]. The quality of EAS coatings are practically the same as that of coatings produced by plasma and detonation methods, and the coating-to-base adhesion strength is greater than in the case of flame spraying. In [3], information is given about the advantages of EAS over surfacing in terms of labor input and consumption of electrode material: duration of surfacing is 1 h 10 min and wire consumption 1.3 kg, while for EAS these parameters are 24 min and 0.95 kg, respectively.

The successful use of EAS is provided by its advantages such as obtaining coatings with a thickness of 0.1 to 10 mm; the absence of significant thermal effects on the part; the possibility of applying coatings on parts made of various materials; obtaining coatings with desired properties, *et al*. EAS is characterized by technological flexibility concerning application to various standard sizes of parts, low recovery cost (by 1.4-1.8 times lower than for surfacing). The equipment on which coating is performed is relatively simple and light and can be moved fairly quickly. The part dimensions do not limit the use of EAS [3]. This method is effective and economical in the manufacture and renovation of parts in the conditions of repair enterprises and small workshops with a single production [3].

The EAS process consists in heating (to melting) converging wires (electrodes) by an electric arc and spraying the molten metal with compressed air [3]. Two wires move forward in two channels in the spray head, and between their tips an electric arc is excited.

A jet of compressed gas (air), which sprays the molten metal wires and transports the melt in the form of particle flux to the surface being restored (or hardened), flows out of the central channel of the EAS apparatus head. For spray, a wire with a diameter of 0.8; 1.0; 1.6, and 2.0 mm is traditionally used. The use of thermoreacting cored wires is promising [3]. It should be noted that in the course of EAS, the sprayed metal in the form of droplets falls on a substrate and cool to the substrate temperature for a short time, providing the formation of quenched structures in the coating; herein the hardness of the sprayed layer exceeds that of the starting material [3].

The EAS technology includes three main procedures: jet-abrasive processing, deposition of a sublayer from refractory Ni-Cr alloy, and deposition of a main layer of carbon alloyed steel [9, 10]. The coating obtained is machined with some allowance. The main types of processing sprayed coatings are cutting and grinding. For processing coatings from corrosion-resistant and carbon steels, high-speed and hard-alloy tools may be used. Pretreatment of the base surface is an important factor for providing strong adhesion of the sprayed coating to the part [9, 10]. The increase in the adhesion strength is associated with an increase in the part area and preparation of a developed surface roughness on before spraying.

The main EAS process parameters are: the composition, diameter, and feed speed of wires to be sprayed; arc power; flow rate of spraying gas; spraying distance; velocity of the spray spot. Traditionally, the distance from the spraying apparatus is 100–200 mm [9, 10].

In addition to the positive qualities of EAS (manufacturability, simplicity, high efficiency, absence of thermal conductors, low cost, versatility, *etc.*), there are also disadvantages such as increased metal oxidation; the presence of porosity; insufficient adhesion of the coating to the base; cooling of the molten metal particles with spraying compressed air, *etc*. As a result of the latter, cracks and peels may appear due to the presence of residual internal stresses [9, 10]. Small feed speeds of the wire lead to its oxidation, and a large amount of heat generated during arc burning leads to a significant burning out of the alloying elements included in the material being sprayed (for example, the carbon content in the coating material decreases by 40-60%, and silicon and manganese by 10-15%).

The microstructural analysis made it possible to establish that coatings obtained with the use of wires containing a high percent (from 0.8 to 2.3) of silicon and manganese have the most porous structure due to iron insoluble slags, and, accordingly, the lowest strength properties as compared to coatings from wires with a lower content of deoxidizers. A conclusion follows that for efficient EAS, it is advisable to use wires with as low content of manganese and silicon as possible, which allows deliverance of the coating obtained from delamination and chipping.

Low hardness of coatings, causing carbon burnout during spraying, was always considered to be a limiting factor for the use of EAS. The maximal achievable hardness of coatings from different steels is within 35-50 HRC_E, which markedly reduces their wear resistance. The above mentioned disadvantages of the EAS procedure limit the efficiency and narrow the area of its application to increase the service life of parts. Despite the large number of innovations concerning EAS, researches on the improvement of this method and required equipment are actively being carried out and has become aimed at activating the spray process using various techniques, methods, and devices [3, 10].

Preheating of the substrate was established to lead to decreasing the rates of crystallization, cooling of falling particles, and developing their chemical interaction with the substrate. As a consequence, adhesion strength increases. However, in the case of heating

above 500 K, the rate of oxide formation increases and adhesion strength decreases. Moreover, preheating to 500 K is impossible when thin-walled parts are coated because of unavoidable thermal deformation, and this operation is undesirable in restoring parts that operate under alternating or cyclic loads (as fatigue cracks grow under heating).

The use of activation techniques which intensify heat exchange processes in the "jet-particle" system and increase the dynamic parameters of particles, and allows reducing the wire particle size or of those that allow modifying (strengthening) the sprayed layer seems to be most expedient means.

On the basis of studying the problem of hardening and restoring parts of the using EAS coatings, the aim of the work was set up to increase the wear resistance, corrosion resistance, and service life of parts *via* combining EAS coatings characterized by high density, adhesion strength, and microhardness due to the activation of the spray process

Statement of the objective. The aim of the work was shows the possibility, through the selection of design parameters and characteristics of equipment for EAS, to control the properties of coated surfaces in order to increase the service life of restored parts. The right choice of equipment for EAS allows one to increase the speed and temperature of the jet of spraying gas and particles, decrease the size of droplets, increase the density and reduce the oxidation of coatings. to develop a new combined method of surface engineering for the formation of hardening protective coatings on the basis of combination of EAS.

The main material. For coating deposition, an apparatus for activated arc spraying ADN-10 was used. Coating materials were 0.8-2.8 mm diameter wire from steel of the martensitic (40Kh13, 95Kh18), ferritic (Sv-08G2S), and austenitic (Kh18N10T, 12Kh18N10T) grades. A feature of martensitic and austenitic steels of is the ability to phase transformations and structural changes during deposition and treatment of coatings. This allows improvement of physic mechanical and performance properties of hardened surfaces and an increase in their wear and corrosion resistances. The PIN process lasted 2 h in the temperature range 600 - 800 K.

Microstructure was examined on etched and unetched thin sections using a light microscope «MeF-3» (Firm "Reichert", Austria) with magnifications ×100, ×200, and ×500. The microhardness was measured on a Micromet II microhardness meter with a load of 100 g from the coating surface edge to the base through the transition zone. A quantitative stereological analysis of coating porosity was carried out on a certified automatic image analyzer "Mini-Magiscan" (Firm "Joyce Loebl", England) using the program "Genias 26". The main stages of the image analysis were: image calibration, image fixation, segmentation, and porosity. The study was performed on a CamScan scanning electron microscope (Oxford Instruments, England) with an X-ray energy dispersive analyzer. The morphology (topography) of the coating surface was examined in the regime of reflected electrons at an accelerating voltage of 10–20 kV.

The quality of EAS coatings used for renovation and hardening of the working surfaces of parts markedly depend on the technical characteristics of the equipment used.

Currently, there is in operation a wide range of power sources and devices for spraying produced by various companies [1-7]. However, a comparative analysis of the influence of the main technical characteristics of spray units and power sources on the physicomechanical properties of the coatings obtained has not been carried out; and no science-based recommendations on the use of EAS equipment have been made. The above reasons make it difficult to choose the right equipment for EAS that could provide high performance and quality of the recovered parts. This paper presents the characteristics of the most used units and analysis of them in order to ensure their correct choice.

The characteristics of the power source and the design of an apparatus for an electric arc determine such EAS factors as the welding current; the type, pressure, and flow rate of the spraying gas; the diameter and shape of the nozzle, and the scheme of a blowing system.

To create EAS coatings, units with various blowing systems and nozzle geometry are used [8, 9]. Currently, there are several schemes for the formation of the metal-air flow for EAS, namely diaphragm, central-nozzle, differential, and closed ones. In particular, the most widespread diaphragm scheme is used in the manufacture of EAS units at the Barnaul plant (Russia) and firms "Metco" and "Mogul" (the United States). For this scheme, formation of a fairly wide metal-air flow is characteristic. The use of it is effective for obtaining anti-corrosion coatings. The central nozzle scheme is used in the electric arc apparatus EM-17 (Barnaul), where a narrow metal-air flow is created, which is particularly efficient for coating of bodies of revolution, for example shafts, including crankshafts [8, 9].

At the Physical-Mechanical Institute (PMI) of NAS of Ukraine (Lviv), through improving the design of EAS equipment and increasing the protective-energy level of the spray arc flame, the problem of increasing the physicomechanical properties of coatings was solved by weakening the dispersed metal oxidation in the spray flame and increasing the velocity of particles [8,9]. In order to improve the quality of coatings, an electric arc apparatus with a spray head was used [8,9], which was based on a closed scheme for the formation of metal-air flow (Fig. 1). Such a scheme is used in the units manufactured by the GMP "Gasothermic" at PMI of NAS of Ukraine.

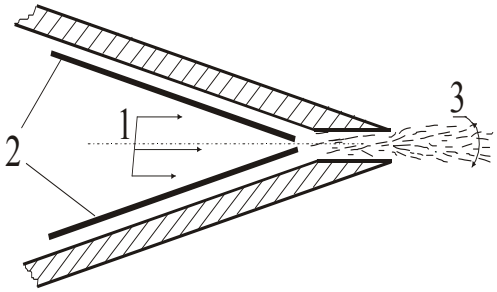


Figure 1 - A closed scheme for formation of metal-air flow during EAS: (1) air flow; (2) cored wire; (3) annular divergence of the metal-air flow (10-15°)

Source: compiled by the author using data from [12]

The advantages of EM-14 units with a closed scheme and a differential nozzle over an open scheme and a central nozzle are considered in [8-11]. The closed scheme of metal-air flow formation allows the manufacture of extremely fine fractions of sprayed particles (below 50 μm) thanks to their high flight velocity (50-130 m/s) from the burning arc zone to the surface being restored (Fig. 2). Such a spray scheme (Fig. 2) should be used when the need arises in fine-particle (50 - 200 μm) coatings *via* spraying wires that include refractory components.

If the metal-air flow scheme is closed, the arc burns in a channel bounded with the spray head of the EAS apparatus. This scheme realizes its advantages when the arc cross section size becomes commensurate with the cross section of the cylindrical channel where it burns. The closed metal-air flow scheme allows two deposition modes: continuous and pulsed. Upon reducing the diameter of the nozzle cylindrical part, the pressure in the nozzle may become equal to that in the arc gap. With this, cold air may actively penetrate into the arc burning zone and so help decrease its length. When the arc length decreases so much that the melt can close the arc gap, a pulsed mode is realized. The pressure in the arc markedly depends on the nozzle diameter and arc power.

It was established experimentally that the larger the nozzle diameter, the greater the arc power should be in order to realize the pulsed mode of the electric arc apparatus operation. When the pulverization apparatus is in the pulsed mode, the wire tips become parallel. The liquid phase closes the tips, and the reycotron effect is realized, which is manifested in the fact that an electrodynamic force acts parallel to the surfaces of wires, which melt in the gaps between the two parallel wires-electrodes. The melt is ejected from the gap by electrodynamic forces, and after a pause the cycle repeats. The frequency of emissions depends on the wire feed speed. Portions of the liquid metal receive an additional impulse owing to the reycotron effect, which increases the velocity of particles and contributes to the melt dispersion.

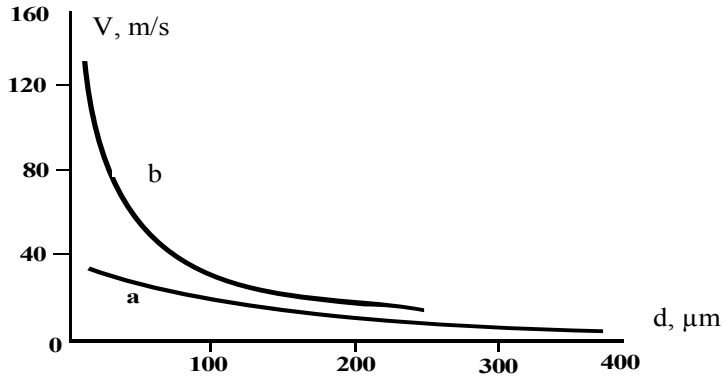


Figure 2 - Dependence of the velocity of metal particles on their size for different modes of metal-air flow formation: (a) central nozzle scheme; (b) closed scheme

Source: compiled by the author

The use of the closed scheme for the formation of metal-air flow during EAS [8-11] allows production of coatings with a density of over 90% and adhesion strength to 180 MPa. The maximum size of sprayed particles does not exceed 50 μm. Thus, the EM-14 spraying system (Fig. 3), which provides arc burning in a channel bounded with the nozzle walls or in the formed flow of pressing air, makes it possible to produce droplets with a high flight velocity, which improves the properties of the surfaces being restored.

In the apparatus EDM-6GD designed by the Mariupil State University and the company TOPAZ, spraying is performed with gas-dynamic dispersion of metal and using an external chamberless combustion scheme. Here the energy source (electric arc and compressed air) is replaced by an electric arc and a fast jet of the products of liquid hydrocarbon fuel combustion [8-11]. This design allows reduction in the oxidation potential of the medium compared to air by twice and improvement in the properties of surfaces restored. The adhesion strength of coatings increases by 56% and hardness by 18%, while the porosity of coatings decreases by 2.6 times. At the same time, the cost of the EAS process decreases thanks to the replacement of cored wires with 2-3 times cheaper standard solid-drawn ones.

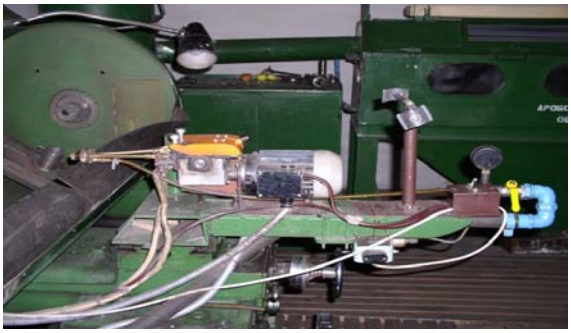


Figure 3 - Apparatus EM-14 for EAS
Source: compiled by the author using data from [12]

The units for EAS produced by NPOOO "MAD" (Minsk) combine the advantages of electric arc and fast spraying [8-11] (Fig. 4). The main distinguishing feature of the EAS unit is the presence of an efficient small-sized chamber for propane/air mixture combustion. A fast jet of the combustion products leaves it with a speed of 1500 m/s at the outlet. The unit operates on the basis of melting wires by an electric arc and spraying molten wire droplets with the fast jet of combustion products. It requires supply of compressed air with pressure from 0.6 to 0.8 MPa and propane with pressure from 0.3 to 0.45 MPa as well as a source of welding current with a “hard” voltage-current characteristic (of the “VDU-506” type). By varying the consumption of propane and air, it is possible to create a neutral or reducing atmosphere in the melting zone of the electrode wire and thereby to weaken metal oxidation and burnout of alloying elements [8-11]. Moreover, the design features of such units make it possible to increase the velocity of sprayed material particles and the coefficient of material utilization to 0.85; herein the jet angle does not exceed 10°.

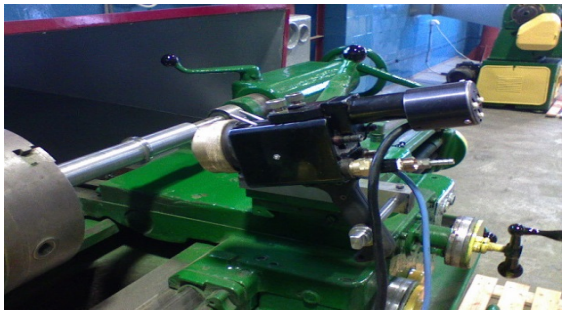


Figure 4 - Unit for EAS with a propane-air combustion chamber
Source: compiled by the author using data from [3]

The EAS-10 unit has an electric drive which provides the required speed of wire electrode feed. It is powered from a three-phase network of 220 V, frequency 50 Hz. In the case of using an alternating current, the electric arc burning proceeds with periodic interruptions that occur as a result of the voltage drop. The power supply for the electric arc apparatus with a direct current forms the necessary conditions for obtaining coatings with a uniform thickness. Analysis of the research results made it possible to recommend the EM-14 apparatus (Fig. 3) and the EAS-10 unit (Fig. 4) for deposition of EAS coatings. The proper management of the design parameters of equipment for EAS provides the creation of coatings with high performance characteristics, which is very important for increasing the service life of parts.

Thus, the work shows the possibility, through the selection of design parameters and characteristics of equipment for EAS, to control the properties of coated surfaces in order to increase the service life of restored parts. The right choice of equipment for EAS allows one to increase the speed and temperature of the jet of spraying gas and particles, decrease the size of droplets, increase the density and reduce the oxidation of coatings. Additionally, it has made it possible to use standard solid-drawn wires from martensitic steels 40Kh13 and 95Kh18 and austenitic steels Kh18N10T and 12Kh18N10T instead of more expensive cored wire FMI.

A distinct feature of the martensitic and austenitic steels is the ability for phase transformations and structural changes during deposition and processing of coatings, which results in improving the physicomechanical and operational properties of hardened surfaces. The process of restoration of SMM surfaces *via* EAS coating is divided into three main stages: surface preparation, coating, and subsequent treatment of the surface coated.

Conclusions. The present work recommends to increase the wear resistance, corrosion resistance, and service life of parts *via* hardening and renovating them using EAS coatings characterized by high density, adhesion strength, and microhardness due to activation of the spraying process. It has been shown that by properly choosing design parameters and characteristics of equipment for EAS, it is possible to control the properties of restored surfaces in order to increase the service life of parts. The right choice of equipment for spraying will allow one to increase the speed and temperature of the jet of spraying gas and molten particles, decrease the droplet diameter, increase the density, and reduce the oxidation of coatings.

The research has revealed the influence of the spraying process factors such as the flow rate and pressure of working gases, composition of combustible mixture, spraying distance, dispersion of spray, properties of the wire material, *etc.* on the properties of EAS coatings. Furthermore, the effects of the spraying distance, the size of sprayed particles, and the properties of the wire material on the porosity and coating-to-substrate adhesion was evaluated. Moreover, the phase composition and microhardness of coatings obtained by spraying wires from austenitic and martensitic steel were investigated. The presence of an abnormally large amount of residual austenite (to 50 vol%) in coatings from martensitic steel was established.

Studies of the resistance to fatigue failure showed that coatings deposited by EAS of wires provide a slight decrease in the fatigue strength limit to 10–13% (for comparison, coatings obtained by vibro-arc surfacing reduce the fatigue limit by 35–40%).

References

1. Ageev M.S., Volkov Ju.V., Chigraj S.L. Zashhitnye i uprochnjajushhie pokrytija v sudostroenii i sudoremonte. *Nauk. Visnik HDMA* . Herson: HDMA. 2015. № 2 (13). P.110-124.
2. Ageev M.S., Volkov Ju.V., Chigraj S.L. Cvarka i rodstvennye processy v sudostroenii . *Sbornik nauchnyh trudov « Vodnyj transpor»*. Kiev, KGAVT. 2015. Vol. №2(24). S. 15-26.
3. Boronenkov V. N., Korobov Ju. S. Osnovy dugovoj metallizacii. Fiziko-himicheskie zakonomernosti. UrGU; Ekaterinburg: Univ. izd-vo. 2012. 267 p.
4. M.S. Ageev, B.A. Ljashenko, Primenenie gibridnyh tehnologij dlja renovacii i povyshenija resursa sudovyh mashin i mehanizmov. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. Nauchno-teoreticheskij zhurnal Mashinostroenie.* 2015. 4(94). P. 18-22.
5. Ageev M.S. Kozhevnikova E.E., Lopata V.N. Vosstanovlenie valov sudovyh nasosov kombinirovannym sposobom nanesenija zashhitnyh pokrytij. *Naukovij visnik HDMA* . Herson. 2015, № 2 (13). P. 4-16.
6. Kozhevnikova E.E., Ageev M.S., Chigraj S.L. Povyshenie resursa sudovyh nasosov na osnove kombinirovannoj tehnologii vosstanovlenija. *Sbornik nauchnyh trudov « Vodnyj transpor»*. Kiev, KGAVT. 2015. Vol. №2(24). P. 57-70.
7. Vilage B., Ruppreht K., Pohmurskaja A. Osobennosti gazotermicheskogo napylenija pokrytij poroshkovymi provolokami. *Avtomaticheskaja svarka.* 2011. № 10. P. 26-30.

8. Belocerkovskij M.A., Konstantinov V.M., Tkachenko G.A. Uprochnenie himiko-termicheskoj obrabotkoj pokrytij, poluchennyh vysokoskorostnym raspyleniem stal'nyh provolok. *Inzhenerija poverhnosti, Novye poroshkovye kompozicionnye materialy.* Svarka: sb. dokl. Mezhd. Simpoziuma, Minsk, 25-27 marta 2009 g./ Institut poroshkovoj metallurgii GNPO PM NAN Belarusi; redkol.: P.A. Vitjaz' [i dr]. Minsk, 2009. S. 178–184.
10. B.A. Ljashenko, M.A. Belocerkovskij V.N. Lopata, Ju.V. Brusilo, Korbut E.V. Gazotermicheskoe napylenie i ionnoe azotirovanie – perspektivnoe sochetanie. *Inzhen. poverhn. i renovacija izdelij:* Mater. 14–j mezhdun. nauchn.–tehn. konf., 2-6 ijunja 2014, Svaljava – Kiev: ATM Ukrainy, S.79-80.
11. A.S. Prjadko, A.V. Dudan, Ju.V. Brusilo, T.V. Vorona, Ju.V. Volkov Vybor oborudovanija dlja uprochnenija i vosstanovlenija detalej avtomobil'nogo transporta jelektrodugovym napyleniem. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta*. Promyshlennost'. Prikladnye nauki. Polock. 2014. № 3, S. 121-126.
12. Ju.V. Brusilo Vybor oborudovanija dlja uprochnenija i vosstanovlenija detalej porshnevyh dvigatelej jelektrodugovym napyleniem. *Nauchno-tehnicheskij zhurnal «Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija».* Har'kov. 2010. №4 (71). S. 38-42.
13. Elektrodugovi vidnovni ta zahysni pokryttja / V.I. Pohmurs'kyj, M.M. Student, V.M. Dovgunyk, G.V. Pohmurs'ka, I. J. Sydorak. L'viv: Fiz.-meh. in-t im. G.V. Karpenka NAN Ukrai'ny, 2005. 190 s.

М.С. Агєєв, доц., канд. техн. наук
Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна
С.А. Довжук, зав. лаб.
Центральноукраїнський національний технічний університет, м Кропивницький, Україна
В.Я. Ніколайчук, асист.**, Т.Є. Хрипко,** асист.
Вінницький національний аграрний університет, м Вінниця, Україна

Вплив конструктивних параметрів обладнання для електродугового напилення на фактори процесу напилення та властивості покриттів

Мета досліджень в пропонує мій статті полягає в визначенні впливу конструктивних параметрів апаратів для електродугового напилення на процес нанесення покриття та його властивості.

В роботі запропоновано підвищувати зносостійкість, міцність зчеплення, щільність, корозійну стійкість, мікротвердість і термін служби деталей машин і механізмів при їх зміцненні та реновації електродуговими покриття за рахунок активації процесу напилення. Активування процесу електродугового напилення здійснювали шляхом розробки спеціальної камери згорання в електродуговому апараті.

При проведенні досліджень розглянута можливість за рахунок вибору конструктивних параметрів і характеристик обладнання для ЕДН управляти властивостями відновлених поверхонь з метою підвищення ресурсу деталей машин. Правильний вибір конструкції обладнання для напилення дозволив збільшити швидкість і температуру струменя транспортуємих газу і частинок, зменшити діаметр крапель, підвищити щільність і знизити окислюваність покриттів. В роботі виконані дослідження впливу чинників процесу напилення: витрати і тиску робочих газів, складу горючої суміші, дистанції напилювання, дисперсності розпилення, властивостей матеріалу дроту і ін. на властивості електродугових покриттів.

Виконані дослідження показали, що за рахунок вибору конструктивних параметрів та характеристик обладнання для електродугового напилення можливо керувати процесом ЕДН і отримати необхідні властивості покриттів та поверхонь, що відновлюються з метою підвищення ресурсу деталей машин.

електродугове напилення, активування процесу напилення, зносостійкість, корозійна стійкість, міцність зчеплення, щільність, електродугові покриття

Одержано (Received) 09.05.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 24.05.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

ПРОЦЕСИ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ, ВЕРСТАТИ ТА ІНСТРУМЕНТИ

УДК 621.952.5 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).123-130

В.В. Свяцький, доц., канд. техн. наук, **О.В. Скрипник,** доц., канд. техн. наук,
О.Ф. Сіса, канд. техн. наук, **С.В. Конончук,** канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: svv_iamph@ukr.net

Комбіновані методи обробки глибоких отворів

Наведено схеми розвантаження свердла, що основані на використанні комбінованої обробки „різання — пластична деформація” і підведенням мастильно-охолодного технічного засобу з надлишковим тиском. Способи вирішують задачі зниження складових технологічного навантаження і дозволяють розширити технологічні можливості процесу свердління по глибині обробки.
глибоке свердлення, інструмент, стійкість, жорсткість, розвантаження, деформування, ефективність

В.В. Свяцький, доц., канд. техн. наук, **О.В. Скрипник,** доц., канд. техн. наук, **О.Ф. Сіса,** канд. техн. наук, **С.В. Конончук,** канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Комбинированные методы обработки глубоких отверстий

Приведены схемы разгрузки сверла, основанные на использовании комбинированной обработки „резани – пластическая деформация” и подводом смазывающе-охлаждающего технического средства с избыточным давлением. Способы решают задачу снижения составляющих технологической нагрузки и позволяют расширить технологические возможности процесса сверления по глубине обработки.
глубокое сверление, инструмент, устойчивость, жесткость, разгрузка, деформирование, эффективность

Постановка проблеми. Свердлення глибоких отворів є трудомісткою технологічною операцією, особливо при обробці в’язких матеріалів. В системі верстат – пристрій – інструмент – деталь (ВПІД) при глибокому свердлінні в найбільш важких умовах працює інструмент – свердло [1, 2]. Замкнений об’єм обробки, різноманітні функції, виконання яких повинна забезпечувати конструкція інструменту, форсовані режими різання змушують працювати корпус свердла, його ріжучі і напрямні елементи з високими напруженнями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як правило, процес свердлення глибоких отворів виконують на спеціальних або агрегатних верстатах за допомогою пристрою, що містить свердло, встановлене на трубчастому стеблі з каналами для відведення стружки і мастилоприймачем системи подачі мастильно-охолодного технічного засобу (МОТЗ) під тиском. В процесі обробки стебло свердла знаходиться під впливом осьової складової сил різання, що приводить до його подовжнього вигину і, отже, зниженню точності обробки і стійкості інструменту.

Оптимізація процесу глибокого свердлення при цьому зводиться, як правило, до зняття певних технічних обмежень по стійкості, міцності або жорсткості свердла [3]. Проте можливості підвищення жорсткості інструменту за рахунок зміни форми перерізу стеблини свердла на даний час досить повно вивчені і практично вичерпані.

Відомо, що в основі оптимізації процесу глибокого свердлення лежить функція стійкості інструменту від параметрів процесу різання. Математичний опис цього

© В.В. Свяцький, О.В. Скрипник, О.Ф. Сіса, С.В. Конончук, 2019

процесу визначається великим числом взаємозв'язаних чинників, які не подаються на сьогоднішній день узагальненню. Основним елементом системи ВПІД, що обмежує вихідні параметри верстата при глибокому свердленні, є інструмент. Оптимізація процесу глибокого свердлення при цьому зводиться, як правило, до зняття певних технічних обмежень по стійкості, міцності або жорсткості свердла.

Для підвищення продуктивності процесу свердлення необхідно вести обробку з максимально допустимою величиною подачі. У той же час максимальна допустима подача свердлення обмежується міцністю і подовжньою стійкістю інструменту.

Із збільшенням глибини свердлення швидкість подачі обмежується подовжньою стійкістю стебла інструменту, оскільки осьова складова сил різання не повинна перевищувати критичну силу по Ейлеру, що визначається по формулі [3]:

$$P_{\text{кр}} = \frac{E \cdot \pi^3 \cdot I}{(\mu \cdot l)^2} = \eta \frac{E \cdot I}{l^2}, \qquad (1)$$

де $P_{\text{кр}}$ – критична сила;

E – модуль пружності;

l – довжина стебла свердла;

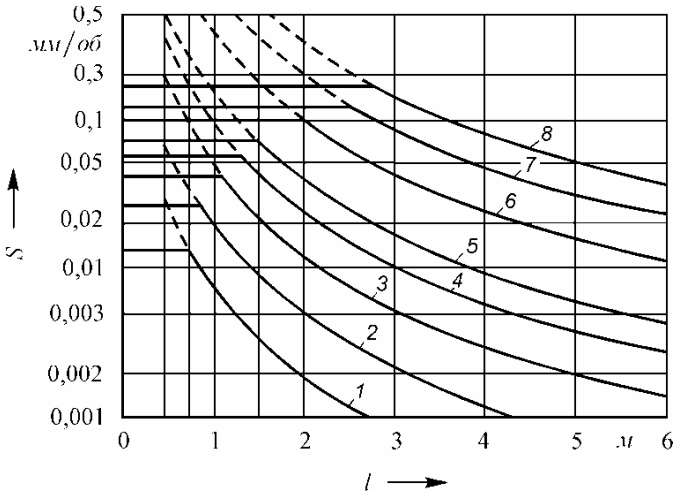
I – момент інерції поперечного перетину інструменту;

μ – коефіцієнт приведеної довжини;

η – коефіцієнт стійкості.

Для збереження подовжньої стійкості стебла інструмента у міру збільшення глибини обробки необхідно зменшувати осьову складову сили різання шляхом зниження швидкості подачі. Проте, зменшення швидкості подачі приводить до збільшення питомої сили різання, що, у свою чергу, якісно впливає на процес різання. Обробка глибоких отворів на малих подачах є малопродуктивною, а на граничних подачах – веде до зниження якості обробки отворів.

На рис. 1 наведені графіки допустимої швидкості подачі при обробці сталі 45 за умови міцності стебла свердла по крутильному моменту і умови збереження інструментом подовжньої стійкості відповідно до залежності (1).



Діаметр свердла: *1* –5 мм; *2* – 7,5 мм; *3* – 10 мм; *4* – 12,5 мм; *5* – 15 мм; *6* – 20 мм; *7* – 25 мм; *8* – 30 мм

Рисунок 1 – Допустимі подачі при обробці сталі 45 за умови міцності стебла свердла по крутильного моменту і умови збереження інструментом подовжньої стійкості

Джерело: розроблено автором

Аналіз приведених на рис. 1 графічних залежностей свідчить, що робоча область в системі координат „подача — глибина свердлення” визначається двома показниками: мінімальною для даного діаметру свердла величиною подачі, що визначається стійким характером стружкоутворення і мінімальною продуктивністю; і максимально допустимою величиною подачі відповідно з міцністю поперечного перерізу інструменту і подовжньої стійкості стебла свердла.

Наявність перерахованих обмежень по міцності, стійкості інструменту і мінімальному значенню допустимої подачі свердлення визначає область можливого вибору допустимих параметрів елементів технологічної системи.

Теорія і практика глибокого свердлення дає деякі рекомендації економічної доцільності тих або інших способів глибокого свердлення [1, 3]. Зрозуміло, що ці рекомендації певною мірою є умовними, а їх межі розпливчаті і у кожному конкретному випадку обробки глибоких отворів можуть бути переглянутими.

Постановка завдання. Аналіз досліджень в обробці глибоких отворів, дослідження механізмів приводів верстатів для обробки отворів комбінованими методами.

Виклад основного матеріалу. Можливості підвищення жорсткості інструменту за рахунок зміни форми перерізу стеблини свердла на даний час досить повно вивчені і практично вичерпані. Тому автори [4], вказуючи на складність істотного підвищення жорсткості свердла за рахунок оптимізації його поперечного перерізу, звертають основну увагу на раціональну експлуатацію свердлів. По результатам експериментальних досліджень [5] визначено, що величина стійкості інструмента зі збільшенням глибини свердління нелінійно залежить від довжини вильоту. Це дозволяє записати залежність для визначення періоду стійкості свердла T, що використана в роботі [4], у вигляді:

$$\frac{T^m}{T_0^m} = \left(\frac{l_0}{l}\right)^n \tag{2}$$

де l – робоча довжина вильоту;

l_0 – вихідна розрахункова довжина вильоту;

n, m – показники, які враховують вплив вильоту на стійкість інструменту.

Залежно від способу виготовлення свердла, а також матеріалу, який оброблюють, показники степенів n і m за результатами досліджень [4, 5] приймають в межах від 0,1 до 0,5. Так, наприклад, для свердлів, які досліджувались у роботі [4] при обробці сплаву ВТ20, показник степеня n приблизно дорівнює 0.4, для фрезерованих свердлів відповідно з результатами, що наведені у роботі [5], показник степеня n становить приблизно 0,15.

Порівнюючи процеси глибокого свердлення отворів свердлами з постійним і змінним вильотом, необхідно відзначити, що величина вильоту буде однакова тільки на граничній глибині обробки. Протягом усього процесу обробки при роботі зі змінним вильотом інструмента ця величина завжди буде меншою. Таким чином, за всіма рівними умовами відношення стійкості інструмента при обробці зі змінним і постійним вильотом може бути визначене по формулі:

$$\frac{T}{T_0} = \frac{k - k^{\frac{n}{m}}}{k-1} \cdot \frac{1}{1 - \frac{n}{m}}, \tag{3}$$

де k – відношення вильоту наприкінці обробки до вихідного вильоту.

Відповідно до залежностей (2) і (3) побудовані графіки стійкості інструмента при свердлінні зі змінним вильотом від відношення вильотів наприкінці і початку обробки (рис. 2). Показник степені m, що враховує вплив вильоту на стійкість, при цьому прийнятий рівним 0,25. Наведені графічні залежності показують, що зі збільшенням відношення вильотів наприкінці і початку обробки, стійкість інструмента зростає. З погіршенням оброблюваності матеріалу (збільшення показника n) ефект зростання стійкості збільшується. Ці висновки співпадають з експериментальними дослідженнями [4], проведеними на спеціальних свердлах (свердлильних спіралях без хвостовика) постійного перерізу по всій довжині інструмента, які показали, що крутильні коливання, які знижують стійкість свердлів, є пропорційними кубу довжини вильоту свердла.

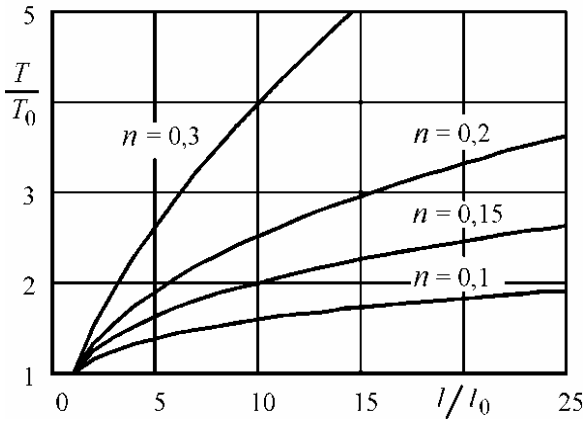
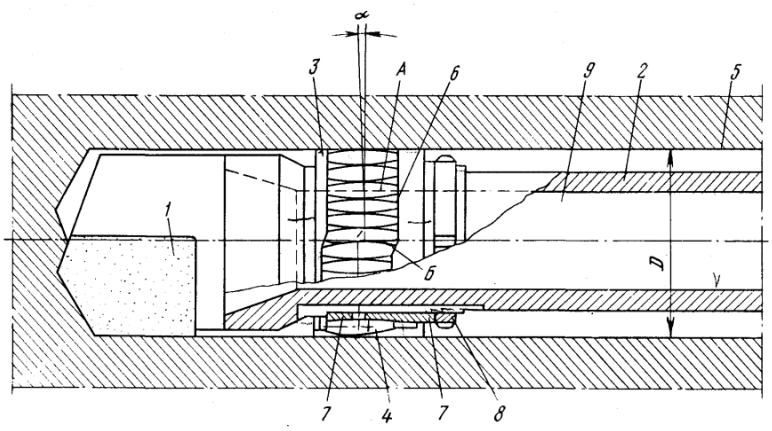


Рисунок 2 – Стійкість інструмента при свердлінні зі змінним вильотом
Джерело: розроблено автором

Проведені дослідження і узагальнення опублікованих робіт [4 – 8] склали теоретичну основу створення ряду принципово нових конструкцій механізмів зі змінною структурою, що працюють за методом перехоплення стебла інструмента по його довжині [2], а також розробки схем комбінованої обробки глибоких отворів із взаємною компенсацією складових технологічного навантаження. Однопотокова функціональна залежність навантаження привода подачі разом із приводом головного руху у відповідності зі структурою схемою, що наведена в [8], за механізм зазначеної функціональної залежності можуть виступати інструмент і заготовка, що оброблюється, і які взаємодіють в процесі обробки.

Схема розвантаження свердла, що основана на використанні комбінованої обробки „різання — пластична деформація”, застосована для свердління глибоких отворів [9, 10]. Схема процесу наведена на рис. 3. Інструмент комбінованої обробки глибоких отворів складається з різцевої головки, встановленої на корпусі і напрямної з роликами, що розташовані між стінкою отвору, який оброблюється, і гвинтовим замкнутим пазом напрямної. Напрямна може бути виконана у вигляді двох конусних кілець, закріплених на корпусі гайкою.



1 – різцева головка; 2 – корпус; 3 – напрямна; 4 – ролик; 5 – стінка отвору; 6 – гвинтовий замкнутий паз; 7 – конусне кільце; 8 – гайка; 9 – осьовий канал для відведення МОТЗ

Рисунок 3 – Свердло для глибокого свердління із самоподачею

Джерело: [9, 10].

Гвинтова поверхня паза на ділянці A виконана з кутом підйому α, що визначається з умови $\operatorname{tg}\alpha \geq S_0/\pi D$, де S_0 – подача на оберт; D – діаметр отвору. Гвинтовий паз змикається на ділянці $Б$, виконаної з більшою глибиною ніж на ділянці A. Корпус має осьовий канал для відводу МОТЗ.

При обробці глибоких отворів комбінованим інструментом деталі або інструменту надають відносне обертання і рух подачі. МОТЗ подається в кільцевий зазор між корпусом і отвором. Відпрацьована рідина разом зі стружкою виводиться через осьовий канал. Між роликами і поверхнею отвору створюється натяг за допомогою гайки, що зближує конічні кільця. Це дає змогу при взаємному обертанні деталі і інструмента роликам перекочуватись по поверхні отвору і по кільцях. Так як конічна поверхня кілець на ділянці A виконана гвинтовою, ролики відносно отвору рухаються по гвинтовій лінії, долаючи осьову складову сил різання, і надають інструменту переміщення в напрямку подачі. Повернення роликів здійснюється на ділянці $Б$ конічних кілець, що виконані тут з більшою глибиною, завдяки чому ролики не контактують з поверхнею отвору і можуть вільно повертатися у вихідне положення на ділянці A.

Натяг між роликами і отвором забезпечується гайкою, що зближає кільця, і вибирається в залежності від осьової складової сили різання так, щоб сила тертя між роликами і отвором перевищили її. При необхідності зміни величини подачі, наприклад, при переході до обробки іншого матеріалу, кільця замінюються на кільця з іншим кутом нахилу.

При взаємодії роликів з отвором відбувається часткове пластичне деформування металу деталі, завдяки чому поліпшується якість обробленої поверхні.

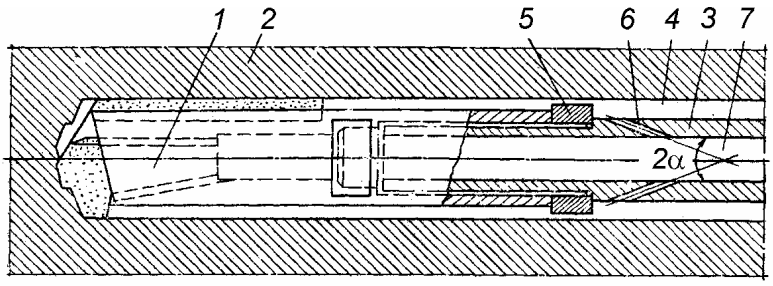
Механізм подачі необхідний лише під час врізання і для здійснення прискорених переміщень. Стебло свердла розвантажується від осьових сил і, відповідно, зменшується амплітуда коливань і підвищується точність обробки. Момент опору перекочування роликів у порівнянні з моментом сил різання є незначним і мало відображається на верхній межі передачі, обумовлений умовою міцності стебла по крутному моменту. Одночасно зі здійсненням подачі ролики пластично деформують стінки отвору, підвищуючи його якість.

Розвантаження стебла свердла при глибокому свердленні можливе не тільки при використанні комбінованого процесу механічної обробки глибоких отворів „різання –

пластична деформація” [9, 10]. Запропоновано пристрій, що дозволяє понизити осьове навантаження на стебло свердла створенням надмірного тиску МОТЗ в зоні різання. Схема пристрою для подачі в зону різання надмірного тиску МОТЗ приведена на рис. 4. Інструментальна головка, оброблювана деталь закріплені на трубчастому стеблі, що створює з оброблюваним отвором кільцеву порожнину для подачі під тиском МОТЗ з мастилоприймача (на рисунку не показаний). На стеблі біля різцевої головки закріплена шайба-дросель. Перед шайбою в стеблі виконані під кутом отвори малого діаметру, що направлені від різцевої головки і сполучають порожнину з осьовим каналом стебла.

Для забезпечення оптимальних співвідношень гідравлічних потоків площа $F_к$ осьового каналу стебла свердла і площі $F_о$ отворів зв’язані залежністю $12 < \frac{F_к}{F_о} < 25$.

Пристрій працює таким чином. В процесі свердлення деталі повідомляється обертання, а стеблу, закріпленому в інструментальному супорті верстата (на рисунку не показаний), повідомляється рух подачі. В процесі різання виникає осьова сила різання, що впливає на стебло і яка спричиняє його подовжній вигин. Стружка, яка утворюється при різанні, вимивається через канал стебла свердла за допомогою МОТЗ, що подається під тиском через порожнину і зазор між шайбою і отвором.



1 – інструментальна головка; 2 – деталь; 3 – трубчасте стебло; 4 – порожнина; 5 – шайба-дросель; 6 – отвори малого діаметру; 7 – осьовий канал стебла

Рисунок 4 – Зменшення продольного вигину стебля свердла шляхом подачі в зону різання надмірного тиску МОТЗ

Джерело: [9, 10]

Різниця тиску МОТЗ з боків шайби створює осьову силу, направлену зворотно складовій сил різання і частково компенсуючу її. Сила, що діє на стебло, зменшується, підвищується точність і продуктивність обробки. Величина різниці тиску залежить від тиску МОТЗ в каналах стебла свердла. При витіканні МОТЗ через отвори малого діаметру виникаючі похилі струмені захоплюють за собою МОТЗ, що знаходиться в каналі, і створюють в отворі різцевої головки розрідження. При цьому в отворі різцевої головки значно збільшується різниця тиску на шайбі. Ефект збільшення розвантажуючої сили досягається без зростання тиску МОТЗ в напірній магістралі, що дозволяє використовувати гідростанції малої потужності.

Оскільки частина потоку МОТЗ з порожнини перетікає в канал через отвір, з’являється можливість зменшити зазор між шайбою і отвором, збільшити діаметр шайби і підвищити розвантажуючу силу, залежну від площі шайби. Даний пристрій забезпечує розвантаження стебла свердла при дії сил різання без збільшення споживаної від гідростанції потужності, що значно покращує його експлуатаційні характеристики.

Висновки. Наведені дослідження показують, що керування навантаженням стебла інструмента по осьовій складовій сили різання і сил опору принципово можливе при використанні процесів комбінованої обробки отворів. Розроблені способи обробки глибоких отворів вирішують задачу зниження складових технологічного навантаження і дозволяють розширити технологічні можливості процесу свердління по глибині обробки.

Список літератури

1. Пестунов В. М., Свяцкий В. В., Свяцкая Л. П. Решение проблем глубокого сверления в металлообработке. *Вестник НТУУ „КПИ". Машиностроение*. 2006. № 49. С. 173–178.
2. Свяцький В. В., Скрипник О. В. Підвищення продуктивності процесу глибокого свердління. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2017. № 2(61). С. 105–113.
3. Лищинский Л. Ю. Оптимизация операций глубокого сверления. *Станки и инструмент*. 1971. № 10. С. 18–24.
4. Бурмистров Е. В., Мурашкин Е. М., Таратов А. В. Крутильные колебания и их влияние на стойкость сверл малых диаметров при обработке жаропрочных и титановых сплавов. *Прогрессивные конструкции сверл и их рациональная эксплуатация*. Вильнюс: ЛитНИИНТИ, 1974. С. 13.
5. Жилис В. И., Казокайтис В. Ф., Вайкунас П. С. Исследование износа быстрорежущих спиральных сверл. *Прогрессивные конструкции сверл и их рациональная эксплуатация*. Вильнюс: ЛитНИИНТИ, 1974. С. 34.
6. Пестунов В. М., Свяцкий В. В., Свяцкая Л. П. Элементы системы СПИД, ограничивающие выходные характеристики процесса глубокого сверления сверления. *Naukowym progress na rubieży tysiącleci – 2008* : materialy IV Międzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji, 1 – 15 czerwca 2008 roku. Przemyśl : Nauka i studia, 2008. Tym 14. S. 53–55.
7. Пестунов В. М., Свяцький В. В., Свяцька Л. П. Процес глибокого свердління з управлінням потоками потужності в кінематичних ланцюгах формоутворення. *Nastoleni moderni vědi – 2008* : materiály IV mezinárodni vědecko-praktická konference, 27.09 –05.10.2008. Praha : Publishing House „Education and science" s.r.o., 2008. Díl. 9. S. 31–33.
8. Пестунов В. М., Свяцький В. В., Придворова С. В. Оптимізація процесу обробки глибоких отворів. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2012. Вип. 25. Ч. 1. С. 200–210.
9. Пестунов В. М., Свяцький В. В., Свяцька Л. П. Розвантаження свердла при комбінованій обробці глибоких отворів. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2008. Вип. 20. С. 166–168.
10. Пестунов В. М., Свяцкий В. В., Придворова С. В. Механізми розвантаження інструменту при свердленні глибоких отворів. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2012. Вип. 25, ч. 1. С. 219–223.

Referencis

1. Pestunov, V.M., Sviatskyi, V.V. & Sviatska, L.P. (2006). Reshenie problem glubokogo sverlenija v metalloobrabotke [Solving the problems of deep drilling in metalworking]. *Vestnik NTUU „KPI". Mashinostroenie – Bulletin of NTUU "KPI". Engineering*, *49*, 173-178 [in Russian].
2. Sviatskyi, V.V. & Skrypnyk, O.V. (2017). Pidvyschennia produktyvnosti protsesu hlybokoho sverdlinnia [Productivity improvement of the deep drilling process]. *Visnyk Khersons'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu – Bulletin of the Kherson National Technical University*, *2(61)*, 105-113 [in Ukrainian].
3. Lishhinskij L. Ju. (1971). Optimizacija operacij glubokogo sverlenija [Optimization of deep drilling operations]. *Stanki i instrument – Machines and tools*, *10*, 18-24 [in Russian].
4. Burmistrov E. V., Murashkin E. M., Taratov A. V. (1974). Krutil'nye kolebanija i ih vlijanie na stojkost' sverl malyh diametrov pri obrabotke zharoprochnyh i titanovyh splavov [Torsional vibrations and their influence on the resistance of small diameter drills during processing of heat-resistant and titanium alloys]. *Progressivnye konstrukcii sverl i ih racional'naja jekspluatacija – Progressive drill designs and their rational operation*, Vilnius: LITNIINTI, 13 [in Russian].

5. Zhilis V. I., Kazokajtis V. F., Vajkunas P. S. (1974). Issledovanie iznosa bystrorezhushhih spiral'nyh sverl [Examination of wear of high-speed twist drills] *Progressivnye konstrukcii sverl i ih racional'naja jekspluatacija – Progressive drill designs and their rational operation*, Vilnius: LITNIINTI, 34 [in Russian].
6. Pestunov, V.M., Sviatskyi, V.V. & Sviatska, L.P. (2006). Jelementy sistemy SPID, ogranichivajushhie vyhodnye harakteristiki processa glubokogo sverlenija [System elements "machine-fixture-tool-workpiece" that limit the output characteristics of the process of deep drilling]. Naukowym progress na rubieży tysiącleci' 2008: *IV międzynarodowa naukowo-praktyczna konferencja (1-15 czerwca 2008 roku) – International Scientific and Practical Conference*. (14, pp. 53-55). Przemyśl: Nauka i studia [in Russian].
7. Pestunov, V.M., Sviatskyi, V.V. & Pridvorova, S.V. (2012). Optymizatsiia protsesu obrobky hlybokykh otvoriv [Optimization of processing deep apertures]. *Zbirnyk naukovykh prats' Kirovohrads'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v sil's'kohospodars'komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Collection of scientific works of Kirovograd National Technical University. Engeneering in agriculture, mechanical engineering, automation*, *25*, *1*, 200-210 [in Ukrainian].
8. Pestunov, V.M., Sviatskyi, V.V. & Sviatska, L.P. (2008). Protses hlybokoho sverdlinnia z upravlinniam potokamy potuzhnosti v kinematychnykh lantsiuhakh formoutvorennia [The process of deep drilling with control of power flows in the kinematic chain of shape forming]. Nastoleni moderni vědi' 2008: *IV mezinárodni vědecko-praktická konference (27.09-05.10.2008) – International Scientific and Practical Conference*. (9, pp. 31-33). Praha: Publishing House „Education and science" s.r.o. [in Ukrainian].
9. Pestunov, V.M., Sviatskyi, V.V. & Sviatska, L.P. (2008). Rozvantazhennia sverdla pry kombinovanij obrobtsi hlybokykh otvoriv [Unloading the drill with combined treatment of deep openings]. *Zbirnyk naukovykh prats' Kirovohrads'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v sil's'kohospodars'komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Collection of scientific works of Kirovograd National Technical University. Engeneering in agriculture, mechanical engineering, automation*, *20*, 166-168 [in Ukrainian].
10. Pestunov, V.M., Sviatskyi, V.V. & Pridvorova, S.V. (2012). Mekhanizmy rozvantazhennia instrumentu pry sverdlenni hlybokykh otvoriv [Mechanisms unloading tool when deep drilling]. *Zbirnyk naukovykh prats' Kirovohrads'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v sil's'kohospodars'komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Collection of scientific works of Kirovograd National Technical University. Engeneering in agriculture, mechanical engineering, automation*, *25*, *1*, 219-223 [in Ukrainian].

Volodymyr Sviatskyi, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Skrypnyk,** Assoc. Prof., PhD tech. sci.,
Oleh Sisa, PhD tech. sci., **Serhii Kononchuk,** PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Combined Deep Hole Processing Methods

The drilling of deep openings is a labor-intensive technological process, especially when processing viscous materials. In the system "machine-fixture-tool-workpiece" with deep drilling in the most difficult conditions the tool – a drill. Closed processing volume, various functions, the implementation of which must provide the design of the tool, forced mode of cutting forced to work the drill body, its cutting and guiding elements with high stresses.

Typically, the process of drilling deep openings is carried out on special or aggregate machines using a device containing a drill installed on a tubular stalk with ducts for chip removal and a lubricant receiving system for supplying a lubricating and cooling technical device under pressure. In the process of processing, the stem of the drill is under the influence of the axial component of the cutting force, which leads to its longitudinal bending and, consequently, to reduce the accuracy of the machining and stability of the tool.

Optimization of the process of deep drilling is reduced, as a rule, to the removal of certain technical limitations on the stability, strength or stiffness of the drill. However, the possibility of increasing the stiffness of the tool due to the change in the shape of the cross section of the stem of the drill is currently sufficiently studied and practically exhausted.

The above theoretical and experimental studies show that the control of the load of the tool stem along the axial component of the cutting force and the resistance forces is fundamentally possible with the use of processes of combined processing of openings. Developed methods of processing deep openings solve the problem of reducing the components of technological load and allow you to expand the technological capabilities of the drilling process at the depth of processing.

deep drilling, tool, stability, stiffness, unloading, deformation, efficiency

Одержано (Received) 27.05.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 30.03.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

ДВИГУНИ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ

УДК 662.76 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).131-137

С.В. Конончук, канд. техн. наук, доц., **О.В. Скрипник**, канд. техн. наук, доц., **В.В. Свяцький**, канд. техн. наук, доц.
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: kononchuk_s@ukr.net, skripnik1966@ukr.net, svv_iamph@ukr.net

Принципи побудови математичної моделі газогенераторного процесу

В статті запропоновано новий підхід до вивчення взаємозв'язку між основними параметрами газогенераторного процесу; оригінальні методики розрахунків матеріального та теплового балансів процесу газифікації твердого палива; спосіб реалізації математичної моделі газогенераторного процесу на комп'ютері.
газогенератор, паливо, дуття, газифікація, математична модель, матеріальний баланс, тепловий баланс, блок-схема

С.В. Конончук, канд. техн. наук, доц. **О.В. Скрипник,** канд. техн. наук, доц., **В.В. Свяцький,** канд. техн. наук, доц.
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Принципы построения математической модели газогенераторного процесса

В статье предложен новый подход в исследовании взаимосвязей между основными параметрами газогенераторного процесса; оригинальные методики расчета материального и теплового балансов процесса газификации твердого топлива; способ реализации математической модели газогенераторного процесса на компьютере.
газогенератор, топливо, дутье, газификация, математическая модель, материальный баланс, тепловой баланс, блок-схема

Постановка проблеми. Промислові підприємства України і, зокрема, сільськогосподарське машинобудування характеризуються підвищеним споживанням паливно-енергетичних ресурсів. Необхідність розвитку та впровадження в Україні технологій, здатних забезпечити економію енергоресурсів, поліпшення санітарно-гігієнічних і економічних показників виробництва спонукають до пошуку і використання альтернативних джерел енергії, у тому числі шляхом газифікації твердого палива місцевих джерел у газогенераторах.

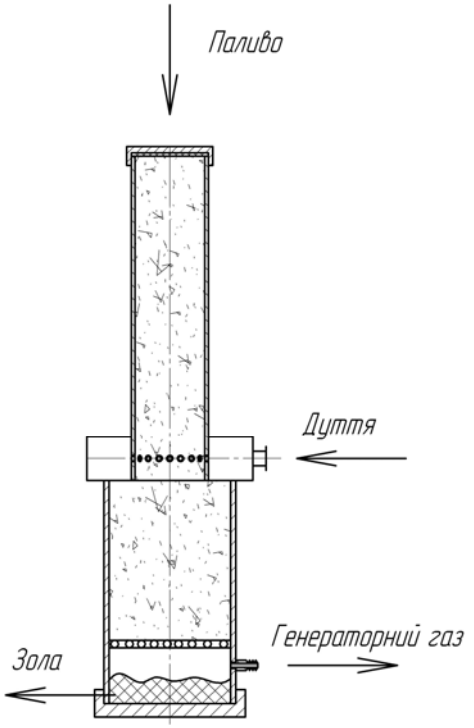
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для вирішення задач прогнозування і оптимізації газогенераторного процесу на основі дослідження взаємозв'язку між його параметрами а також розрахунку матеріального і теплового балансів газогенератора важливим є виявлення закономірностей тепло- і масообміну, а також винайдення математичного описання процесу з урахуванням типу газогенераторного процесу (прямий, обернений, горизонтальний) [1], кількості, температури і хімічного складу палива і дуття [2, 3]. З метою дослідження взаємозв'язку між найважливішими параметрами газогенераторного процесу розроблена лабораторна установка в якій реалізовано обернений газогенераторний процес [4]. Проте, проведення експериментальних досліджень при варіюванні значної кількості вхідних параметрів

© В.М. Кропівний, М.В. Босий, О.В. Кузик, А.В. Кропівна, 2019

призводить до зростання кількості натурних експериментів, враховуючи їх складність, обмежене великими труднощами. Тому, із трьох можливих типів математичних моделей (теоретичні, змішані і статистичні) для газогенераторів в наявних умовах доцільно побудувати моделі змішаного типу, коли математична структура моделі визначається теоретичним шляхом, а ідентифікація моделі здійснюється при використанні експериментальних даних.

Постановка завдання. Таким чином, метою даної роботи є розробка принципів побудови математичної моделі газогенераторного процесу яка забезпечує можливість варіювання вхідних параметрів процесу та дозволяє вибрати оптимальне їх співвідношення.

Виклад основного матеріалу. Аналізуючи газогенераторний процес, необхідно, перш за все, визначитись з його параметрами. Вибір останніх залежить від формулювання задачі. Якщо нас цікавлять кінцеві результати процесу, то ми відволікаємось від зміни термодинамічних, механічних та інших параметрів матеріальних потоків по висоті і ширині газогенератора, тобто розглядаємо його, як об'єкт з зосередженими параметрами. Якщо ж ми вивчаємо процес, включаючи і геометричні параметри агрегату, то тоді останній виступає як об'єкт із розосередженими параметрами. При врахуванні фактору часу матимемо динамічний об'єкт дослідження і відповідно, динамічну математичну модель. В протилежному випадку об'єкт і модель будуть статичними. Найпростішою є очевидно, статична модель із зосередженими параметрами, яку далі ми і будемо розглядати. Крім того для практичних цілей такого підходу цілком досить, тому що практиків в більшій мірі цікавлять кінцеві результати у вигляді встановлених взаємозв'язків між вхідними та вихідними параметрами для визначення квазістаціонарного режиму роботи газогенератора. Такий підхід споріднений до кібернетичного підходу, коли об'єкт дослідження виступає в ролі так званого "чорного ящика" (рис. 1).



Вхідні параметри (фактори):

Дуття – витрата дуття $g_д$, кг/с (м^3/с), його температура $t_д$, ˚С, та хімічний склад, % за масою (об'ємом) (вміст кисню в дутті, вологість, вміст вуглекислого газу тощо);

Паливо – витрата палива $g_п$, кг/с, його температура $t_п$, ˚С, та хімічний склад, % за масою.

Вихідні параметри (функціонали):

Генераторний газ – вихід генераторного газу $g_{г.г}$, кг/с, його температура $t_{г.г}$, ˚С, та хімічний склад, % за масою (об'ємом);

Зола – вихід золи $g_з$, кг/с, її температура $t_з$, ˚С, та хімічний склад, % за масою.

Рисунок 1 – "Чорний ящик" газогенераторного процесу
Джерело: розроблено авторами

Спрощений запис математичної моделі газогенераторного процесу буде мати вигляд:

$$F(g_д, t_д, g_п, t_п, g_{г.г}, t_{г.г}, g_з, t_з) = 0, \quad (1)$$

тобто, вихідні параметри математичної моделі функціонально залежать від вхідних параметрів (див. рис. 1).

Для забезпечення стаціонарного режиму роботи газогенератора приймають незмінними такі параметри, як температура дуття $t_д$ = const, температура палива $t_п$ = const та їх хімічний склад.

Оскільки в газогенераторному процесі спостерігається надлишок палива, то витрата палива буде функціонально залежати від витрати дуття:

$$g_п = f(g_д). \quad (2)$$

Таким чином, із усіх перерахованих вхідних параметрів залишається невизначеною одна величина – витрата дуття $g_д$. Це означає, що наша система має один ступінь свободи і для її визначення достатньо вказати витрату дуття. Одноваріантність газогенераторного процесу означає також, що взаємозв'язок між його параметрами можна представити графічно на плоскому рисунку у вигляді графіку залежності вихідного параметру від витрати дуття, наприклад:

$$g_{г.г} = f(g_д). \quad (3)$$

Можливі також інші варіанти визначення системи. Задавшись, наприклад, продуктивністю газогенератора (виходом генераторного газу), можна знайти кількість дуття, яку необхідно подавати в газогенератор для забезпечення заданої продуктивності.

Основними рівняннями, що пов'язують між собою параметри газогенераторного процесу є рівняння матеріального і теплового балансів:

$$g_д + g_п = g_{г.г} + g_з, \quad (4)$$

$$Q_{х.п} + Q_{ф.п} + Q_{ф.д} = Q_{х.г.г} + Q_{г.г} + Q_з + Q_{енд.} + Q_{втр.}, \quad (5)$$

де $Q_{х.п}$, $Q_{ф.п}$, $Q_{ф.д}$, $Q_{х.г.г}$, $Q_{г.г}$, $Q_з$, $Q_{енд.}$, $Q_{втр.}$, Вт – відповідно, хімічна теплота палива, фізична теплота палива (у випадку використання підігрітого палива), фізична теплота дуття (у випадку використання підігрітого дуття), хімічна теплота генераторного газу, тепловміст генераторного газу, тепловміст золи, теплота ендотермічних реакцій, втрати теплоти в навколишнє середовище.

Оскільки результуюча теплота, що виділяється при горінні палива в газогенераторі менше його теплотворної здатності на величину теплоти ендотермічних реакцій, можливі два варіанти при складанні теплового балансу газогенераторного процесу. У першому випадку, при визначенні $Q_{х.п}$ вважаємо, що спочатку відбувається повне згорання палива до вищих оксидів, а вже у відновлювальній зоні протікають ендотермічні реакції з поглинанням теплоти $Q_{енд}$. У другому випадку, вважаємо що у газогенераторі відбувається неповне горіння палива в умовах недостатності кисню (хімічний недопал) і результуюча хімічна теплота палива розраховується з урахуванням

поглинання теплоти при протіканні ендотермічних реакцій. В цьому випадку величина $Q_{енд}$ з рівняння теплового балансу (5) зникає.

Визначаючи статті матеріального балансу при змінних значеннях витрати дуття маємо:

$$g_з = f(g_п) = f(g_д). \quad (6)$$

Таким чином, в рівнянні (4) матеріального балансу залишилась одна невідома величина – вихід генераторного газу, яку ми з нього і знаходимо.

Визначаючи статті теплового балансу при змінних значеннях витрати дуття маємо:

$$Q_{х.п} = f(g_д, g_п), \quad (7)$$

$$Q_{ф.п} = f(g_п), \text{ або, враховуючи (2)} - Q_{ф.п} = f(g_д), \quad (8)$$

$$Q_{ф.д} = f(g_д), \quad (9)$$

$$Q_з = f(g_п), \text{ або, враховуючи (2)} - Q_з = f(g_д), \quad (10)$$

$$Q_{енд.} = f(g_д, g_п). \quad (11)$$

Що стосується втрат теплоти в навколишнє середовище – $Q_{втр.}$, сама по собі ця величина для заданих умов газифікації ($g_д$ = const, $g_п$ = const) буде постійною. Згідно з даними [5 – 7] величина $Q_{втр.}$ для енергетичних установок шахтного типу (доменних печей, газогенераторів, вагранок, печей для відпалювання вапняку) приймається у відсотках від прибутку теплоти. Отже при $Q_{приб.} = f(g_д)$ (рівняння (7) – (9)), маємо:

$$Q_{втр.} = f(g_д). \quad (12)$$

$$Q_{х.г.г} = f(g_д, g_п), \quad (13)$$

Таким чином, в рівнянні (5) теплового балансу залишилась одна невідома величина – тепловміст генераторного газу, яку ми з нього і знаходимо. Знайшовши значення тепловмісту продуктів газифікації, за їх теплоємністю і виходом можна розрахувати температуру генераторного газу $t_{г.г}$. Аналогічно, за значеннями тепловмісту, теплоємності і виходу золи розраховують її температуру $t_з$.

Описана методика дає можливість вести всі розрахунки на комп’ютері. Для визначення взаємозв’язку (1) складаємо блок-схему вирішення задачі визначення залежності температури генераторного газу та його виходу від витрати дуття (рис. 2), яка дозволяє отримати програмний продукт по вирішенню даної проблеми.

За результатами розрахунку будують графік залежності виходу генераторного газу від витрати дуття. За необхідності будують графік залежності температури генераторного газу від витрати дуття. Запропонований алгоритм дозволяє також отримати вказані співвідношення у вигляді таблиць. Ввівши фактичні параметри роботи газогенератора ми отримаємо точку на графіку, яка характеризує процес, і в залежності від характеру оптимізації (зменшення температури генераторного газу, підвищення продуктивності газогенератора тощо), програма розробляє певні рекомендації по переводу процесу в оптимальну область.

Маючи статистичні дані температури генераторного газу для різних значень витрати дуття, можна з рівняння теплового балансу знайти значення втрат теплоти в навколишнє середовище, і, побудувавши композиційний план [8], ми зможемо визначити залежність (13) у вигляді полінома. Можливі також інші варіанти реалізації математичної моделі.

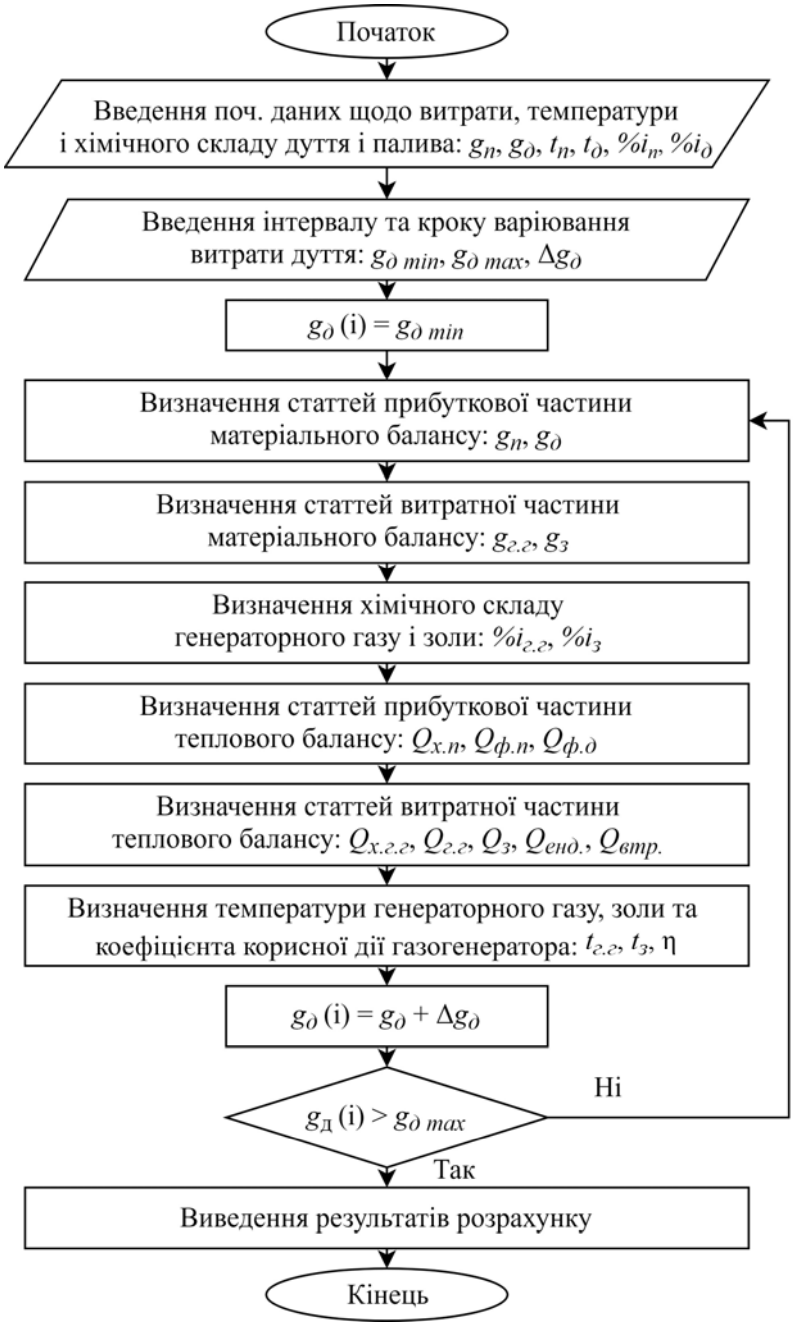


Рисунок 2 – Блок-схема вирішення задачі визначення залежності температури генераторного газу та продуктивності газогенератора від витрати дуття

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Таким чином, викладена методика математичного моделювання газогенераторного процесу дозволяє вирішувати задачі прогнозування та оптимізації цього процесу, дає можливість практичного використання математичної моделі при проектуванні та експлуатації газогенераторів на підприємствах різних галузей

промисловості. Але отримані результати потребують практичної перевірки і уточнень, що можливо зробити лише в умовах активного натурного експерименту. Крім того, шляхом варіювання таких параметрів як температура дуття, процентний вміст кисню, вологи в дутті, номенклатура та хімічний склад палива, ми можемо отримати більш універсальну математичну модель газогенераторного процесу. Враховуючи все це виникає необхідність подальшого дослідження взаємозв'язку між параметрами газогенераторного процесу.

Список літератури

1. Газогенератор. Веб-сайт. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Газогенератор. (дата звернення: 26.05.2019).
2. Програма розрахунку термодинамічних характеристик реакцій газогенераторного процесу / С.В. Конончук та ін *Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві":* зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. конф., жовтень 2015 р. Кіровоград. С. 47-50.
3. С.В. Конончук, В.В. Пукалов. Термодинамічні характеристики безкисневого газогенераторного процесу. *«Литво-2015»:* матеріали XI Міжнар. наук.-практ. конф., 26 – 28 травня 2015 р. Запоріжжя. С. 135-138.
4. Експериментальна установка для дослідження взаємозв'язку між параметрами газогенераторного процесу / В.І. Кравченко та ін. *Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві:* зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. конф., жовтень 2015 р. Кіровоград. С. 50-52.
5. Металлургическая теплотехника. В 2-х т. Т 2. Конструкция и работа печей: учебник для вузов / В.А. Кривандин и др. Москва: Металлургия. 1986. 592 с.
6. Кривандин В.А. Марков Б.Л. Металлургические печи. Москва: Металлургия. 1967. 672 с.
7. Долотов Г.П., Кондаков Е.А. Литейные печи и сушила. Москва: Машиностроение. 1990. 304 с.
8. Рафалес-Ламарка Э.Э., Николаев В.Г. Некоторые методы планирования и математического анализа биологических экспериментов. Киев: Наукова думка. 1971. 119 с.

References

1. Gazogenerator [Gas generator]. Retrieved from https://uk.wikipedia.org/wiki/Газогенератор [in Russian].
2. Kononchuk, S.V., Kravchenko, V.I., Klymenko, V.V., Skrypnyk, O.V., Yakymenko, I.V. (2015). Prohrama rozrakhunku termodynamichnykh kharakterystyk reaktsii hazoheneratornoho protsesu [Program of calculation of thermodynamic characteristics of reactions of the gas-generating process]. Problems of energy efficiency and automation in industry and agriculture: *Zbirnyk tez dopovidei Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (zhovten 2015 roku) – International Scientific and Practical Conference.* (pp. 47-50). Kirovohrad [in Ukraine].
3. Kononchuk, S.V., Pukalov, V.V. (2015). Termodynamichni kharakterystyky bezkysnevoho hazoheneratornoho protsesu [Thermodynamic characteristics of the oxygen-free gas-generating process]. Casting – metallurgy: *Materialy 11 Mizhnarodnoi konferentsii «Lytvo-2015» (26 – 28 travnia 2015 roku) – International Scientific and Practical Conference.* (pp. 135-138). Zaporizhzhia [in Ukraine].
4. Kravchenko, V.I., Kononchuk, S.V., Klymenko, V.V., Skrypnyk, O.V., Yakymenko, I.V. (2015). Eksperymentalna ustanovka dlia doslidzhennia vzaiemozviazku mizh parametramy hazoheneratornoho protsesu [Experimental equipment to study the relationship between process parameters of the gas generator]. Problems of energy efficiency and automation in industry and agriculture: *Zbirnyk tez dopovidei Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (zhovten 2015 roku) – International Scientific and Practical Conference.* (pp. 50-52). Kirovohrad [in Ukraine].
5. Krivandin, V.A., Nevedomskaya, I.N., Kobakhidze, V.V. et al. (1986). *Metallurgicheskaya teplotekhnika [Metallurgical heat engineering]*. (Vols. 1-2). Moscow: Metallurgiya [in Russian].
6. Krivandin, V.A., Markov, B.L. (1967). *Metallurgicheskiye pechi [Metallurgical furnaces]*. Moscow: Metallurgiya [in Russian].
7. Dolotov, G.P., Kondakov, E.A. (1990). *Liteynyye pechi i sushila [Foundry furnaces and dryers]*. Moscow: Mashinostroyeniye [in Russian].
8. Rafales-Lamarka, E.E., Nikolayev, V.G. (1971). *Nekotoryye metody planirovaniya i matematicheskogo analiza biologicheskikh eksperimentov [Some methods of planning and mathematical analysis of biological experiments]*. Kiyev: Naukova dumka [in Russian].

Serhii Kononchuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci**, Oleksandr Skrypnyk,** Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Volodymyr Sviatskyi,** Assoc. Prof., PhD tech. sci
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Principles of Construction of a Mathematical Model of the Gas Generator Process

The need for the development and introduction of technologies in Ukraine that are capable of providing energy resources savings, improving sanitary and hygienic and economic indicators of production, encourage the search for and use of alternative energy sources, including gasification of solid fuels of local sources in gas generators.

To solve problems of forecasting and optimization of the gas generator process on the basis of the study of the relationship between its parameters, as well as the calculation of the material and thermal balance of the gas generator, the principles of detection of the laws of heat and mass exchange, as well as the invention of the mathematical description of the process, taking into account the type of the gas generator process (direct, horizontal), quantity, temperature and chemical composition of fuel and blast. In order to study the relationship between the most important parameters of the gas generator process, a laboratory plant was developed in which the reverse gas generator process was implemented. However, the conduct of experimental studies in the variation of a large number of input parameters leads to an increase in the number of field experiments, given their complexity, is limited by great difficulties. Therefore, of the three possible types of mathematical models (theoretical, mixed and statistical) for gas generators in the present conditions, it is expedient to construct models of mixed type, when the mathematical structure of the model is determined theoretically, and the identification of the model is carried out using experimental data. The gas generator is considered as a static object with lumped parameters. The original methods of calculating the material and thermal balance of the gasification process of solid fuel have been developed, taking into account the variation of the input parameters. A block diagram of the solution of the problem of determining the temperature dependence of the generator gas and its amount from the air flow, which allows obtaining a computer program for solving this problem, has been developed.

The given method of mathematical modeling of the gas-generating process allows to solve problems of forecasting and optimization of this process, gives the possibility of practical use of mathematical model at designing and operation of gas generators at enterprises of different industries.

gas generator, fuel, blast, gasification, mathematical model, material balance, heat balance

Одержано (Received) 02.05.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 20.05.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМЛЕКСИ

УДК 681.5.08:[658.562:622.34:622.016.2] DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).138-145

А.А. Азарян, проф., д-р техн. наук, **А.А. Трачук,** доц., канд. техн. наук, **А. Н. Гриценко,** научн. сотр., **Д.В. Швец,** ассист.
Криворожский национальный университет, г. Кривой Рог, Украина
e-mail: i.am.dmitriy.shvets@gmail.com

Разработка измерительного канала для оперативного контроля содержания железа магнитного во взрывных скважинах

Статья посвящена исследованию вопроса повышения качества оперативного контроля содержания железа в магнетитовых рудах. Проведены исследования для разработки измерительного канала, в ходе которых была разработана конструкция устройства для контроля содержания магнитного железа в разведочных скважинах магнитного каротажа. Определены оптимальные размеры индуктивного датчика, определены схемы преобразователей «напряжение-ток», преобразователя напряжения питания с повышенным КПД. Разработанное устройство опробовано в лабораторных условиях.
каротаж, магнетит, измерительный канал, взрывная скважина

А. А. Азарян, проф., д-р техн. наук, **А. А. Трачук,** доц., канд. техн. наук, **А. Н. Гриценко,** наук.співр., **Д. В. Швець,** асист.
Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна

Розробка вимірювального каналу для оперативного контролю вмісту заліза магнітного у вибухових свердловинах

Стаття присвячена дослідженню питання підвищення якості оперативного контролю вмісту заліза в магнетитових рудах. Проведено дослідження для розробки вимірювального каналу, в ході яких була розроблена конструкція пристрою для контролю вмісту магнітного заліза в розвідувальних свердловинах магнітного каротажу. Визначено оптимальні розміри індуктивного датчика, визначені схеми перетворювачів «напруга-струм», перетворювача напруги живлення з підвищеним ККД. Розроблений пристрій випробувано в лабораторних умовах.
каротаж, магнетит, вимірювальний канал, вибухова свердловина

Постановка проблемы. На сегодняшний день в условиях жесткой конкуренции на мировых рынках, достаточно важным является вопрос контроля качества добываемого железорудного сырья. Повышенные требования выдвигаются не только к точности контроля содержания железа в нём, но и к оперативности процесса контроля.

Одним из возможных путей совершенствования оперативного контроля содержания железа в железорудном сырье является применение каротажных зондов во взрывных скважинах. В условиях открытой добычи, измерение содержания железа в массивах горной породы с учетом возмущающих факторов, влияющих на точность контроля, является достаточно сложной задачей**.**

В связи с этим, научные исследования вопроса контроля содержания железа во взрывных скважинах и практическая реализация в данном направлении являются актуальными в современных условиях добычи и переработки железной руды, что обусловлено постоянным ростом требований к качеству конечных продуктов переработки железорудного сырья.

© А.А. Азарян, А.А. Трачук, А. Н. Гриценко, Д.В. Швец, 2019

Анализ последних исследований и публикаций. Существующие методы оперативного контроля содержания полезного компонента в железорудном сырье можно разделить на три типа: ядернофизический [1-4], основанный на взаимодействии гамма-излучения с облучаемой горной массой; магнитометрический [5-7], использующий изменение относительной магнитной проницаемости при взаимодействии с магнитным железом; ультразвуковой [8-10], базирующийся на изменении распространения ультразвуковых волн в исследуемом материале.

Практика показывает, что наиболее подходящими для оперативного контроля качества магнетитовых руд являются именно магнитометрические методы.

Постановка задачи. Задачей исследования является разработка устройства для контроля содержания магнитного железа в разведочных скважинах магнитного каротажа и определение его оптимальных параметров.

Изложение основного материала. Содержание магнетита в железорудном сырье можно определить по его магнитной восприимчивости. Это объясняется тем, что магнитная восприимчивость магнетита на два порядка выше, чем у других минералов, входящих в состав рудных сростков.

Для оперативного контроля магнитной восприимчивости железорудного сырья применяют катушки, индуктивность которых зависит от массы ферромагнитного материала, вносимого в поле катушки.

По минералогическому составу железистых кварцитов магнитная восприимчивость магнетита выше, чем остальных минералов [11], поэтому магнетитовую руду можно квалифицировать как бинарную смесь, где полезный компонент – магнитный, остальные составляющие – немагнитные, следовательно, содержание железа магнитного в железистых кварцитах можно определить магнитной восприимчивостью руды.

Для измерения магнитной восприимчивости рудного материала при использовании магнитометрического метода определения содержания Fемагн. известны следующие методы: индуктивный, индукционный и пондеромоторный.

Индуктивный метод наиболее распространен. Метод основан на изменении индуктивности L электрической измерительной катушки при помещении ферромагнитного материала с некоторой магнитной восприимчивостью χ в переменное магнитное поле, создаваемое данной катушкой:

$$L = f(\chi), \tag{1}$$

или же на изменении взаимоиндуктивности M двух магнитосвязанных катушек, если сердечником является исследуемый ферримагнитный материал.

С учетом этого, измерительную катушку (или пару катушек) можно рассматривать как параметрический (требующий источника питания) индуктивный первичный измерительный преобразователь, входным сигналом которого является магнитная восприимчивость вещества, выходным – индуктивность.

Исходные данные для разработки экспериментального образца измерительного канала следующие:

– диапазон контроля содержания массовой доли магнетита от 2 до 60% абс.;
– выходной сигнал аналоговый, токовый от 0 до 5мА при нагрузке 1кОм;
– питание измерительного канала осуществляется от стабилизированного источника напряжения +5 В;
– электрическая схема должна быть выполнена на микромощных операционных усилителях для максимального уменьшения потребляемого тока;

– длина скважинного датчика, включающего в себя индуктивный преобразователь и электронный блок, не должна превышать 400 мм;

– допустимая масса скважинного магнитного датчика – не более 0.5 кг;

– магнитный датчик является составной частью комбинированного скважинного снаряда.

Реализация указанных требований предполагает наличие в структуре измерительного канала следующих основных функциональных узлов: индуктивный датчик, измерительный автогенератор, амплитудный детектор, преобразователь «напряжение-ток». Необходимость минимального потребления тока требует применения в схеме микромощных активных элементов, а также преобразователей напряжения с возможно большим КПД, при этом схема, до известных пределов, должна быть максимально упрощена.

При разведке месторождений по взрывным скважинам используются множество методов. Бурение скважин с отбором керна гарантирует получение надежной информации о железистых кварцитах в массиве. Недостатком такого способа получения геологической информации является высокая стоимость буровых работ и необходимость извлечения пустой породы. Более экономичным является бурение без отбора керна с получением необходимой геологической информации по данным каротажа взрывных скважин.

Функциональная схема измерительного канала приведена ниже и состоит из следующих основных узлов. Измерительный автогенератор 1, в колебательный контур которого включены индуктивность датчика L_d и опорная индуктивность L_{on}, коммутаторы 2, 3, амплитудные детекторы 4, 5, аналоговый сумматор 6, преобразователь "напряжение-ток" 7 и преобразователь источника питания 8. Измерительный канал построен по схеме прямого преобразования и предназначен для преобразования индуктивности датчика в уровень выходного блока 7.

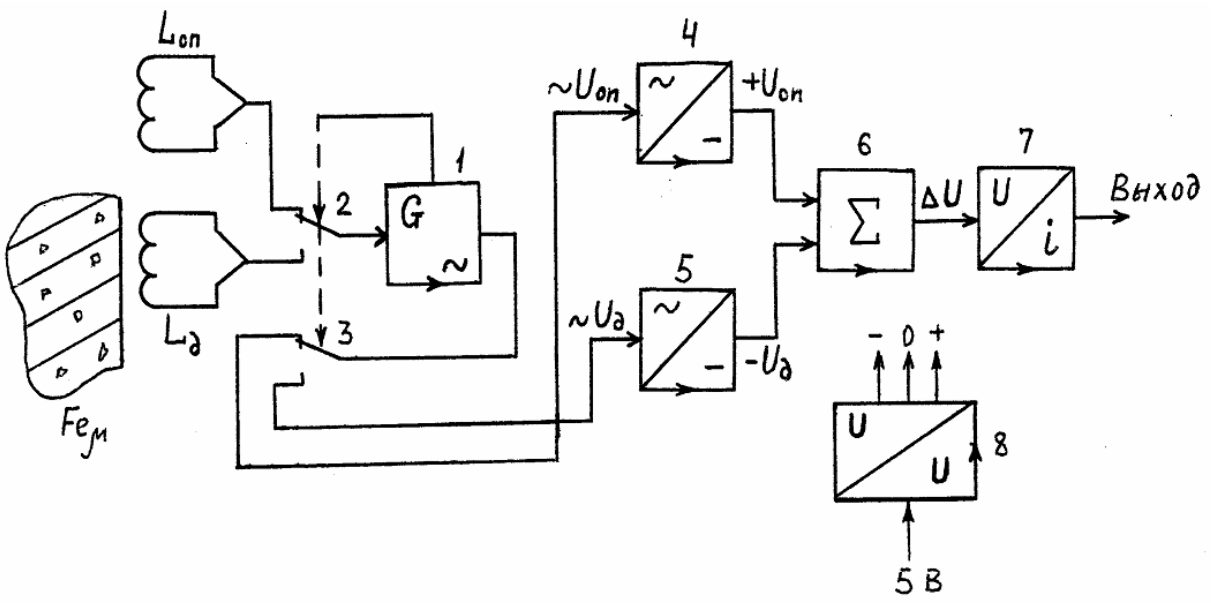


Рисунок 1 – Функциональная схема измерительного канала

Источник: разработано авторами

Принцип работы заключается в следующем. В исходном состоянии измерительный автогенератор 1 вырабатывает гармоническое напряжение частотой 820

Гц и амплитудой, которая определяется величинами индуктивностей L_d и L_{on}. Коммутаторы 2, 3 периодически включают в колебательный контур автогенератора индуктивности L_d и L_{on}, что позволяет получать на выходе автогенератора переменные напряжения $\sim U_d$ и $\sim U_{on}$ с амплитудами, пропорциональными L_d и L_{on} соответственно. Переменные напряжения выпрямляются детекторами 4, 5 с противоположными знаками, суммируются сумматором 6, на выходе которого выделяется напряжения $\Delta U = U_{on} - U_d$, которое преобразуется блоком 7 в уровень выходного тока (в исходном состоянии уровень выходного тока равен 0.2 мА).

При внесении магнитной руды в ближнюю зону датчика L_d индуктивность последнего увеличивается, что приводит к увеличению $\sim U_d$ и соответственно U_d; величина ΔU на выходе сумматора 6 и выходной ток блока 7 также растет пропорционально приращению индуктивность датчика. При этом функция преобразования измерительного канала описывается уравнением

$$i_{вых} = A + k \cdot Fe_{\mu} \ , \qquad (2)$$

где $i_{вых}$ – выходной ток блока 7 в мА; $A=0.2$ мА; k=0/083 мА/%;

Fe_{μ} – содержание массовой доли магнетита, %.

Наличие в схеме специальной опорной цепи (L_{on}, коммутаторы 2,3, детектор 4) позволяет повысить температурную стабильность амплитуды полезного сигнала, который представляет собой разность напряжений от индуктивного датчика L_d и опорной индуктивности L_{on}. Особенностью работы автогенератора 1 является его настройка в областях малых значений эквивалентного сопротивления колебательного контура, что обеспечивает необходимую чувствительность к изменению индуктивности датчика.

Принципиальная схема измерительного канала содержит:

– измерительный автогенератор, состоящий из конвертора отрицательного активного сопротивления с буферным повторителем, к которому подключен параллельный колебательный контур;

– диодные коммутаторы;

– амплитудные детекторы;

– инвертирующий сумматор, состоящий из усилителя, пассивной суммирующей цепи и цепи отрицательной обратной связи;

– преобразователь "напряжение-ток"

В исходном состоянии автогенератор вырабатывает гармоническое напряжение, частота которого определяется емкостью и индуктивностью контура и равна 820 Гц. Амплитуда гармонического напряжения определяется условием существования стационарных колебаний.

Переменное напряжение с контура выпрямляется двумя амплитудными детекторами, причем один детектор выделяет напряжение положительного знака от опорной индуктивности, а второй – напряжение отрицательного знака от датчика. Выпрямленные напряжения складываются сумматором, на выходе которого выделяется разность ΔU напряжений от опорной индуктивности и индуктивности датчика.

При внесении образца магнетитовой руды в ближнюю зону датчика индуктивность увеличивается пропорционально содержанию магнетита в руде. Соответственно увеличивается амплитуда отрицательной полуволны, так как она формируется индуктивностью датчика. Амплитуда положительной полуволны остается неизменной.

Вследствие этого напряжение на выходе детектора увеличивается, что приводит к увеличению разности напряжений на выходе сумматора, пропорционально содержанию магнетита. Соответственно увеличивается выходной ток преобразователя.

Зависимость выходного тока преобразователя от массовой доли железа в горной массе приведена на рисунке 2.

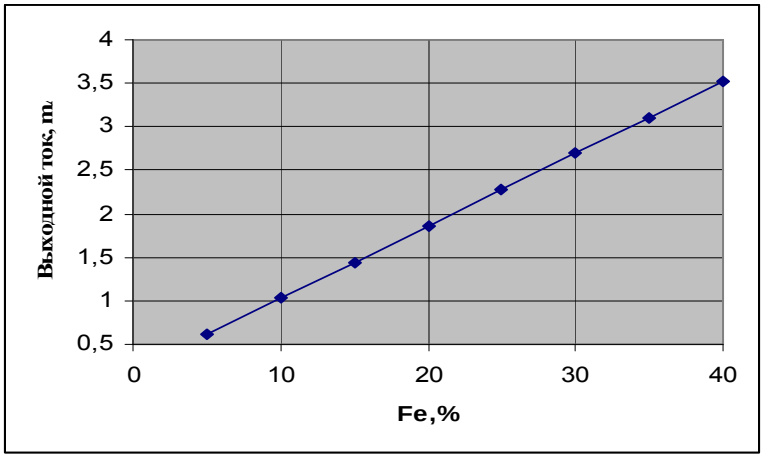


Рисунок 2 – Зависимость выходного тока преобразователя от массовой доли железа в горной массе
Источник: разработано авторами

Уравнение связи:

$$I = 0{,}083Fe + 0{,}2 \ . \tag{2}$$

Детерминированный коэффициент:

$$R^2 = 0{,}99 \ . \tag{3}$$

Видно, что при изменении массовой доли железа в горной массе в пределах 0-40% выходного ток преобразователя меняется в пределах от 0,2 mA до 3,52 mA.

На рисунке 3 приведена зависимость выходного напряжения от массовой доли железа в горной массе.

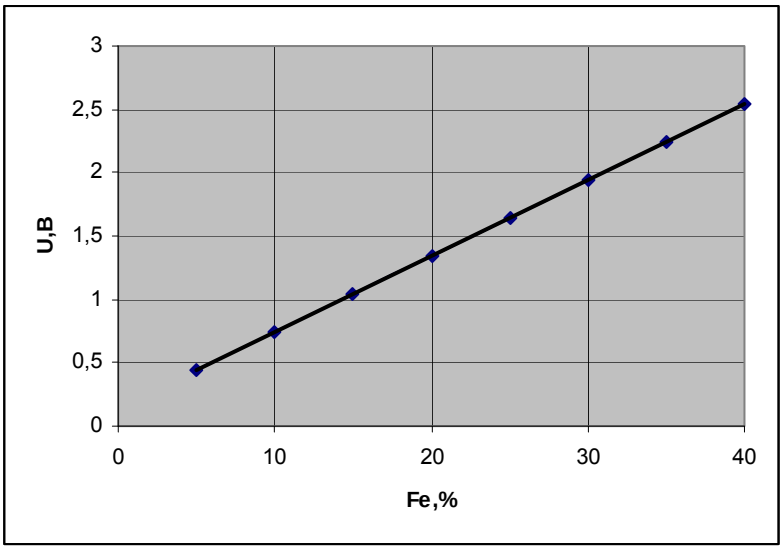


Рисунок 3 – Зависимость выходного напряжения от массовой доли железа в горной массе
Источник: разработано авторами

Получено уравнение связи

$$U = 0{,}0598Fe + 0{,}1441 \quad (4)$$

и детерминированный коэффициент

$$R^2 = 0{,}99\,. \quad (5)$$

Видно, что при изменении массовой доли железа в горной массе в пределах 0-40% выходное напряжение меняется от 0,23 до 2,54 вольта.

В дифференциальном индуктивном датчике при изменении измеряемого параметра одновременно изменяются индуктивности двух одинаковых катушек, причем изменение происходит на одну и ту же величину, но с обратным знаком.

Индуктивность катушки вычисляется по формуле

$$L = \frac{W\Phi}{I}\,, \quad (3)$$

где W – число витков;

Φ – пронизывающий ее магнитный поток;

I – проходящий по катушке ток.

Ток связан с МДС соотношением:

$$I = \frac{Hl}{W}\,. \quad (4)$$

Откуда получаем:

$$L = \frac{W^2}{R_m}\,, \quad (5)$$

где $R_m = HL/\Phi$ – магнитное сопротивление индуктивного датчика.

Индуктивный датчик в корпусе скважинного снаряда необходимо герметизировать любым радиочастотным компаундом (рабочая частота у датчика не более 1 кГц), можно использовать парафин. При намотке катушки датчика между поверхностью магнитопровода и обмоткой необходимо расположить тонкую (0.01 мм) пленку из фторопласта, лавсана, полиэтилена и т.п.

Выводы:

– исследованы основные функциональные узлы и разработана принципиальная схема измерительного канала;

– для индуктивного датчика определены оптимальные габариты при сохранении высокой чувствительности к содержанию магнетита в руде;

– исследованы и выбраны схемы преобразователей "напряжение-ток" и преобразователя напряжения питания с повышенным КПД;

– разработана конструкция, изготовлены и испытаны в лабораторных условиях экспериментальные образцы измерительных каналов для контроля содержания магнетита в разведочных скважинах магнитного каротажа скважин большого диаметра (до 350 мм);

– чувствительность измерительного канала, в среднем, составила 10-3 магнитных единиц на один процент содержания магнитного железа.

Список литературы

1. Azaryan A., Azaryan V. Use of Bourger Lambert Bera law for the operative control and quality management of mineral raw materials. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. № 1. P. 4-9.
2. Azaryan, A. A., Azaryan, V. A., Trachuk A. A. Quick response quality control of mineral raw materials in the pipeline. *European Science and Technology. Materials of the V International scientific and practice conference*. Munich, Germany. 2013. P. 325–331.

3. Díaz-H, K., Cristancho, F. Effect of sample thickness on 511 keV single Compton-scattered gamma rays. *AIP Conference Proceedings 1753, 080001.* 2016. DOI: 10.1063/1.4955371
4. Azaryan, A., Gritsenko, A., Trachuk A., Shvets D. Development of a method for operational control over quality of the iron ore raw materials during open and underground extraction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2018. 5 (95). P. 13-19. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.144003
5. Дрига В. В. Разработка математической модели накладного индуктивного датчика для контроля качества железорудного сырья. *Качество минерального сырья*. 2014. С. 112-118.
6. Дрига В. В., Швыдкый А. В. Лабораторное исследование точности измерения устройства оперативного контроля качества железистых кварцитов. *Качество минерального сырья.* 2008. С. 257-261.
7. Дрига В. В. Исследование влияния изменения пространственного расположения рудного материала в магнитном поле накладного индуктивного преобразователя на точность непрерывного контроля качества магнетитовых руд. *Качество минерального сырья.* 2011. С. 64-80.
8. Morkun, V., Morkun N., Tron V., & Hryshchenko S. Investigation of the effect of characteristics of gas-containing suspensions on the parameters of the process of ultrasonic wave propagation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2017. 6(5-90). P. 49–58.
9. Поркуян О. В., Сотникова Т. Г. Комбинированный метод определения относительного содержания магнетита в твердой фазе железорудной пульпы. *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ"*. 2010. № 12. Харьков. НТУ "ХПИ". С. 29-36.
10. Morkun, V., Morkun N. Estimation of the Crushed Ore Particles Density in the Pulp Flow Based on the Dynamic Effects of High-Energy Ultrasound. *Archives of Acoustics.* 2018. Vol.43, №1, P. 61-67.
11. Марюта А.Н., Младецкий П.К., Новицкий П.А. Контроль качества минерального сырья. Киев: Техніка, 1976. 220с

Referencis

1. Azaryan, A. & Azaryan, V. (2015). Use of Bourger Lambert Bera law for the operative control and quality management of mineral raw materials. *Metallurgical and Mining Industry*, *1*, 4-9 [in English].
2. Azaryan, A. A., Azaryan, V. A. & Trachuk, A. A. (2013). Quick response quality control of mineral raw materials in the pipeline. *European Science and Technology. Materials of the V International scientific and practice conference*. Munich, Germany [in English].
3. Díaz-H, K. & Cristancho, F. (2016). Effect of sample thickness on 511 keV single Compton-scattered gamma rays. *AIP Conference Proceedings 1753, 080001.* DOI: 10.1063/1.4955371 [in English].
4. Azaryan, A., Gritsenko, A., Trachuk, (2018). A. & Shvets, D. Development of a method for operational control over quality of the iron ore raw materials during open and underground extraction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (95)*, 13-19. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.144003 [in English].
5. Driga, V.V. (2014). *Razrabotka matematicheskoj modeli nakladnogo induktivnogo datchika dlja kontrolja kachestva zhelezorudnogo syr'ja [Development of the mathematical model of the inductive sensor for monitoring the iron ore quality]*. Kachestvo mineral'nogo syr'ja [in Russian].
6. Driga, V.V. & Shvydkyj, A.V. (2008). *Laboratornoe issledovanie tochnosti izmerenija ustrojstva operativnogo kontrolja kachestva zhelezistyh kvarcitov [Laboratory research of measurement accuracy of a device for operative quality control of ferruginous quartzites]*. Kachestvo mineral'nogo syr'ja [in Russian].
7. Driga, V.V. (2011). *Issledovanie vlijanija izmenenija prostranstvennogo raspolozhenija rudnogo materiala v magnitnom pole nakladnogo induktivnogo preobrazovatelja na tochnost' nepreryvnogo kontrolja kachestva magnetitovyh rud [Investigation of the influence of changes in the spatial location of the ore material in the magnetic field of an overhead inductive converter on the accuracy of continuous quality control of magnetite ores]*. Kachestvo mineral'nogo syr'ja [in Russian].
8. Morkun, V. S., Morkun, N. V., Tron, V. V., & Hryshchenko, S. M. (2017). Investigation of the effect of characteristics of gas-containing suspensions on the parameters of the process of ultrasonic wave propagation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(5-90),* 49–58 [in English].
9. Porkujan, O. V. & Sotnikova, T. G. (2010). Kombinirovannyj metod opredelenija otnositel'nogo soderzhanija magnetita v tverdoj faze zhelezorudnoj pul'py [Combined method for determining the relative magnetite content in the solid phase of iron ore pulp]. *Vestnik Nac. tehn. un-ta "HPI"* [in Russian].
10. Morkun, V. S. & Morkun, N. V. (2018). Estimation of the Crushed Ore Particles Density in the Pulp Flow Based on the Dynamic Effects of High-Energy Ultrasound. *Archives of Acoustic, Vol.43*, *1*, 61-67 [in English].

11. Marjuta, A. N., Mladeckij, P. K. & Novickij, P. A. (1976). *Kontrol' kachestva mineral'nogo syr'ja [Mineral quality control]*. Kiev: Tehnika [in Russian].

Albert Azaryan, Prof., DSc., **Annait Trachuk,** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrey Gritsenko,** Researcher, **Dmitriy Shvets,** Teacher Assistant.
Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

Development of Measurement Channel for Operational Control of the Content of the Magnetic Iron in the Blast Holes

The article is devoted to the study of improving operational quality control of magnetite ores in explosive wells of magnetic logging. Magnetic logging allows for a detailed study of the structure of the well section by placing a geophysical probe into it. This procedure allows you to determine the content of the useful component in the rock massifs. However, in the conditions of open mining, the measurement of iron content in rock massifs, taking into account disturbing factors affecting the accuracy of control, is a rather complicated task.

The work describes the studies conducted for the development of the measuring channel. In the course of the research, a device was designed to control the content of magnetic iron in exploration wells of magnetic logging. The optimal dimensions of the inductive sensor were determined, the voltage-to-current converter circuits and the supply voltage converter with increased efficiency were determined. The developed device was tested in laboratory conditions.

In this work, the main functional units were investigated and the schematic diagram of the measuring channel has developed. For an inductive sensor, optimal dimensions are determined while maintaining high sensitivity to the magnetite content in the ore. The voltage-current converters and the power supply voltage converter with increased efficiency were investigated and selected. It has developed the design, manufactured and tested in laboratory conditions experimental samples of measuring channels for controlling the content of magnetite in exploration wells of magnetic logging of large diameter wells.

logging, magnetite, measuring channel, blast hole

Одержано (Received) 23.05.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 28.05.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

ІННОВАЦІЙНІ ТА ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.9.048.4 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).146-154

В.І. Носуленко, проф., д-р техн. наук, **В.М. Шмельов,** доц., канд. техн. наук,
А.А. Пащенко, асп.
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: shmelyovvm@gmail.com

Розмірна обробка електричною дугою як наступний етап розвитку електророзрядної обробки

Описано етапи розвитку електророзрядної обробки, що дозволяє зробити висновок, що розмірна обробка електричною дугою має природний зв'язок з відомими способами електророзрядної обробки, заснованими на використанні нестаціонарного дугового розряду, а її поява підготовлена попереднім розвитком електророзрядної обробки, є природним розвитком останньої, і, отже, розмірна обробка електричною дугою може розглядатись як спосіб електророзрядної обробки. Зрозуміло, що розмірна обробка електричною дугою не може вирішити всіх проблем електророзрядної обробки, в зв'язку з чим не тільки не виключає, але й передбачає широке застосування відомих способів електророзрядної обробки – електроіскрового, електроімпульсного та електроконтактного, кожен з яких відрізняється своїми особливостями, має свою область промислового застосування і безперервно вдосконалюється, доповнюючи один одного. Тому можна зазначити, що з появою розмірної обробки електричною дугою технологічні можливості електророзрядної обробки в цілому значно зросли, зросла її економічна ефективність та конкурентоспроможність з іншими способами металообробки і, перш за все, з обробкою металів різанням.

електрична дуга, електроіскрова обробка, електроімпульсна обробка, електроконтактна обробка, електророзрядна обробка, розмірна обробка електричною дугою

В.И. Носуленко, проф., д-р техн. наук, **В.Н. Шмелев,** доц., канд. техн. наук, **А.А. Пащенко,** асп.
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Размерная обработка электрической дугой как следующий этап развития электроразрядной обработки

Описаны этапы развития электроразрядной обработки, это позволяет сделать вывод о том, что размерная обработка электрической дугой имеет естественную связь с известными способами электроразрядной обработки основанными на использовании нестационарного дуговой разряда, а ее появление подготовлена предшествующим развитием электроразрядной обработки является естественным развитием последней, как следствие, размерная обработка электрической дугой может рассматриваться как способ электроразрядной обработки. Понятно, что размерная обработка электрической дугой не может решить всех проблем электроразрядной обработки, в связи с чем не только не исключает, но и предполагает широкое применение известных способов электроразрядной обработки - электроискрового, электроимпульсной и электроконтактной, каждый из которых отличается своими особенностями, имеет своей области промышленного применения и непрерывно совершенствуется, дополняя друг друга. Поэтому можно отметить, что с появлением размерной обработки электрической дугой технологические возможности электроразрядной обработки в целом значительно выросли, возросла ее экономическая эффективность и конкурентоспособность с другими способами металлообработки и, прежде всего, с обработкой металлов резанием.

электрическая дуга, электроискровой обработки, электроимпульсная обработка, электроконтактная обработка, электроразрядными обработка, размерная обработка электрической дугой

© В.І. Носуленко, В.М. Шмельов, А.А. Пащенко, 2019

Постановка проблеми. Згідно існуючих уявлень та прийнятої, інколи випадково, термінології при опису процесів електророзрядної обробки (ЕРО) в залежності від виду електричних розрядів, параметрів імпульсів струму, напруги та інших умов розрізняють електроіскрову обробку, високочастотну обробку, електроімпульсну обробку, електроконтактну обробку, обробку короткою дугою, обробку квазістаціонарною дугою постійного струму, розмірну обробку електричною дугою (РОД), плазмову обробку та інші, кожна з яких відрізняється вихідними технологічними характеристиками, обладнанням та має свою область промислового застосування.

Основою будь-якого знання є пізнання сутності об'єкту. В цьому, власне, полягає основна задача науки. Логіка розвитку пізнання приводить до необхідності чітко відрізняти те, що складає суть об'єкта, від того, якою вона здається, якою ми її бачимо. Суть є вузловим пунктом внутрішнього зв'язку основних моментів, сторін об'єкта, а осягнути суть об'єкта – це зрозуміти причини і умови його виникнення, його визначальні властивості, закони його життя, характерні для нього протиріччя, тенденції розвитку.

В цьому зв'язку покажемо, що РОД має природний зв'язок і однакову фізичну природу з відомими способами ЕРО, а несхожість способів ЕРО, їх відміни, які спостерігаються, це лише різні форми виявлення однієї й тієї ж фізичної суті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На погляд Л. Леба [1], "надзвичайно високі концентрації енергії в катодній плямі і прилеглій до неї контрагованій плазмі роблять взагалі проблематичним для поверхні плями застосування таких понять, як робота виходу електронів, теплопровідність, температура, теплота випаровування, тиск і т. і." І. Г. Кесаєв стверджує: "Складання балансу енергії для катода при сучасному рівні знань пов'язано зі значною невизначеністю при виборі величин, що входять до нього, внаслідок чого цей метод вирішення задачі є заздалегідь хибним" [2]. Треба відразу ж зазначити, що "при вивчені електричних дуг явищам біля анода приділялось значно менше уваги, ніж явищам біля катода" [3], в зв'язку з чим складання балансу енергії для анода тим більш ускладнене.

Що ж до порівняльних характеристик джерел тепла на катоді і аноді, то для звичайних дуг типа зварювальних "анодна область, на погляд більшості дослідників, має більшу довжину (висоту) та об'єм, ніж катодна. Тому концентрація енергії в цій області звичайно менша, ніж на катоді, а кумулятивні процеси при її руйнуванні повинні в більшості випадків протікати більш мляво [4]". Відомо також, що "анодна пляма має більшу тенденцію залишатись нерухомою, ніж катодна пляма" [5]. Крім того, якість джерел тепла на катоді і аноді значною мірою визначається теплофізичними константами матеріалу окремо на катоді і окремо на аноді. Так, наприклад, виявляється, що, на відміну від сталевих, тугоплавкі катоди, наприклад з вольфраму, руйнуються значно менш інтенсивно, ніж аноди. І, нарешті, Р. Еккер зазначає [6] "...приелектродні області відлякують експериментаторів та теоретиків великою різноманітністю форм існування... Нестачі в кількості робіт нема, недостає тільки ясності та об'єктивності."

Постановка завдання. Очевидно, що пізнання суті РОД – це, перш за все, пізнання фізичної суті, фізичної природи "інструмента" обробки, яким є стаціонарна електрична дуга в умовах РОД. Пізнання ж загального і відмін у різних способах, різновидах ЕРО – це перш за все пізнання загального і відмін електричних розрядів, які при цьому застосовуються. Покажемо, що всі різновиди ЕРО засновані на використанні електричних розрядів єдиної фізичної природи – того, що називають електричним

дуговим розрядом. Саме це є суть “інструмента” обробки в умовах ЕРО. Саме це є те спільне, що об’єднує і робить схожими всі відомі способи ЕРО. Несхожість, відміни електричних розрядів в умовах різноманітних способів ЕРО – це лише різні форми виявлення однієї і тієї ж фізичної суті – електричного дугового розряду.

Надалі на основі експериментальних даних, покажемо, що, дійсно, всі різновиди електророзрядної обробки засновані на використанні електричних дугових розрядів, які реалізуються в різноманітних умовах взаємодії з зовнішнім середовищем і відрізняються тим, що неодмінно забезпечують енергетичні характеристики, достатні для локального руйнування металу за рахунок його плавлення і випаровування.

Виклад основного матеріалу. Сучасний науковий світогляд твердо спирається на принцип руху, зміни, розвитку як загальний фундаментальний принцип буття і пізнання. Для того, щоб правильно зрозуміти будь-яке явище, треба розглядати його в зв’язку з іншими явищами, знати його походження і витоки та подальший розвиток. В цьому зв’язку простежимо за розвитком ЕРО. Покажемо, що РОД має природний зв’язок з відомими способами ЕРО, а її поява підготовлена попереднім розвитком теорії і практики ЕРО і, в кінцевому підсумку, РОД може розглядатись як наступний етап розвитку ЕРО (рис. 1). ЕРО, як зазначалось, заснована на використанні перетвореної в тепло енергії електричних дугових розрядів різної тривалості, що горять поміж ЕІ та ЕЗ. Історично склалось так, що практичне застосування для обробки металів раніше інших отримав стаціонарний електричний дуговий розряд – так звана електрична вольтова дуга. 1886 року в Росії Бенардосу М.М. була видана “Привілея” за № 194 на “Спосіб з′єднання і роз′єднання металів безпосередньою дією електричного струму”. На цей винахід Бенардос отримав патенти в Росії, Франції, Бельгії, Великобританії, Італії, Німеччині, Швеції, Норвегії, Данії, Швейцарії і Австро-Угорщині.

Рік	1886	1925	1943	1948	1968
Автор	Бенардос Н. Н.	Грумпельт О.	Лазаренко Б. Р.	Писаревський М.М.	Носуленко В. І.
Документ	Привілея Росії № 194	Патент СССР № 2776	СССР А. с. № 70010	СССР А. с. № 80718	СССР А. с. № 368975
Різновиди способів	Обробка електричною дугою	Електроконтактна обробка	Електроіскрова обробка	Електроімпульсна обробка	**РОД**
Опис	Спосіб...роз’єднання металів дією електричного струму ... заснований на утворенні вольтової дуги між місцем обробки металу, що становить один електрод, і другим електродом (вуглем). Цим способом можуть бути виконані такі роботи : ... роз’єднання і розрізання металів на частини, свердлування або виготовлення отворів і порожнин... Вугілля або речовина, що замінює вугілля може мати різні форми.	...метал піддається дії перерваної дуги, яку отримують за допомогою зубчатого диска, що має периферійну швидкість близько 120 м/с	...засновано на використанні іскрового розряду тривалістю до кідьких мікросекунд, що відбувається в рідкому середовищі	... засновано на використанні імпульсних дугових розрядів великої тривалості (до 10^{-3} с)	... обробку здійснюють в потоці рідини стаціонарним електричним дуговим розрядом
Вид розряду	Стаціонарний дуговий	Імпульсний	Іскровий	Імпульсний	Стаціонарний дуговий
Характеристика розряду	Стаціонарний дуговий	Нестаціонарний дуговий			Стаціонарний дуговий
Етапи розвитку	Теза	Антитеза			Синтез

Рисунок 1 – Етапи розвитку ЕРО

Джерело: розроблено автором на основі [7]

В опису до цієї “Привілеї” суть винаходу викладена так: “Предмет винаходу являє *спосіб* (тут і надалі виділено нами - В. Н.) з’єднання і *роз’єднання металів дією електричного струму*, який названо “електрогефест” і *заснований на безпосередньому*

утворенні вольтової дуги між місцем обробки металу, що становить один електрод, і підведеної до цього місця рукоятки з другим електродом, з'єднаний з відповідним полюсом електричного струму. *Цим способом можуть бути виконані такі роботи*: з'єднання частин поміж собою, *роз'єднання і розрізання металів на частини, свердлування або виготовлення отворів і порожнин* та наплавлення шарами. Вольтова дуга утворюється в місці, де повинна бути виконана одна з вищезгаданих робіт, наближенням вугілля (або іншої струмопровідної речовини) до частини, що обробляється, причому це вугілля буде позитивним або негативним полюсом, а другим полюсом буде оброблювана частина. *Вугілля або речовина, що замінює вугілля, може мати різні форми."*

Таким чином виникнення ЕРО треба віднести до тих часів, коли електрична дуга знайшла застосування для плавлення і грубої обробки металевих заготовок, оскільки саме до цього періоду, як зазначено в "Привілеї", треба віднести перші спроби використати електричну дугу для "свердлування або виготовлення отворів і порожнин". Як бачимо вихідним пунктом, початковим етапом розвитку ЕРО є використання для обробки металу звичайної електричної дуги, яка являла собою стаціонарний електричний дуговий розряд. Прослідкуємо за розвитком ЕРО, починаючи саме з цього моменту.

Найбільш повним, всебічним і глибоким ученням про розвиток є діалектика – наука про загальні закони руху і розвитку природи, людського суспільства і мислення. Закони діалектики діють всюди, вони охоплюють всі сторони дійсності. Вони суть, закони природи, суспільства і мислення. Тому вони мають загальне пізнавальне методологічне значення, і отже, діалектика - це метод не однієї якої-небудь області знання, а загальний метод пізнавальної діяльності людей.

Як відомо, на питання, що є джерелом руху, розвитку, чому відбувається розвиток, відповідає один із основних законів діалектики – закон єдності і боротьби протилежностей. Згідно цього закону, всім речам, явищам, процесам властиві внутрішні протиріччя, протилежні сторони і тенденції, які знаходяться в стані взаємозаперечення; боротьба протилежностей дає внутрішній імпульс до розвитку, веде до нарощування протиріч, які розв'язуються на відповідному етапі зникненням старого і появою нового.

З появою ЕРО виникли і почали розвиватись протиріччя, властиві даному процесу обробки і такі, що складали рушійну силу його розвитку. Ці протиріччя полягали в тому, що з однієї сторони, застосування електричної дуги для обробки металів відкривало великі технологічні можливості, дозволяло, наприклад, обробляти метали з будь-якими механічними властивостями, не вимагало використання інструменту більш твердого, ніж оброблюваний метал і т. і. Проте з іншої сторони, як кількісна, так і особливо якісна сторони процесу обробки не змогли задовольнити потреб практики. Дійсно, застосування на початку розвитку ЕРО звичайної електричної дуги не змогло вирішити задачу розмірної обробки металу, оскільки звичайна електрична дуга не забезпечила достатньо високих для локального руйнування металу енергетичних характеристик розряду. Отже, для того щоб отримати відповідне практичне застосування, ЕРО повинна була мати подальший розвиток.

На питання про те, в якому напрямку іде розвиток, відповідає один із основних законів діалектики – закон заперечень заперечень. Дія цього закону обумовлює зв'язок, спадкоємність між тим, що заперечується і тим, що заперечує, внаслідок чого діалектичне заперечення виступає не як голе заперечення, що відкидає попередній розвиток, а як умова розвитку, що утримує та зберігає в собі весь позитивний зміст попередніх стадій розвитку, повторюючого на вищій основі деякі риси вихідних

сходинок і такого, що має в цілому поступальний, зростаючий характер. Часто процес заперечень зображують в термінах: “теза” (вихідний пункт розвитку), “антитеза” (перше заперечення) та “синтез” (друге заперечення), розглядаючи суть розвитку в цій трійці. Поступальність розвитку, проте, не можна розуміти спрощено, вона реалізується в боротьбі різних тенденцій, пробиває собі дорогу лише в підсумку, в масі перехресних ліній розвитку. Окремі лінії загального розвитку можуть бути спрямовані не вперед, а назад, виражати моменти регресу, руху назад. Кожний прогрес в органічному розвитку є разом з тим і регресом, оскільки закріплює односторонній розвиток і виключає можливість розвитку в багатьох інших напрямках.

Розвиток ЕРО, як відомо, пішов в напрямку зміни виду електричного розряду, а саме: на зміну стаціонарному дуговому розряду (звичайній електричній дузі) прийшов нестаціонарний імпульсний дуговий розряд. Такий розряд вже забезпечував достатньо високі для локального руйнування металу енергетичні характеристики і був використаний для розмірної обробки металів. Так з’явилась електроконтактна обробка. Перші відомості практичного використання електроконтактної обробки відносяться до 1925р. (Пат. 2776 СССР. Способ и устройство для электрической резки металлов / О.Грумпельт) [7], коли Грумпельт О. запропонував електрофрикційний спосіб розрізання металу при напрузі 5…20В перерваними дугами, що створювались зубчастим диском, який обертався з окружною швидкістю до 120м/с .

Таким чином вихідний пункт розвитку ЕРО (теза) відповідає використанню для обробки металів стаціонарного електричного дугового розряду, а перше заперечення (антитеза) відповідає використанню для обробки металів нестаціонарного дугового розряду.

Якісно новим етапом розвитку ЕРО стала електроіскрова обробка, що була запропонована Б. Р. Лазаренко і Н. І. Лазаренко 1943 року (А.с. 70010 СССР. Способ обработки металлов, сплавов и иных токопроводящих материалов / Б. Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко) [7] і яка відрізняється використанням так званих іскрових розрядів (електричних дугових розрядів малої тривалості). Така обробка забезпечила якісну сторону процесу обробки і першою з електророзрядних способів обробки отримала достатньо широке практичне застосування.

Електроіскрова обробка, як і електроконтактна, заснована на використанні нестаціонарних дугових розрядів, але це якісно інші розряди – їх тривалість значно менша, а енергетичні характеристики значно вищі, в зв’язку з чим, власне, і виявляється можливим забезпечити якісну сторону процесу обробки. Перед нами, таким чином, приклад прояву одного із основних законів діалектики – закону переходу кількісних змін (тривалості розряду) в якісні (енергетичні характеристики розряду), який, як відомо, відповідає на питання, як відбувається розвиток. Цей закон являє собою такий взаємозв’язок і таку взаємодію кількісних і якісних сторін явища, процесу, внаслідок яких дрібні, спочатку непомітні кількісні зміни, поступово накопичуючись, рано чи пізно порушують міру явища, процесу і викликають докорінні зміни, які спостерігаються у вигляді стрибків і здійснюються залежно від природи об’єктів і умов їх розвитку в різноманітних формах. Цей закон орієнтує на те, щоб розглядати і вивчати явища як єдність якісної і кількісної сторін, бачити складні взаємозв’язки і взаємодію цих сторін, зміну співвідношень поміж ними. Кількісні зміни відбуваються безперервно і поступово. Стадія безперервного кількісного розвитку не змінює якості, проте створює для цього передумови. Якісні зміни відбуваються у вигляді розриву безперервності, поступовості, іншими словами, будь-яка якісна зміна відбувається у вигляді стрибка. Завершуючи будь-який процес, стрибок означає момент якісної зміни

явища, перелом, критичну стадію розвитку. Отже, розвиток, будучи єдністю кількісних і якісних змін, є разом з тим і єдністю безперервності і перервності.

Оскільки електроіскрова обробка в зв'язку з рядом недоліків (низька продуктивність, великий знос ЕІ, висока енергоємність процесу) не змогла повністю задовольнити потреби практики, ЕРО отримує подальший розвиток. І вже 1948 р. Писаревський М. М. пропонує дугоімпульсний спосіб обробки (А.с. 80718 СССР. Способ обработки металлов и сплавов / Писаревский М. М) [7], заснований на використанні імпульсних дугових розрядів досить великої тривалості. Так з'являється електроімпульсна обробка, яка в результаті робіт ряду учених і винахідників на цей час досягла найвищої досконалості серед відомих електророзрядних способів обробки. Порівняно з електроіскровою обробкою електроімпульсна обробка забезпечила значно більш високу продуктивність, меншу енергоємність процесу, незначний знос ЕІ.

Проте, не зважаючи на те, що ЕРО, яка представлена електроіскровою, електроімпульсною і швидкопрогресуючою електроконтактною обробкою, досягла високої досконалості, вона все ще має ряд суттєвих недоліків, не завжди може задовольнити потреби практики, недостатньо конкурентоспроможна не лише з обробкою різанням, але і з електрохімічною обробкою, перш за все за продуктивністю. Тому є потреба в подальшому розвитку ЕРО.

Якщо підвести деякі підсумки, можна зазначити, що викликані потребами практики способи електроіскрової, електроімпульсної і електроконтактної обробки, які засновані на використанні нестаціонарних дугових розрядів різної тривалості, отримали відповідний розвиток і достатньо широке застосування і являють собою перше заперечення (антитезу) вихідного пункту розвитку ЕРО – обробки стаціонарним електричним дуговим розрядом (тези).

Проте, як відомо, одним актом заперечення розвиток явища, процесу не вичерпується. Дійсно, як би не зберігались в першому запереченні якісь елементи позитивного, притаманні тому, що підлягало запереченню, воно, тобто перше заперечення, є його протилежністю. Стосунки вихідної форми і першого заперечення – це стосунки протилежностей, двох протилежних форм. Вони містять в собі абстрактну однобічність, яка повинна бути подолана, щоб з'явилась можливість подальшого розвитку.

В цьому випадку заперечення і виступає в якості синтезу всього попереднього розвитку, синтезу цих однобічно протилежних форм, що долає і розв'язує протиріччя поміж ними. Оскільки підлягає запереченню те, що заперечувало вихідну форму, то зрозуміло, що таке подвійне заперечення веде до відновлення деяких сторін, рис цієї вихідної форми.

Таким чином, якщо виходити з викладеного, можна зробити висновок, що подальший розвиток ЕРО повинен йти в напрямку використання стаціонарного електричного дугового розряду. Дійсно, згідно закону заперечень вдосконалення і розвиток ЕРО, заснованої на використанні нестаціонарних електричних дугових розрядів різної тривалості, об'єктивно повинно містити в собі своє заперечення, тобто тенденцію до стаціонарного електричного дугового розряду. Якщо проаналізувати розвиток ЕРО можна побачити, що тенденція до використання стаціонарного електричного дугового розряду намітилась вже давно, ще з появою електроімпульсної обробки, яка порівняно з електроіскровою обробкою реалізує електричні дугові розряди більшої тривалості [8]. Найбільш помітно ця тенденція проглядається в розвитку електроконтактної обробки, яка на сьогодні досягла досить високого рівня і при реалізації якої використовуються нестаціонарні електричні дугові розряди

найбільшої тривалості аж до стаціонарного [9].

В кінцевому підсумку тенденція розвитку ЕРО до використання стаціонарного електричного дугового розряду повинна привести до якісного стрибка, тобто до використання стаціонарного електричного дугового розряду що, на нашу думку, об'єктивно проявляється в способі РОД.

РОД являє собою ніби повернення до вихідного пункту розвитку ЕРО, коли використовувалась звичайна стаціонарна електрична дуга, бо і те, й інше в своїй основі передбачає використання стаціонарного електричного дугового розряду. Проте це повернення не є простим повторенням, воно являє собою якісно зовсім інше, виступаючи в якості синтезу всього попереднього розвитку ЕРО, а саме: від першого етапу розвитку (тези) залишилась форма розряду (стаціонарний електричний дуговий розряд), як така, що має перевагу перед нестаціонарним розрядом з точки зору простоти отримання і забезпечення кількісної сторони процесу обробки (високої продуктивності); від другого етапу розвитку (антитеза) – залишались достатньо високі для локального руйнування металу енергетичні характеристики розряду, в зв'язку з чим є можливим забезпечити якісну сторону процесу обробки [10].

Висновки: Таким чином, якщо підвести підсумки, можна зробити висновок, що РОД має природний зв'язок з відомими способами ЕРО, заснованими на використанні нестаціонарного дугового розряду, а її поява підготовлена попереднім розвитком ЕРО, є природним розвитком останньої, і, отже, РОД може розглядатись як спосіб ЕРО. Зрозуміло, що РОД не може вирішити всіх проблем ЕРО, в зв'язку з чим не тільки не виключає, але й передбачає широке застосування відомих способів ЕРО – електроіскрового, електроімпульсного та електроконтактного, кожен з яких відрізняється своїми особливостями, має свою область промислового застосування і безперервно вдосконалюється, доповнюючи один одного. Тому можна зазначити, що з появою РОД технологічні можливості ЕРО в цілому значно зросли, зросла її економічна ефективність та конкурентоспроможність з іншими способами металообробки і, перш за все, з обробкою металів різанням.

Список літератури

1. Киселев М.Г. Мрочек Ж.А., Дроздов А.В. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: учебное пособие. Москва: НИЦ ИНФРА-М, Нов. знание, 2014. 389 с.
2. Носуленко В. І., Шмельов В.М. Особливості електричної дуги в поперечному потоці рідини. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2017. Вип 30. С.103-110.
3. Серебреницкий П. П. Современные электроэрозионные технологии и оборудование: учебное пособие для вузов по направлению "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств". Изд.2-е, перераб. и доп. Санкт-Петербург: Лань, 2013 . 352 с.
4. Абляз Т.Р., Ханов А.М., Хурматуллин О.Г. Современные подходы к технологии электроэрозионной обработки материалов: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. 120 с.
5. Носуленко В.И., Шмельев В.Н. О качестве источников тепла на электродах в условиях процесса размерной обработки электрической дугой. *Научно-теоретический и практический журнал "Оралдын гылым жаршысы". Серия "Технические науки. Физика. Современные информационные технологии"*. 2014. № 8 (87). С. 61-68.
6. Носуленко В. І.,. Шмельов В.М Якісні характеристики джерел тепла на сталевих електродах. *Збірник наукових праць кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* 2018. Вип 31. С.80-90.
7. Ставицкий Б.И. Из истории электроискровой обработки материалов. Харьков: ЧФ «ЦентрИнформ», 2013. 133 с.

8. Носенко В. А., Даниленко М.В. Физико-химические методы обработки материалов: учебное пособие. Изд. 2-е, перераб. и доп. Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2019. 196 с.
9. Технология конструкционных материалов: учебник для вузов / Под ред. Ю.М. Барона. Санкт-Петербург: Питер, 2015. 512с. ил..
10. Носуленко В. І., Шмельов В.М. Розмірна обробка металів електричною дугою: навчальний посібник. Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2017. 256 с.

References

1. Kiselev, M.G. Mrochek, Zh.A., & Drozdov, A.V. (2014). *Elektrofizicheskaya i elektrohimicheskaya obrabotka materialov –[Electrophysical and electrochemical processing of materials]*. Moskow: NITs INFRA-Moskow: Nov. znanie [in Russian].
2. Nosulenko, V. I., & Shmelov, V.M. (2017). Osoblyvosti elektrychnoi duhy v poperechnomu pototsi ridyny [Featuresofan electric arc ina cross flowof fluid]. *Zbirnyk naukovykh prats kirovohradskoho 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. 30*, 153-156 [in Ukrainian].
3. Serebrenitskiy, P. P. (2013) *Sovremennyie elektroerozionnyie tehnologii i oborudovanie [Modern electroerosion technologies and equipment]*. Sankt-Peterburg: Lan [in Russian].
4. Abliaz, T.R., Khanov, A.M., & Khurmatullin, O.G. (2012). *Sovremennye podkhody k tekhnologii elektroerozionnoi obrabotki materialov [Modern approaches to technology of electroerosive processing of materials]*. Perm': Izdatel'stvo Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta [in Russian].
5. Nosulenko, V.I. & Shmelev, V.N. (2014). O kachestve istochnikov tepla na elektrodakh v usloviyakh protsessa razmernoy obrabotki elektricheskoy dugoy [On the quality of heat sources at the electrodes under the conditions of dimensional processing the electric arc]. *Nauchno-teoreticheskiy i prakticheskiy zhurnal "Oraldyn gylym zharshysy". Seriya "Tekhnicheskie nauki. Fizika. Sovremennye informatsionnye tekhnologii". "Oral kalasi" – Scientific-theoretical and practical journal "Scientific-research organization". A series of "Technical Sciences. Physics and Modern Information Technologies"* , *vol. 8, (87),* 61-68 [in Russian].
6. Nosulenko, V. I., & Shmelov, V.M. (2018). Yakisni kharakterystyky dzherel tepla na stalevykh elektrodakh [Qualitative characteristics of heat sources on steel electrodes]. *Zbirnyk naukovykh prats kirovohradskoho 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. 31*, 80-90 [in Ukrainian].
7. Stavitskiy, B.I. (2013). *Iz istorii elektroiskrovoy obrabotki materialov [From the history of electrospark material processing]*. Harkov: ChF «TsentrInform» [in Russian].
8. Nosenko, V. A., & Danilenko, M.V. (2019). *Fiziko-himicheskie metodyi obrabotki materialov [Physico-chemical methods of processing materials]*. Staryiy Oskol: OOO «Tonkie naukoemkie tehnologii» [in Russian].
9. Baron, Yu.M. (Eds.). (2015). *Tehnologiya konstruktsionnyih materialov [Technology of construction materials]*. Sankt-Peterburg: Piter [in Russian].
10. Nosulenko, V.I. & Shmelev, V.N. (2017). *RozmIrna obrobka metalIv elektrichnoyu dugoyu [Dimensional processing of metals by an electric arc]*. Kropyvnytskyi: PP «Eksklyuziv-Sistem» [in Ukrainian].

Victor Nosulenko, Prof., DSc., **Vitaliy Shmelyov,** Assoc. Prof., Phd tech. sci., **Andrey Paschenko,** post-graduate
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Dimensional Electric Arc Processing as the Next Stage of Development of Electric Discharge Processing

According to existing concepts and accepted, sometimes by accident, terminology in the description of the electrodischarge processes, depending on the type of electrical discharges, current pulse parameters, voltage and other conditions, distinguish electrospark processing, high frequency processing, electroimpulse processing, electrocontact processing, short arc processing, quasi-stationary arc machining direct current, electric arc size processing, plasma processing, etc., each of which has different output characteristics, equipment and has area its industrial applications.

The basis of any knowledge is the knowledge of the essence of the object. In this, in fact, is the main task of science. The logic of the development of knowledge leads to the need to clearly distinguish what constitutes the essence of the object, from what it seems, as we see it. Essence is a nodal point of internal communication of the main moments, sides of the object, and comprehend the essence of the object, it is to understand the causes and conditions of its occurrence, its determining properties, the laws of his life, characteristic of his contradictions, trends of development.

In this connection, it has been shown that dimensional electric arc machining has a natural connection and the same physical nature with known methods of electrodischarge processing, and the dissimilarity of the methods of electrodischarge processing, their removal, which are observed, are only different forms of detection of the same physical essence.

The stages of the development of electrodischarge processing are described, which allows us to conclude that the dimensional machining of an electric arc has a natural connection with known methods of electrodischarge processing, based on the use of a non-stationary arc discharge, and its appearance is prepared by the previous development of electrodischarge processing, is the natural development of the latter, and, consequently, dimensional electric arc processing can be considered as a method of electrodischarge processing. It is clear that the size of the electric arc can not solve all the problems of electrodischarge processing, therefore, not only does it exclude, but also envisages the widespread use of known methods of electrodischarge processing - electroscope, electromotive pulse and electrocontact, each of which has its own characteristics, has its area of industrial application and is continuously improved, complementing each other. Therefore, it can be noted that with the advent of dimensional machining with an electric arc, the technological capabilities of electrodischarge processing in general have increased significantly, its economic efficiency and competitiveness has increased with other methods of metal working and, above all, with the processing of metals by cutting..

electric arc, electrospark processing, electroimpulse processing, electrocontact processing, electrodischarge processing, dimensional electric arc processing

Одержано (Received) 22.05.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 31.05.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

УДК 621.9.048.4 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).154-165

В. М. Боков, проф., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: Viktor.alia.kntu@gmail.com

Розмірна обробка тіл обертання електричною дугою з використанням дротового електрода-інструмента

Запропоновано та досліджено високопродуктивний спосіб розмірної обробки тіл обертання електричною дугою з використанням дротового електрода-інструмента, який дозволяє підвищити точність обробки.

електрична дуга, гідродинамічний режим, дротовий електрод-інструмент, технологічна схема формоутворення

В. М. Боков, проф., канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Размерная обработка тел вращения электрической дугой с использованием проволочного электродом-инструментом

Предложен и исследован высокопроизводительный способ размерной обработки тел вращения электрической дугой с использованием проволочного электрода-инструмента, который позволяет повысить точность обработки.

электрическая дуга, гидродинамический режим, проволочный электрод-инструмент, технологическая схема формообразования

© В. М. Боков, 2019

Постановка проблеми. В сучасному машинобудуванні для обробки тіл обертання із важкооброблюваних матеріалів [1] застосовуються електроерозійні методи, які забезпечують несилове (безконтактне) різання і дозволять обробляти будь-який електропровідний матеріал поза залежністю від його фізико-хімічних властивостей, зокрема твердості. Вибір методу обробки визначається, головним чином, двома факторами: продуктивністю та точністю обробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За роботою [2] відомий високопродуктивний спосіб електроконтактної обробки тіл обертання, при якому електричну дугу в міжелектродному зазорі збуджують з поливом рідини в зону обробки між електродом-заготовкою, яка обертається з відносно повільною швидкістю, і дисковим електродом-інструментом, окружна швидкість обертання якого досягає 30-50 м/с. Технологічні можливості способу електроконтактної обробки тіл обертання суттєво обмежені великим діаметром електрода-інструмента та кінематикою його обертання. При найкращих умовах електроконтактної обробки, об'ємний знос найбільш малозносного чавунного диску не зменшується нижче 3 – 10 %. Останнє суттєво знижує точність обробки.

В роботі [3] запропоновано спосіб розмірної обробки дугою (РОД) тіл обертання, в основу якого покладено ідею «токарної» обробки малогабаритним електродом-інструментом (переважно графітовим), що не обертається. Даний спосіб дозволяє розширити технологічні можливості обробки. Однак, в процесі обробки даним способом графітовий електрод-інструмент може торкатися шорсткої поверхні електрода-заготовки, що обертається, внаслідок чого його лінійний абразивний знос може складати 10 – 20 %. Завдяки наявності інтенсивного зносу електрода-інструмента, цей недолік не дозволяє реалізувати точну обробку.

Для компенсації електроерозійного зносу компанія AgieCharmilles [4] розробила спосіб електроіскрової обробки тіл обертання з використанням в якості електрода-інструмента дроту. Деталь обертають із швидкістю до 1500 хв$^{-1}$. Електричний іскровий розряд збуджують між дротом, який перемотується з однієї котушки на другу, та деталлю, що обробляється. Процес здійснюють із зануренням робочої зони у ванну з технічною водою. Спосіб забезпечує високу точність обробки та якість обробленої поверхні. Однак, внаслідок застосування нестаціонарної форми електричного розряду (наявності пауз: шпаруватість $q >> 1$) та обмеженості в підведенні до дроту підвищеної сили технологічного струму (за допустимою густиною), продуктивність даного способу дуже мала, що негативно впливає на область його використання.

Із викладеного вище витікає, що із усіх розглянутих способів обробки тіл обертання заслуговують на увагу лише два:

- високопродуктивний спосіб РОД, що використовує графітовий електрод-інструмент, але не забезпечує високу точність обробки у зв'язку з підвищеним абразивним зносом електрода-інструмента;
- високоточний спосіб електроіскрової обробки тіл обертання, що використовує дротовий електрод-інструмента, але не забезпечує високу продуктивність обробки.

В роботі пропонується об'єднали переваги даних способів. Результатом об'єднання є новий спосіб РОД тіл обертання з використанням дротового електрода-інструмента, який протягується в зоні обробки і таким чином «компенсує» його електроерозійний знос [5]. Даний спосіб, за думкою автора, дозволить реалізувати високопродуктивну і точну обробку тіл обертання, але не був об'єктом дослідження.

Постановка задачі. Метою дослідження є підвищення точності процесу РОД тіл обертання шляхом використання дротового електрода-інструмента.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі: запропонувати та обґрунтувати нову технологічну схему формоутворення поверхні тіла обертання електричною дугою з використанням дротового електрода-інструмента; розробити методику експериментального дослідження технологічних характеристик; виконати експериментальне дослідження продуктивності та точності даного процесу.

Методика дослідження включає в себе аналіз та порівняння елементів відомої технологічної схеми формоутворення поверхні тіла обертанням зі схемою, що пропонується. Крім того, методика передбачає побудову математичних моделей технологічних характеристик процесу РОД тіл обертання з використанням дротового електрода-інструмента (табл. 1).

Таблиця 1 - Матриця планування експерименту (план 2^{4-1})

Фактори				I, А	$P_{ст}$, МПа	D, мм	$n_ш$, $хв^{-1}$	M, мм^3/хв	M_a, мм^3/А·хв	a, $\frac{кВт·год}{кг}$	Ra, мкм
Основний рівень				100	0,8	15	35				
Інтервал варіювання				50	0,2	5	25				
Верхній рівень				150	1,0	20	60				
Нижній рівень				50	0,6	10	10				
Код				x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_3	y_4	y_6
Номер досліду	1	Порядок реалізації	6	+	+	+	+	290	1,93	32,89	30
	2		2	-	+	+	-	198	3,96	16,02	15
	3		4	+	-	+	-	336	2,24	29,76	40
	4		7	-	-	+	+	138	2,76	23,05	10
	5		1	+	+	-	-	321	2,14	29,73	42
	6		8	-	+	-	+	107	2,14	29,76	6,3
	7		3	+	-	-	+	321	2,14	29,73	42
	8		5	-	-	-	-	126	2,52	25,25	7,0
Досліди в центрі плану		1		0	0	0	0	240	2,40	26,54	24
		2		0	0	0	0	234	2,34	27,22	25
		3		0	0	0	0	219	2,19	29,08	25
		4		0	0	0	0	222	2,22	28,69	26

Джерело: розроблено автором

На підставі апріорної інформації були одібрані чотири фактори, які можуть впливати на процес РОД тіл обертання з використанням дротового електрода-інструмента: сила струму I (X_1), А; статичний тиск робочої рідини в форсунці перед виходом із неї $P_{ст}$ (X_2), МПа; діаметр електрода-заготовки D (X_3), мм; число обертів шпинделя $n_ш$ (X_4), хв.$^{-1}$.

Виклад основного матеріалу. В способі РОД тіл обертання з використанням дротового електрода-інструмента пропонується нова технологічна схема формоутворення (рис. 1, а). Електричну дугу збуджують в гідродинамічному потоці робочої рідини між електродом-заготовкою, що обертається, та дротовим електродом-інструментом, який протягують в зоні обробки по опуклий поверхні електродотримача в площині, що перпендикулярна осі обертання електрода-заготовки, а процес здійснюють при гарантованому зазорі між не обробленою поверхнею електрода-заготовки та електродом-інструментом, тобто без можливого контакту електрода-інструмента з електродом заготовкою та без застосування слідкуючої подачі електрода-інструмента.

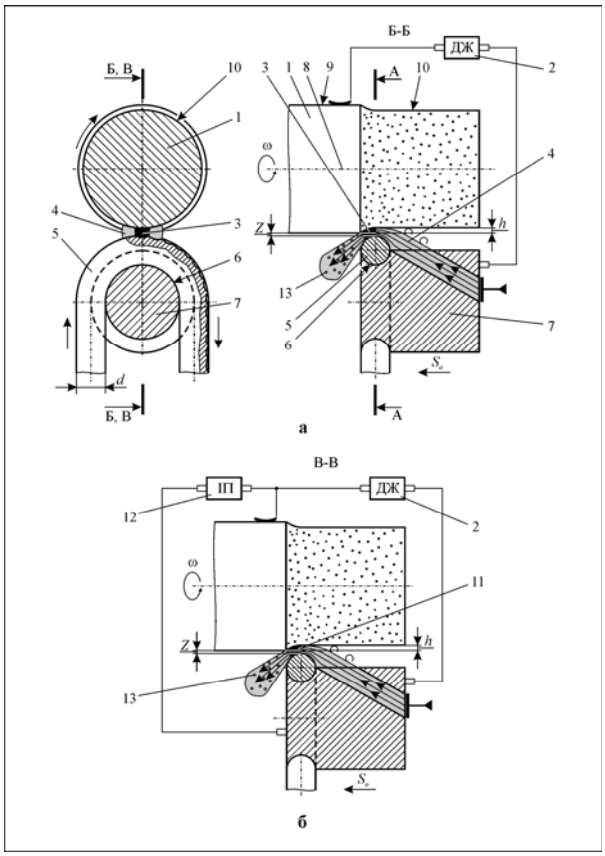


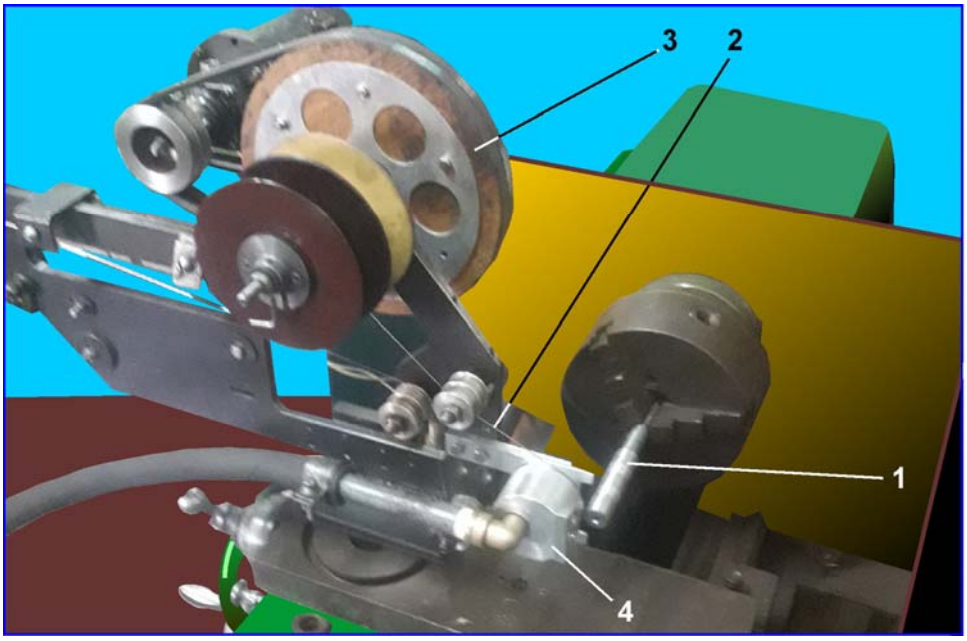
Рисунок 1 – Технологічна схема формоутворення поверхні тіла обертання, що пропонується
Джерело: розроблено автором

Електрод-заготовку 1 закріпляють в трьохкулачковому патроні та обертають. Від джерела живлення 2 постійного електричного струму електричну дугу 3 збуджують в гідродинамічному поперечному потоці робочої рідини 4 між електродом-заготовкою 1 та дротовим електродом-інструментом 5 діаметром *d*, який протягують в зоні обробки по опуклий поверхні 6 електродотримача 7 в площині, що перпендикулярна осі обер-тання 8 електрода-заготовки 1, а процес здійснюють при гарантованому зазорі *Z* між не обробленою поверхнею 9 електрода-заготовки 1 та електродом-інструментом 5, тобто без можливого контакту електрода-інструмента 5 з електродом-заготовкою 1. Така техноло-гічна схема формоутворення циліндричної поверхні 10 компенсує знос дротового електрода-інструмента 5 (кожна нова дуга горить на новому місці) та дозволяє здійснювати процес обробки без застосування слідкуючої подачі електрода-інструмента 5, тобто при постійній осьовій подачі S_o. Останнє, в свою чергу, забезпечує підвищення точності формоутворення циліндричної поверхні 10 та рівномірну шорсткість обробленої поверхні 10, зокрема деталей великого діаметра, що виготовлені із важкооброблюваних матеріалів.

При обробки важкооброблюваних матеріалів, які володіють великим електричним опором (наприклад, твердих сплавів на вольфрамовій основі), глибина лунки, що утворюється, а отже глибина шару *h*, що знімається за один прохід, дуже мала. Тому, щоб забезпечити гарантований зазор *Z* на рівні 0,01…0,03 мм та можливість усталеного збудження електричної дуги 11, її ініціюють високовольтним імпульсним підпалювачем 12 (рис. 1, б).

Використання способу, що пропонується, порівняно з відомим, дозволяє підвищити точність формоутворення поверхні тіла обертання з 14 до 8 квалітету.

Для дослідження технологічних характеристик процесу РОД тіл обертання з використанням дротового ЕІ використовувався модернізований універсальний токарний верстат моделі 16К20. Різцетримач з цього верстату демонтований, а на його місце встановлений експериментальний пристрій (рис. 2).



1 – ЕЗ; 2 – дротовий ЕІ; 3 – механізм перемотування дроту; 4 –інструментальна головка

Рисунок 2 – Експериментальний пристрій для РОД тіл обертання з використанням дротового ЕІ
Джерело: розроблено автором

Пристрій для точіння дугою (механізм перемотування дроту та інструментальна головка, рис. 3) включає в себе наступні основні елементи:

- електродотримач 1, в пазу якого протягується дротовий ЕІ. Дріт перемотується спеціальним механізмом з котушки на котушку, який приводиться в дію електродвигуном з редуктором;
- форсунку 2, яка разом з електродотримачем 1 утворює фігур-ну щілину для кумулятивного підведення робочої рідини у струмин-ному режимі у зону обробки;
- напрямляч 3, який забезпечує швидке заведення дроту в паз електродотримача 1;
- тримач 4 для закріплення інструментальній головки на станині механізму перемотування дроту.

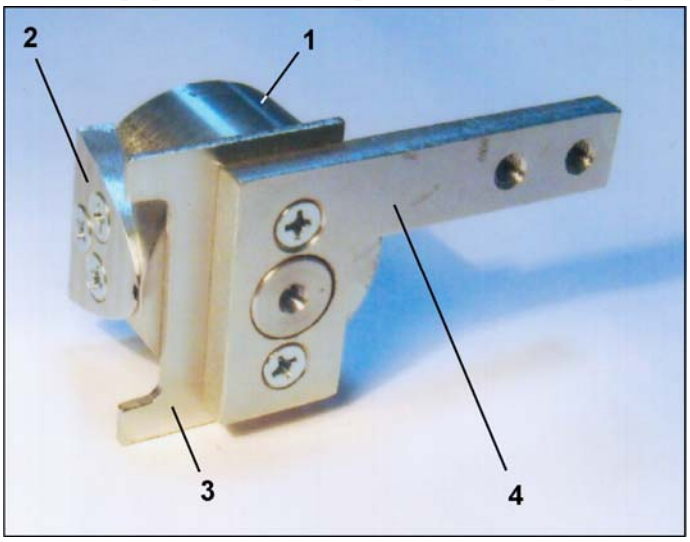


Рисунок 3 – Інструментальна головка пристрою для РОД тіл обертання з використанням дротового ЕІ
Джерело: розроблено автором

Пристрій працює таким чином. Заготовку, що обробляється, закріплюють в трикулачковому патроні токарного верстата. Інструментальну головку підводять до заготовки спочатку на відстань не менше 1 мм. Далі вмикають привод обертання заготовки, механізм протягування дроту та привод подачі робочої рідини. Резистор керування силою технологічного струму виставляють в положення, що відповідає

мінімальній силі струму. За допомогою ручної радіальної подачі повільно зближають ЕІ (дріт), що перемотується, з ЕЗ до появи першого розряду. Після того, виставляють певний режим обробки (I, $P_{ст}$, $n_ш$, s_o) та ведуть пошарову обробку тіла обертання. При цьому процес здійснюється електричною дугою, яка горить в міжелектродному проміжку в потужному поперечному потоці робочої рідини. Процес відбувається без використання слідкуючої системи. Завдяки перемотуванні дротового ЕІ точність обробки зростає.

Отримано рівняння регресії та математичні моделі технологічних характеристик, що визначають продуктивність, точність та якість процесу РОД тіл обертання електричною дугою з використанням дротового електрода-інструмента та дозволяють керувати ними та прогнозувати їх :

- продуктивність обробки M (y_1), мм^3/хв

$$y_1 = 229{,}62 + 87{,}37x_1 - 15{,}75x_4;$$
$$M = 76{,}97 + 1{,}75 \cdot I - 0{,}63 \cdot n_ш;$$

- питома продуктивність обробки M_a (y_2), мм^3/А·хв.

$$y_2 = 2{,}48 - 0{,}376x_1 + 0{,}244x_3 - 0{,}236x_4;$$
$$M_a = 9{,}598 - 0{,}00752 \cdot I + 0{,}0488 \cdot D - 0{,}00944 \cdot n_ш;$$

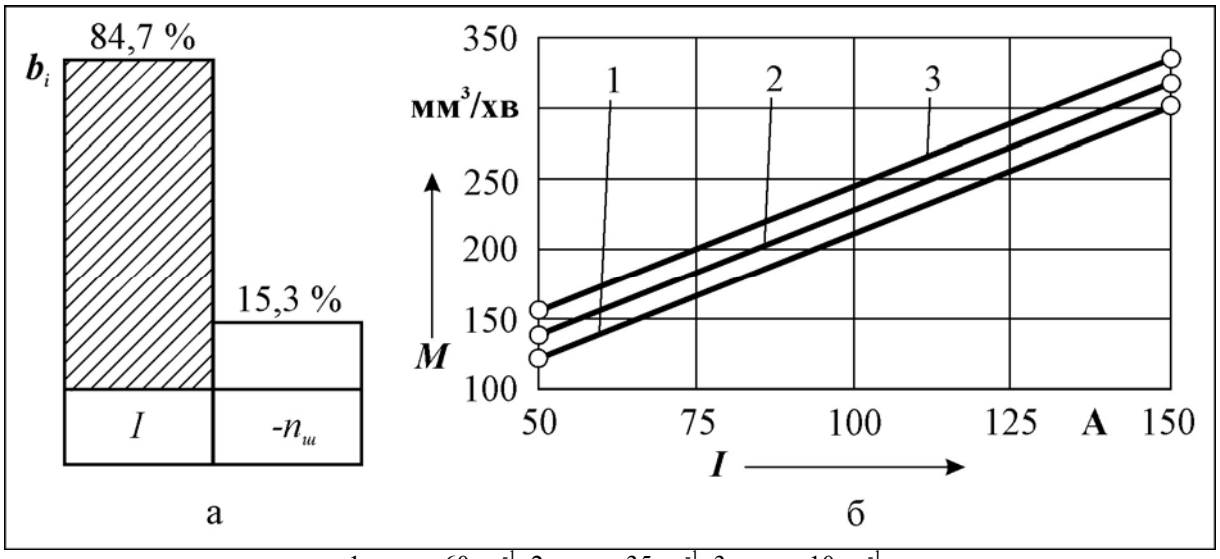
- питома витрата електроенергії a (y_3), кВт·год/кг

$$y_3 = 27{,}02 + 3{,}5x_1 + 2{,}70x_2 - 1{,}59x_3 + 1{,}83x_4;$$
$$a = 11{,}338 + 0{,}07 \cdot I + 13{,}5 \cdot P_{ст} - 0{,}312 \cdot D + 0{,}0732 \cdot n_ш;$$

- шорсткість поверхні після обробки Ra (y_5), мкм

$$y_4 = 24{,}04 + 14{,}46x_1 - 1{,}96x_4;$$
$$Ra = -2{,}14 + 0{,}289 \cdot I - 0{,}0784 \cdot n_ш.$$

Показано (рис. 4), що найбільший вплив на продуктивність обробки M виявляє сила технологічного струму I (84,7 %), із підвищенням якої продуктивність обробки збільшується. Останнє підтверджує теплову природу РОД. Таким чином, силу технологічного струму треба розглядати як основний керуючий фактор. Вплив числа обертів шпинделя $n_ш$ значно менший (15,3 %), але має суттєве значення. З його підвищенням продуктивність зменшується. В рамках експерименту продуктивність обробки тіл обертання електричною дугою з використанням дротового електрода-інструмента M змінювалася у межах від 107 до 336 мм^3/хв.

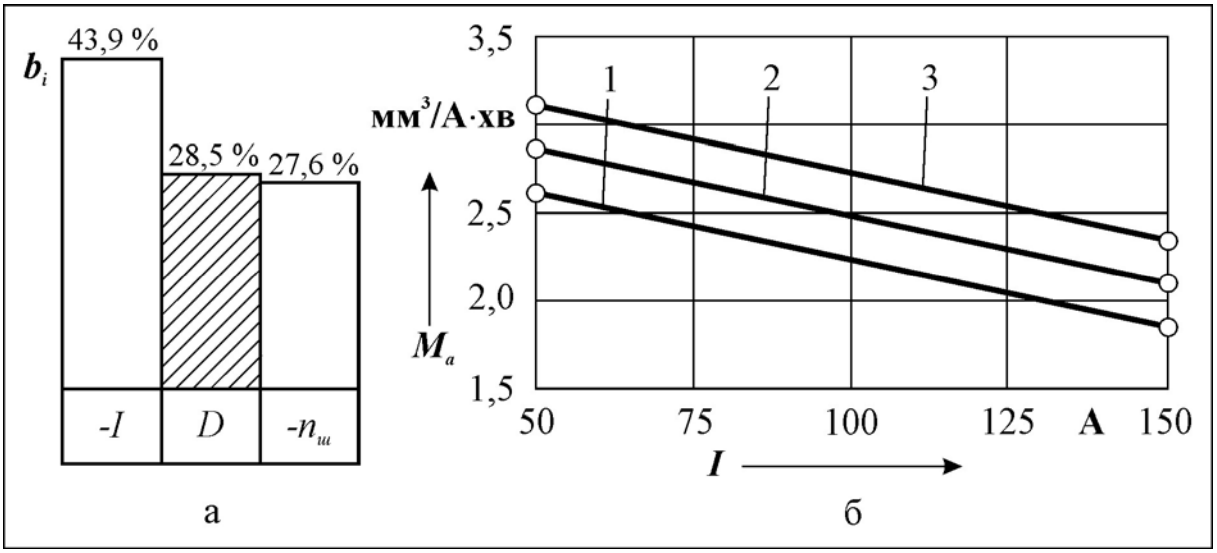


1 – $n_ш$ = 60 хв$^{-1}$; 2 – $n_ш$ = 35 хв$^{-1}$; 3 – $n_ш$ = 10 хв$^{-1}$

Рисунок 4 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність продуктивності обробки *M* від *I* та $n_ш$ (б)

Джерело: розроблено автором

Встановлено (рис. 5), що найбільш впливовим фактором на питому продуктивність обробки M_a, а отже головним керуючим, є сила технологічного струму (ступінь впливу 43,9 %). Із зменшенням сили струму M_a збільшується. Показано, що суттєво та приблизно однаково впливають на M_a такі фактори, як діаметр вихідної заготовки *D* (ступінь впливу 28,5 %) та число обертів шпинделя $n_ш$ (ступінь впливу 27,6 %), але із підвищенням діаметру заготовки *D* питома продуктивність обробки збільшується, а із підвищенням числа обертів шпинделя $n_ш$ – зменшується. В умовах експерименту питома продуктивність обробки тіл обертання електричною дугою з використанням дротового електрода-інструмента змінювалася у межах від 1,93 до 3,96 мм^3/А·хв.

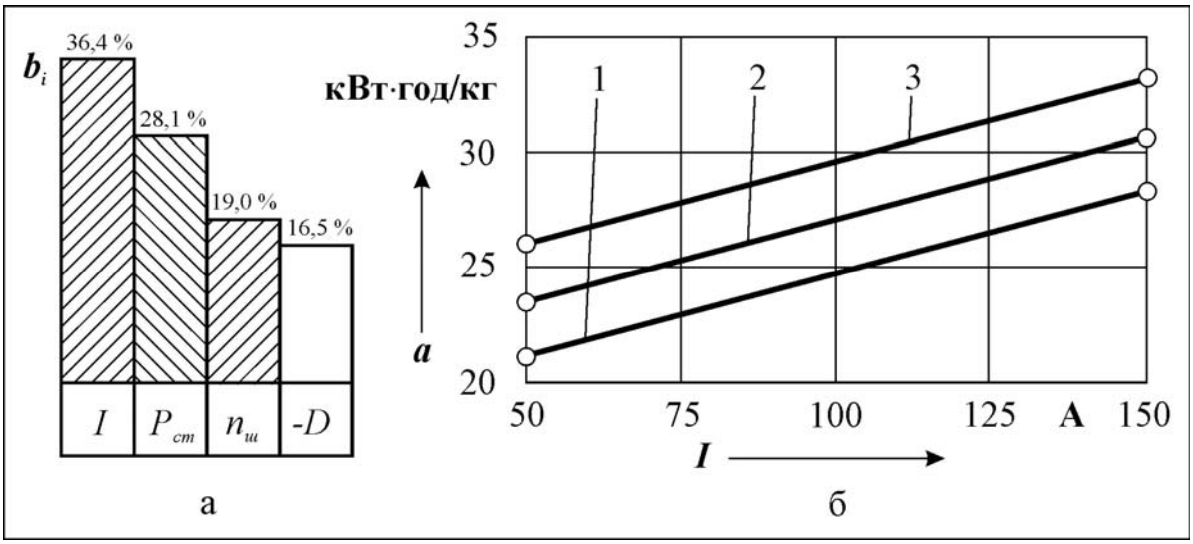


1 – *D* = 10 мм; 2 – *D* = 15 мм; 3 – *D* = 20 мм

Рисунок 5 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність питомої продуктивності обробки M_a від *I* та *D* (б) [$n_ш$ = 35 хв$^{-1}$]

Джерело: розроблено автором

Показано (рис. 6), що найбільший вплив на питому витрату електроенергії процесу обробки тіл обертання електричною дугою з використанням дротового електрода-інструмента *a* (36,4 %) виявляє сила струму *I*, із підвищенням якої *a* збільшується. Саме тому *I* слід розглядати як головний керуючий фактор. Вплив статичного тиску робочої рідини на вході в міжелектродний зазор $P_{ст}$ трохи менший (28,1 %), але має суттєве значення. Із підвищенням $P_{ст}$ питома витрата електроенергії *a* теж збільшується. Значно менше впливають на питому витрату електроенергії *a* такі фактори, як число обертів шпинделя $n_ш$ (19,0 %) та діаметр вихідної ЕЗ *D* (16,5 %). В умовах експерименту питома витрата електроенергії *a* процесу обробки тіл обертання електричною дугою з використанням дротового електрода-інструмента змінювалася у межах від 16,02 до 32,89 кВт·год/кг.



1 – $P_{ст}$ = 0,6 МПа; 2 – $P_{ст}$ = 0,8 МПа; 3 – $P_{ст}$ = 1,0 МПа

Рисунок 6 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність питомої витрати електроенергії *a* від *I* та $P_{ст}$ [*D* = 15 мм; $n_ш$ = 35 хв$^{-1}$](б)

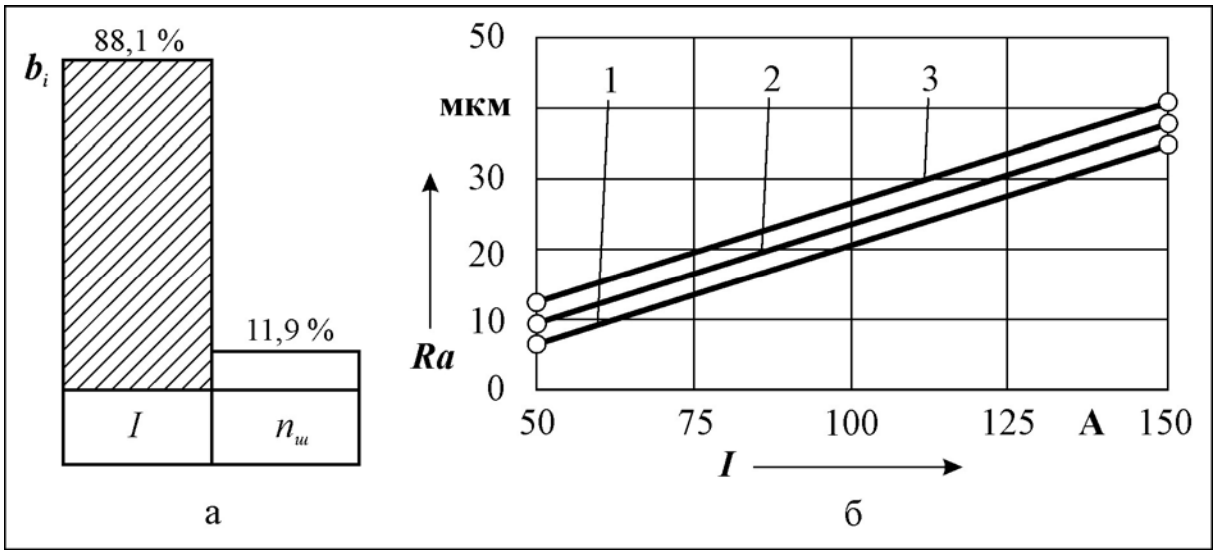
Джерело: розроблено автором

Показано (рис. 7), що найбільший вплив на шорсткість поверхні після РОД тіл обертання дротовим електродом-інструментом *Ra* оказує сила струму *I*, із підвищенням якої *Ra* збільшується. Саме тому *I* слід розглядати як головний керуючий фактор. Влив швидкості обертання шпинделя – значно менший і складає 11,9 %. В умовах експерименту шорсткість поверхні обробки тіл обертання електричною дугою з використанням дротового електрода-інструмента *Ra* змінювалася у межах від 6,3 до 42 мкм.

Як відомо [6, с. 129], шорсткість торцевої поверхні після РОД визначається мікрорельєфом, що утворюється в результаті суперпозиції всієї поверхні елементарних електроерозійних слідів від горіння електричною дуги.

Аналогічно визначається шорсткість поверхні після РОД тіл обертання дротовим електродом-інструментом. За формою сліди являють собою лунки або доріжки (рис. 8). Геометрія елементарної електроерозійної лунки характеризується діаметром $D_л$ (у випадку утворення електроерозійної доріжки діаметр $D_л$ характеризує її ширину.

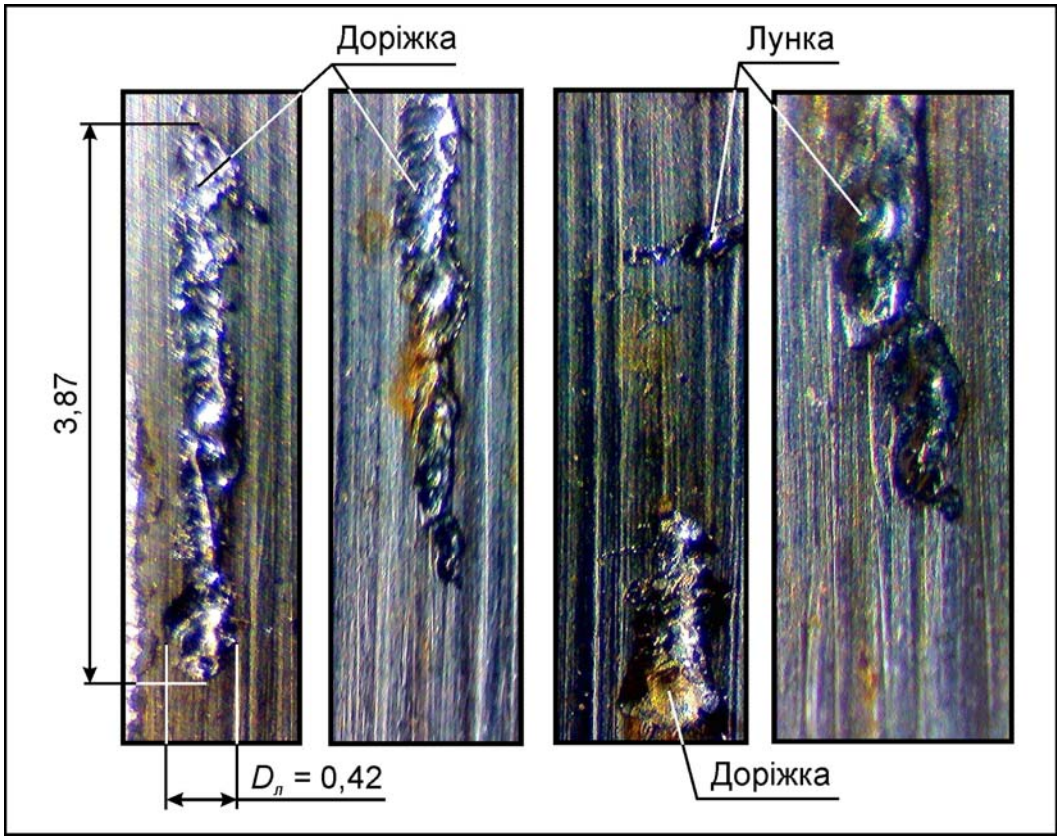
З фізичної точки зору формування обробленої поверхні тіла обертання електричною дугою з використанням дротового електрода-інструмента може здійснюватися (табл. 2):



1 – $n_ш$ = 10 хв$^{-1}$; 2 - $n_ш$ = 35 хв$^{-1}$; 3 - $n_ш$ = 60 хв$^{-1}$

Рисунок 7 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність шорсткості обробленої поверхні *Ra* від *I* та $n_ш$ (б)

Джерело: розроблено автором

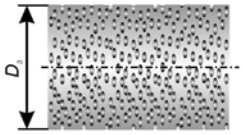
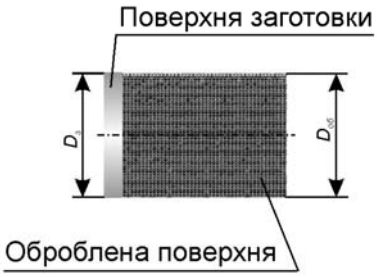
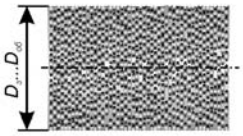
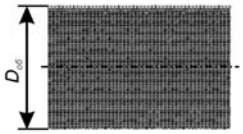


I = 50 А; $P_{ст}$ = 0,6 МПа; *D* = 35 мм; $n_ш$ = 60 хв$^{-1}$

Рисунок 8 – Сліди горіння електричної дуги на електроді-заготовки (×25):

Джерело: розроблено автором

Таблиця 2 - Особливості формування поверхні тіла обертання електричною дугою з використанням дротового електрода-інструмента

Показники процесу обробки	Режим обробки	
	послідовний	одноразовий
Характеристика режиму обробки	1. $I = I_{min}$. 2. $n_ш = n_{ш(max)}$. 3. $s_о = const \le d_{дрота}$.	1. $I = I_{max}$. 2. $n_ш = n_{ш(min)}$. 3. $s_о = const \le d_{дрота}$.
Кількість проходів	Непарна: 1, 3, 5...	Один
Моделювання слідів дуги за проходами	Перший прохід: 	Разовий прохід: 
	Третій прохід: 	
	П'ятий прохід: 	
Результат обробки та рекомендації щодо застосування	1. Малопродуктивна чистова обробка: $M < M_{опт}$ 2. Мінімальна шорсткість обробленої поверхні (Ra = 6,3 мкм)	1. Високопродуктивна чорнова обробка: $M \ge M_{опт}$ 2. Максимальна шорсткість обробленої поверхні (Ra = 40 мкм)

Джерело: розроблено автором

- послідовно, тобто за декілька проходів. Бажано, щоб кількість проходів була непарним числом. Це пов'язано з тим, що продукти ерозії при видаленні із міжелектродного зазору можуть прилипати до обробленої поверхні на парних проходах і залишатися там, в той час як на непарних проходах здійснюється їх «зачищення». Потреба в послідовної обробки за декілька проходів виникає у випадку, коли сила струму I замала, а швидкість обертання шпинделю $n_ш$ завищена. На такому режимі обробки електрична дуга не встигає повністю руйнувати оброблюваний шар поверхні. Тому кількість проходів треба повторювати до моменту, коли дуга не буде збуджуватися в міжелектродному зазорі. Даний режим доцільно використовувати для чистової обробки;

- одноразово, тобто за один прохід. Таке формування поверхні можливе лише при виконанні умови (1):

$$Q_ш \le M, \tag{1}$$

де $Q_ш$ – об'єм шару, що вивільняє дротовий ЕІ в процесі осьової подачі на величину l в одиницю часу, мм^3/хв.

$$Q_ш = \frac{\left(D_з^2 - D_{об}^2\right)\cdot l}{4t};$$

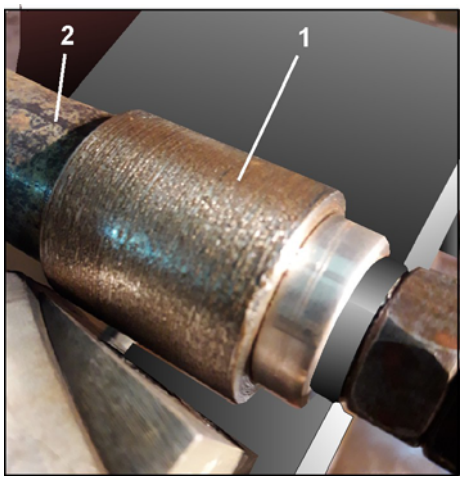
t – час обробки, хв.;

M – продуктивність обробки, мм^3/хв.

Саме тому, для організації обробки за один прохід необхідно вести процес на підвищеній силі струму I та на зменшеній швидкості обертання шпинделю $n_ш$. При цьому спостерігається підвищена шорсткість обробленої поверхні. Даний режим доцільно використовувати для чорнової обробки.

Слід відмітити, що принципово можливо даним способом зробити чистову обробку поверхні тіла обертання за один прохід. Але кінематичні можливості експериментального верстата цього не дозволяють.

Висновки. Запропоновано новий спосіб розмірної обробки електричною дугою тіл обертання з використанням дротового електрода-інструмента (рис. 9), в основу якого покладено нову технологічну схему формоутворення поверхні тіла обертання. Електричну дугу збуджують в гідродинамічному потоці робочої рідини між електродом-заготовкою, що обертається, та дротовим електродом-інструментом, який протягують в зоні обробки по опуклий поверхні електродотримача в площині, що перпендикулярна осі обертання електрода-заготовки, а процес здійснюють при гарантованому зазорі між не обробленою поверхнею електрода-заготовки та електродом-інструментом, тобто без можливого контакту електрода-інструмента з електродом-заготовкою та без застосування слідкуючої подачі електрода-інструмента. Протягування дротового електрода-інструмента дозволяє компенсувати його знос. Використання способу, що пропонується, порівняно з відомим, дозволяє підвищити точність формоутворення поверхні тіла обертання з 14 до 8 квалітету. Отримано математичні моделі технологічних характеристик, що визначають продуктивність та якість процесу РОД тіл обертання з використанням дротового електрода-інструмента, які дозволяють керувати ними та прогнозувати їх. Описано фізичний механізм формування шорсткості поверхні після РОД тіл обертання дротовим електродом-інструментом. Показана можливість формування поверхні послідовно за декілька проходів або за один прохід.



1 – втулка; 2 – оправка

Рисунок 9 – Втулка із нержавіючою сталі 1Х18Н9Т, що оброблена способом РОД з використанням дротового електрода-інструмента

Джерело: розроблено автором

Список літератури

1. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: справочник / Я.Л. Гуревич и др. Москва: Машиностроение. 1976. 176 с.
2. Артамонов Б. А., Винницкий А. Л., Волков Ю. С., Глазков А. В. Размерная электрическая обработка металлов: учебное пособие для вузов / Под ред. А. В. Глазков. Москва: Высш. шк., 1978. 336 с.
3. Спосіб обробки тіл обертання електричною дугою і електрод-інструмент для його реалізації: пат. 24439А Україна: МПК В23Р 17/00 . № 97041927; заявл. 22.04.97; опубл. 30.10.98, Бюл. № 5.
4. Новое в электроэрозии – ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЕ ТОЧЕНИЕ / Пер. из ж-ла MODERN MACHINESHOP. URL: galika/ru/wp-content/uploads/2013/03/Statea_EDM_Turning.pdf – Загл. с экрана (дата обращения: 24.01.2019)

5. Спосіб обробки поверхонь тіл обертання електричною дугою в гідродинамічному потоці робочої рідини: пат 121498 Україна: МПК B23K 9/013, B23K 35/38. № u201705537; заявл. 06.06.2017: опубл. 11.12.2017, Бюл. № 23.
6. Боков В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою: монографія. Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс – ЛТД», 2002. 300 с.

References

1. Gurevich, Ja.L. et al. (1976). *Rezhimy rezanija trudnoobrabatyvaemyh materialov [Modes of cutting difficult to machine]*. Moskow: Mashinostroenie [in Russian].
2. Artamonov, B. A., Vinnickij, A. L., Volkov, Ju. S. & Glazkov, A. V. (1978). *Dimensional electrical metal processing: a textbook for universities.* A. V. Glazkov (Ed.). Moskow: Vyssh. shk. [in Russian].
3 Sposib obrobky til obertannia elektrychnoiu duhoiu i elektrod-instrument dlia joho realizatsii [The method of processing the bodies of rotation with an electric arc and the electrode tool for its implementation]. pat. 24439A Ukraina: MPK V23R 17/00 . № 97041927; zaiavl. 22.04.97; opubl. 30.10.98, Biul. № 5 [in Ukrainian].
4. New in electroerosion - Electroerosion turning. *Modern Machineshop*. Retrieved from galika/ru/wp-content/uploads/2013/03/Statea¬_EDM_Turning.pdf [in Russian].
5. Sposib obrobky poverkhon' til obertannia elektrychnoiu duhoiu v hidrodynamichnomu pototsi robochoi ridyny [The method of treatment of the surfaces of bodies of rotation by an electric arc in the hydrodynamic flow of the working fluid]. pat 121498 Ukraina: MPK V23K 9/013, V23K 35/38. № u201705537; zaiavl. 06.06.2017: opubl. 11.12.2017, Biul. № 23 [in Ukrainian].
6. Bokov, V. M. (2002). *Rozmirne formoutvorennia poverkhon' elektrychnoiu duhoiu: monohrafiia [Dimensional shaping of surfaces by electric arc]*. Kirovohrad: Polihrafichno-vydavnychyj tsentr TOV «Imeks – LTD» [in Ukrainian].

Victor Bokov, Prof., PhD Tech. Sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Dimensional Treatment of Rotation Bodies With Electric Arc Using a Wire Electrode Tool

In modern engineering electro-erosion methods are used for treatment of rotation bodies made of hard-to-machine materials. They provide non-force cutting and allow treating any electrically conductive material regardless of its hardness. Thus, a high-performance arc treatment method is known. The method applies a graphite electrode-tool, but it does not provide high machining accuracy due to increased abrasive wear of the electrode-tool. In addition, there is a method of electro-spark machining of rotation bodies which compensates for wear by pulling the wire electrode tool in the treatment area, but does not provide high processing performance.

The author of the work combines the advantages of these methods. The result of the combination is a new method of dimensional arc treatment of rotation bodies using a wire electrode tool.

Thus, the objective of the study is to improve the accuracy of the process of dimensional treatment by an arc of rotation bodies using a wire electrode tool.

The basis of the proposed method is a new technological scheme of shaping the surface of the rotation body. An electric arc is excited in the hydrodynamic fluid flow between the workpiece electrode, which rotates, and the wire electrode tool, which is pulled in the treatment area along the convex surface of the electrode holder in a plane that is perpendicular to the axis of rotation of the workpiece electrode. The process is carried out with a guaranteed gap between the non-treated surface of the workpiece electrode and the electrode-tool without tracking the supply of the electrode-tool. Broaching the wire electrode tool allows compensating its wear.

The use of the proposed method, in comparison with the known, allows increasing the accuracy of shaping the surface of the rotation body from 14 to 8 points of accuracy degree.

Mathematical models of technological characteristics, characterizing the performance and quality of the process of dimensional arc treatment using a wire electrode-tool, which allow them to control and forecast, are obtained.

The physical mechanism of formation of surface roughness is investigated. The possibility of forming the surface successively in several passes or in one pass is shown.

electric arc, hydrodynamic mode, wire electrode tool, technological shaping scheme

Одержано (Received) 18.02.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 27.02.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

УДК 620.9 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).166-172

П.Г. Плєшков, проф., канд. техн. наук, **С.В. Серебренніков,** проф., канд. техн. наук, **К.Г. Петрова,** доц., канд. техн. наук**, І.В. Савеленко,** доц., канд. техн. наук, **О.І. Сіріков,** доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: kateflash27@gmail.com

Проблеми визначення ефективності та ранжування енергоощадних заходів на об'єктах бюджетної сфери

Проаналізовано енергетичні особливості об’єктів бюджетної сфери за результатами енергоаудитів, розглянуто критерії оцінювання ефективності енергоощадних заходів та їх ранжування за пріоритетністю.
енергоефективність, енергоаудит, об’єкт бюджетної сфери, критерії ранжування

П.Г. Плешков, проф., канд. техн. наук, **С.В. Серебренников,** проф., канд. техн. наук, **Е.Г. Петрова,** доц., канд. техн. наук, **И.В. Савеленко,** доц., канд. техн. наук, **А.И. Сириков,** доц., канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Проблемы определения эффективности и ранжирования энергосберегающих мероприятий на объектах бюджетной сферы

Проанализированы энергетические особенности объектов бюджетной сферы по результатам энергоаудитов, рассмотрены критерии оценки эффективности энергосберегающих мероприятий, их ранжирование по приоритетности.
энергоэффективность, энергоаудит, объект бюджетной сферы, критерии ранжирования

Постановка проблеми. Перманентне підвищення тарифів на всі види енергії стимулює пошук можливостей енергоощадження, що дозволить споживачам зменшити плату за енергоресурси. Крім того, для отримання фінансування з державного та/або місцевих бюджетів, інвестицій від міжнародних фондів на енергетичну модернізацію об’єктів бюджетної сфери, необхідне обґрунтування комплексу енергоощадних заходів (ЕОЗ) за результатами енергетичного аудиту (ЕА) та наявність енергетичних сертифікатів будівель.

Серед бюджетних установ типовими споживачами енергоресурсів є освітні заклади (ВНЗ, технікуми, ПТУ, коледжі, ліцеї, гімназії, школи, дошкільні установи, інтернати тощо), питоме енергоспоживання яких у 2…4 рази вище, ніж у країнах Західної Європи та США [1]. До того ж в освітніх закладах підвищені вимоги до внутрішньої температури приміщень [2], що також обумовлює і більші теплові втрати. Потенціал енергоощадження в цих установах сягає 40…50 % від існуючого рівня споживання [3]. Як правило, джерелом теплопостачання в освітніх закладах є котельні на природному газі, а отже, зменшення енергоспоживання будівлею призводить до зменшення споживання природнього газу, від чого у виграші не тільки об’єкт господарювання, а і країна загалом.

Все це актуалізує дослідження енергопотоків об’єктів бюджетної сфери шляхом проведення енергоаудитів та пошук можливостей підвищення їхнього рівня енергоефективності шляхом впровадження ЕОЗ.

© П.Г. Плєшков, С.В. Серебренніков, К.Г. Петрова, І.В. Савеленко, О.І. Сіріков, 2019

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [4] приведено аналіз результатів енергетичних аудитів у ВНЗ. Структура енергетичних витрат в установах бюджетної сфери та комплекс енергоощадних заходів, що базуються на досвіді енергетичних аудитів у США, показані в роботі [1], та в [3] – на досвіді країн ЄС. Проте, в роботах [1-2, 4] не достатньо приділено уваги особливостям ранжування пріоритетності ЕОЗ та визначення енергетичної ефективності об'єктів бюджетної сфери.

Постановка завдання. Метою роботи є постановка та вирішення проблеми визначення енергетичної ефективності ЕОЗ при виконанні енергетичного аудиту та їх ранжування за пріоритетністю.

Виклад основного матеріалу. Передумовою проведення енергоаудиту є узгодження із замовником його мети, з'ясування розмірів та джерел можливого фінансування модернізації об'єкта енергетичних досліджень (ОЕД). Відповідно до цього акцентують увагу на завданнях енергоаудиту (рис. 1) і особливостях реалізації проекту, – наприклад, превалює критерій:

– техніко-енергетичний (зменшення енергоспоживання й підвищення класу енергоефективності будівель), або

– економічний (зменшення оплати енергоресурсів), чи

– нормативно-правовий (покращення мікроклімату до санітарно-гігієнічних норм і збільшення комфорту в приміщеннях із залишенням попереднього рівня енергоспоживання),

– екологічний (зменшення емісії CO_2 – еквівалентів парникових газів) тощо.

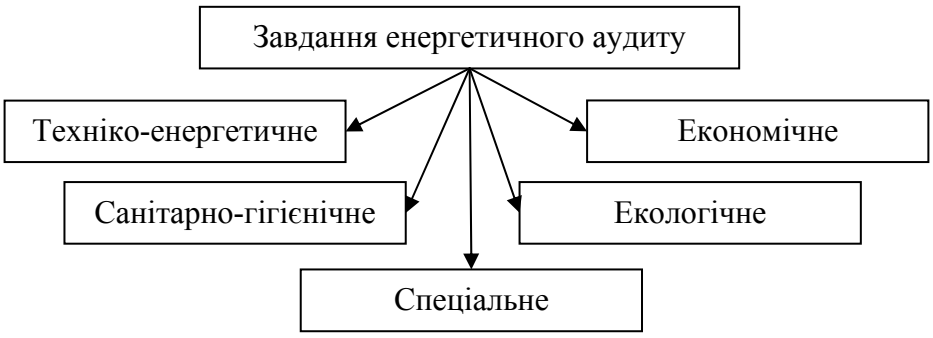


Рисунок 1 – Класифікація завдань енергетичного аудиту

Джерело: розроблено авторами

Природно, що за домінування іноземних інвестицій превалюють екологічні чинники, які впливають на покращення загального клімату Землі; якщо ж переважно задіяні місцеві джерела надання коштів – першочерговим є зменшення енергоспоживання та витрат на паливно-енергетичні ресурси (ПЕР); у разі використання власних коштів превалюють санітарно-гігієнічні чинники – покращення мікроклімату з підвищенням рівня енергетичної ефективності та продуктивності праці. Якщо інвестування проекту модернізації здійснюватиметься з кількох джерел (власні кошти, кредити, фонди, гранти та інші), – необхідно враховувати тривалість «життя» ЕОЗ і, відповідно, розраховувати такі показники: рентабельність інвестицій, термін окупності (простий та динамічний) капітальних вкладень, термін граничного повернення кредитів і відсотків за ними; чистий дисконтований дохід, питомі витрати енергії, скорочення емісії CO_2 тощо [4, 6, 7].

Досвід виконання енергетичних аудитів свідчить, що замовник не завжди чітко усвідомлює першочерговість ЕОЗ та реальний рівень втрат через елементи огороджувальних конструкцій, в інженерних системах електропостачання, опалення,

вентиляції тощо. Це призводить до нераціонального розподілу грошових коштів на впровадження ЕОЗ. Розібратися в поставлених задачах замовнику допоможе лише проведення комплексного енергетичного аудиту будівлі та її інженерних систем.

У звіті з ЕА розроблені ЕОЗ, як правило, об'єднують у 2…5 пакетів залежно від обраних техніко-економічних критеріїв (наприклад, – капіталовкладення та очікуване заощадження енергії). Формування 1-го пакету мінімально необхідних ЕОЗ має враховувати суму коштів, які замовник згодний вкласти у модернізацію об'єкту впродовж 3-х років (доки результати ЕА є актуальними); водночас, збільшення капіталовкладень від першого (мінімального з 3…5 ЕОЗ) до останнього (повний пакет, що містить 10…12 ЕОЗ з глибокою модернізацією), зазвичай, не повинно перевищувати 70% і має бути сумірним із приростом рівня енергоефективності (табл. 1).

Таблиця 1 – Основні показники для чотирьох запропонованих пакетів ЕОЗ на прикладі енергетичного аудиту комунального підприємства «Бальнеологічна лікарня»

Пакети ЕОЗ	Річні заощадження		Інвестиції, грн	Термін повернення, рік	Скорочення викидів CO_2, т/рік
	кВт·год	грн			
Пакет №1 (5 ЕОЗ)	403 764	438 387	3 471 535	7,9	105,7
Пакет №2 (6 ЕОЗ)	568 784	519 458	3 781 602	7,3	147,9
Пакет №3 (8 ЕОЗ)	1 086 513	673 463	6 114 698	9,1	282,5
Пакет №4 (10 ЕОЗ)	1 286 185	930 000	7 712 656	8,3	334,4

Джерело: розроблено автором

Інколи, до проведення ЕА, замовник попередньо зорієнтований на той чи інший ЕОЗ, наприклад, – утеплення зовнішніх стін, і просить аудиторів зробити техніко-економічне обґрунтування бажаного ЕОЗ. Проте, за результатами проведення техніко-економічних розрахунків, бажаний ЕОЗ може мати не найкращі показники серед запропонованих, та, навіть, не потрапити до 1-го мінімального пакету ЕОЗ. Наприклад, бажаний замовником ЕОЗ може мати найбільше заощадження енергії, водночас – вимагатиме найбільших інвестицій, і матиме термін окупності, сумірний з тривалістю «життя» даного ЕОЗ. Отже, в цьому разі техніко-енергетичний критерій є протилежним до економічного.

З огляду на це, енергоаудитор формує перелік пропозицій в пакетах на основі комплексу критеріїв (рис. 1) та власного науково-практичного досвіду [4]. Тому вибір критерію для ранжування ЕОЗ по пакетах є доволі складною задачею, вирішення якої не завжди може ґрунтуватися та техніко-економічних розрахунках, а враховувати також санітарно-гігієнічний, екологічний, соціальний та інші аспекти. Отже, є актуальним пошук об'єктивних показників, за якими необхідно ранжувати пріоритетність ЕОЗ при групуванні їх по пакетах.

За основні техніко-економічні критерії оцінювання рівня ефективності енергоощадних заходів можуть бути прийняті реальний економічний ефект і економія енергоресурсів.

Критерії можна поділити на економічні і натуральні.

До натуральних критеріїв оцінювання рівня ефективності використання енергії належать питома витрата енергії і питома зведена витрата умовного палива.

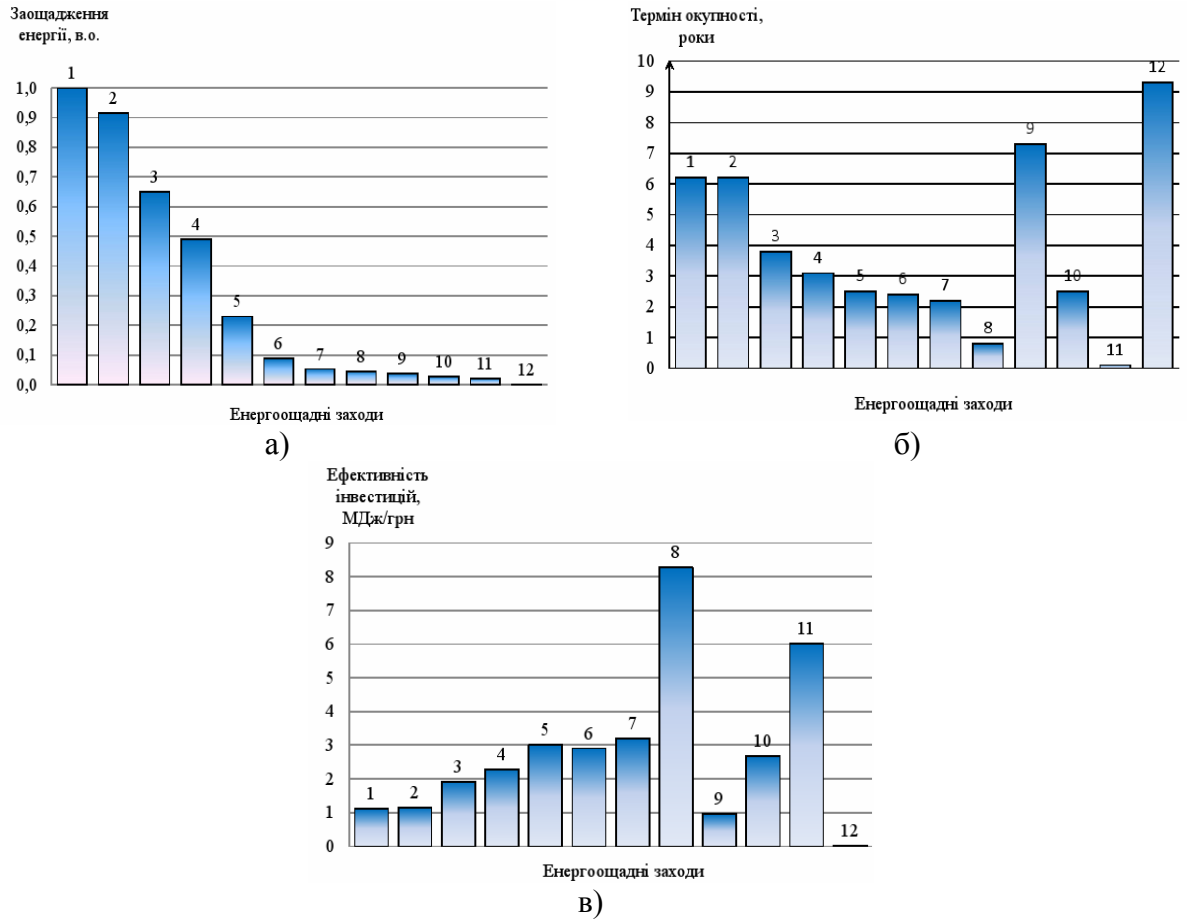
Економічні критерії також можна поділити на:

– прості критерії: чистий прибуток, рентабельність інвестицій, термін окупності капітальних вкладень, термін граничного повернення кредитів і відсотків за ними;

– інтегральні критерії: чистий дисконтований дохід, внутрішня норма рентабельності, термін повернення капіталу, сумарні і питомі витрати.

Внаслідок того, що бюджет інвестицій в ЕОЗ завжди обмежений і, як правило, менший за суму інвестиційних пропозицій, заходи необхідно ранжувати, щоб обрати серед них найефективніші рішення.

На рис. 2 а-в зображено ранжування 12-ти запропонованих ЕОЗ за трьома критеріями: натуральним – заощадження енергії (заходи вишикувано за енергозаощадженням E/E_{MAX}, рис. 2 а), та за економічними критеріями – терміном окупності (рис. 2 б) й ефективністю інвестицій (економія енергії на одну вкладену гривню, МДж/грн) (рис. 2 в).



1 – утеплення зовнішніх стін; 2 – тепломодернізація даху; 3 – термомодернізація підлоги; 4 – термомодернізація зовнішніх світлопрозорих конструкцій (вікон і лоджій); 5 – удосконалення системи опалення, встановлення індивідуального теплового пункту; 6 – встановлення рефлекторів з теплоізоляційного матеріалу за радіаторами; 7 – встановлення вхідних дверей з утеплювачем; 8 – відновлення гарячого водопостачання; 9 – теплоізоляція трубопроводів та запірної арматури системи опалення та гарячого водопостачання; 10 – заміна існуючих ламп розжарювання на сучасні зі світловіддачею 80…150 лм/Вт; 11 – покращення умов тепловіддачі від опалювальних приладів будівлі (демонтаж декоративних щитів); 12 – балансування опалювальної системи шляхом встановлення балансувальних клапанів

Рисунок 2 - Ранжування енергозаощаджуючих заходів за критерієм: а – заощадження енергії; б – терміна окупності; в – ефективності

Джерело: розроблено автором

За результатами порівняння діаграм (рис. 2 а, б, в) видно, що черговість ЕОЗ істотно відрізняється залежно від обраного критерію; тобто на практиці пакет ЕОЗ з найкращими енергетичними характеристиками не завжди є вигідним економічно і

навпаки. Отже, остаточне ранжування ЕОЗ необхідно проводити за сукупністю натуральних і економічних критеріїв [5, 6].

Зменшення енергоспоживання ΔE визначають як різницю

$$\Delta E = E_б - E ,$$

де $E_б$ – базове споживання енергії (до впровадження заходу) кВт·год, МДж, Гкал, E – споживання енергії після впровадження ЕОЗ.

Значення ΔE є енергетичним показником, який слугує основою для техніко-економічних та екологічних розрахунків ефективності ЕОЗ, тому коректне визначення ΔE є відповідальним завданням при проведенні ЕА та енергетичної сертифікації будівель. Розрахунок споживання енергії E після впровадження ЕОЗ ґрунтується на покращенні того чи іншого показника (опору теплопередачі, температури, кратності повітрообміну тощо) або їх поєднання. При проведенні ЕА та енергетичної сертифікації будівель базовий рівень споживання $E_б$ визначають за методикою [1] за нормативних значень показників – кратності повітрообміну, зовнішньої та внутрішньої температури приміщень, тривалості опалювального сезону, температури води в подавальному та зворотному трубопроводах тощо.

Нормативні показники можуть істотно відрізнятися від фактичних, що впливає на енергоспоживання будівлею. Так, наприклад, зменшення температури в приміщенні на 2 °С призводить до зменшення енергоспоживання на 10 %, а зменшення кратності повітрообміну з 2 до 0,5 об./год може призвести до зниження енергоспоживання в 2 і більше разів залежно від теплових втрат крізь огороджуючі конструкції. Зазвичай, фактичне енергоспоживання на опалення будівлі є меншим від розрахункового, що пояснюється кумулятивним ефектом накладання таких факторів, як зниження кратності повітрообміну в порівнянні з нормативним (завдяки щільним металопластиковим вікнам та невикористанню механічної вентиляції), заниженою температурою в приміщеннях (у вихідні дні та в неробочий час, або – в невідповідальних приміщеннях), зменшення тривалості опалювального сезону (внаслідок затягування початку опалювання теплопостачальною організацією, завдяки теплій погоді або перериванню виробничого процесу задля економії плати за E), недотримання температурного графіку, особливо під час сильних морозів тощо.

Тому, при розрахунках за методикою [1] можливі ситуації, коли обчислене річне енергоспоживання на опалення за фактичними показниками опору теплопередачі огороджувальних конструкцій та нормативними показниками істотно відрізняються (у рази) від виміряного тепловим лічильником, а розрахована економія тепла від усіх ЕОЗ може навіть перевищувати фактичне споживання тепла за опалювальний сезон.

При оцінці ефективності ЕОЗ замовника насамперед цікавить реальна економія відносно фактичного рівня енергоспоживання, яку можна буде використати, наприклад, на погашення кредиту, взятого на реалізацію ЕОЗ. У разі ж дотримання замовником і енергопостачальником нормативних вимог, енергоспоживання було б вищим і наближалося б до розрахункового.

На нашу думку, є некоректним оцінювання енергоефективності ЕОЗ відносно фактичного рівня споживання впродовж 3-х років [8], який змінюється з року в рік залежно від зовнішніх умов і стану ОЕД. Натомість нормативні умови є сталими та науково обґрунтованими і для отримання коректних результатів розрахунку економії від впровадження ЕОЗ треба орієнтуватись на базову лінію енергоспоживання, яка ґрунтується на проектному режимі роботи та нормативному мікрокліматі в приміщеннях і показує цільове споживання енергії за різної зовнішньої температури. Отже, проблема визначення базового рівня енергоспоживання для розрахунку енергетичної ефективності ЕОЗ є актуальним питанням та потребує подальших дискусійних обговорень і досліджень.

Ще одним з принципів розділення ЕОЗ є їх поділ на безвитратні, маловитратні та витратні [9]. Якщо виокремлення безвитратних ЕОЗ не викликає питань, то поділ ЕОЗ на мало- та багатовитратні є відносним, адже залежить від фінансових можливостей замовника.

Висновки.

1. Замовник енергоаудиту не завжди усвідомлює реальний рівень втрат через елементи огороджуючих конструкцій, в системах електропостачання, опалення, вентиляції тощо. Це призводить до суб'єктивного і нераціонального розподілу грошових ресурсів на впровадження енергоощадних заходів.

2. Вибір критеріїв для ранжування енергоощадних заходів є складною задачею, яка не завжди може ґрунтуватися та техніко-економічних розрахунках, тому актуальним є пошук натуральних і економічних критеріїв, за якими потрібно ранжувати енергоощадні заходи в пакетах.

3. Поділ енергоощадних заходів на мало- та багатовитратні є залежить від фінансових можливостей замовника, тому є умовним.

4. Для отримання коректних результатів розрахунку економії від впровадження ЕОЗ треба орієнтуватись на базову лінію енергоспоживання, яка ґрунтується на проектному режимі роботи та нормативному мікрокліматі в приміщеннях. Проблема визначення базового рівня енергоспоживання є актуальною та потребує подальших дискусійних обговорень і досліджень.

Список літератури

1. Прокопенко В.В., Закладний О.М., Кульбачний П.В. Енергетичний аудит з прикладами та ілюстраціями : навч. посіб.. Київ: Освіта України, 2009. 438 с.
2. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні. [Чинний від 2016–01–01]. Київ: Мінрегіон України, 2015. 139 с. (Національний стандарт України).
3. Енергетичний аудит: навч. посіб. / Соловей О.І. та ін.; – Черкаси: ЧДТУ, 2005. 299 с.
4. Черновол М.І., Плєшков П.Г., Серебренніков С.В., Савеленко І.В., Петрова К.Г. Підвищення рівня енергофективності технічного університету шляхом оптимізації енергетичного балансу. *Вісник КНУТД. Серія «Технічні науки»*. Київ: КНУТД, 2015. № 5 (90). С. 99 - 106.
5. Петрова К.Г., Серебренніков С.В. Ранжування методів управління режимами електроспоживання за експертною оцінкою. *Енергетика і автоматика: електрон. наук. фах. вид.* / Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. Київ: 2013. № 2 (16). С. 1 – 6. – URL: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/eia_2013_2%2816%29__14.pdf. (дата звернення: 24.06.2019).
6. Ткаченко В.Ф., Петрова К.Г. Підвищення рівня ефективності енергоспоживання вищих навчальних закладів за рахунок виявлення почерговості впровадження заходів з енергоощадження. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць КНТУ*. Кіровоград: КНТУ, 2016. Вип. 29. С. 275 – 281.
7. Samoylenko I., Gnatenko M. Research on energy efficiency factors: instrumental control and verification *Technology audit and production reserves*. 2017. № 2(4). P. 20-24.
8. Іншеков Є.М., Нікітін Є.Є., Тарновский М.В., Чернявський А.В. Посібник з муніципального енергетичного менеджменту. Київ: Поліграф плюс, 2014. 238 с.
9. ДСТУ Н Б А.2.2-13:2015. Енергетична ефективність будівель. Настанова з проведення енергетичної ефективності будівель. [Чинний від 2016–01–01]. Київ: Мінрегіон України, 2015. 38 с. (Національний стандарт України).

References

1. Prokopenko, V.V., Zakladnyj, O.M. & Kul'bachnyj, P.V. (2009). *Energetychnyj audyt z prykladamy ta iljustracijamy [Energy audit with examples and illustrations]*. Kyiv: Osvita Ukrai'ny [in Ukrainian].
2. *DSTU B A.2.2-12:2015. Energetychna efektyvnist' budivel'. Metod rozrahunku energospozhyvannja pry opalenni, oholodzhenni, ventyljacii', osvitlenni ta garjachomu vodopostachanni* [National Standard B A.2.2-12:2015. Energy efficiency of buildings. Calculation method of energy consumption for heating, cooling, ventilation, lighting and hot water supply]. Kyiv, Minregion Ukrai'ny, 2015. 139 p. [in Ukrainian].

3. Solovej, O.I. & et al. (2005). Energetychnyj audyt [Energy audit]. Cherkasy: ChDTU [in Ukrainian].
4. Chernovol, M.I., Pljeshkov, P.G., Serebrennikov, S.V., Savelenko, I.V. & Petrova, K.G. (2015). Pidvyshhennja rivnja energofektyvnosti tehnichnogo universytetu shljahom optymizacii' energetychnogo balansu [Increasing the level of the energy efficientcy of the technical university by optimizing the energy balance]. *Visnyk KNUTD - Bulletin of the KNUTD, 5 (90),* 99-106. [in Ukrainian].
5. Petrova, K.G. & Serebrennikov, S.V. (2013). Ranzhuvannja metodiv upravlinnja rezhymamy elektrospozhyvannja za ekspertnoju ocinkoju (*Ranking methods of control regime of power consumption according to expert estimates*). Retrieved from http://nbuv.gov.ua/j-pdf/eia_2013_2%2816%29__14.pdf.
6. Tkachenko, V.F. & Petrova, K.G. (2016). Pidvyshhennja rivnja efektyvnosti energospozhyvannja vyshhyh navchal'nyh zakladiv za rahunok vyjavlennja pochergovosti vprovadzhennja zahodiv z energooshhadzhennja [Increasing the level of the energy efficiency of the higher education institutions by identifying order of priority of implementation ways of power saving]. *Engineering in agricultural production, industry engineering, automation - Machinery in agricultural production, industry machine building, automation, 29,* 275-281. [in Ukrainian].
7. Samoylenko, I. & Gnatenko, M. (2017). Research on energy efficiency factors: instrumental control and verification. *Technology audit and production reserves, 2(4)*, 20-24. [in English].
8. Inshekov, Je.M., Nikitin, Je.Je., Tarnovskyj, M.V. & Chernjavs'kyj, A.V. (2014). *Posibnyk z municypal'nogo energetychnogo menedzhmentu [Guide to Municipal Energy Management]*. Kirovoghrad: Poligraf pljus [in Ukrainian].
9. *DSTU N B A.2.2-13:2015. Energetychna efektyvnist' budivel'. Nastanova z provedennja energetychnoi' efektyvnosti budivel'* [National Standard N B A.2.2-13:2015. Energy efficiency of buildings. Guidelines for energy efficiency of buildings]. Kyiv, Minregion Ukrai'ny, 2015. 38 p. [in Ukrainian].

Petro Pleshkov, Prof., PhD tech. sci., **Sergiy Serebrennikov,** Prof., PhD tech. sci., **Kateryna Petrova,** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ivan Savelenko,** Assoc. Prof ., PhD tech. sci., **Oleksandr Sirikov,** Assoc. Prof ., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Problems of Determining the Efficiency and Ranking of Energy-saving Measures at the Objects of the Budget Sphere

The purpose of the work is to formulate and solve the problem of determining the energy efficiency of energy-saving measures when performing energy audits and ranking them by priority. We have developed investigation of energy flows of budgetary objects by conducting energy audits and finding ways to improve their energy efficiency by implementing energy-efficient measures.

Energy peculiarities of the objects of the budget sphere according to the results of energy audits are analyzed, criteria of estimation of efficiency of energy saving measures and their ranking by priority are considered. Permanent tariff increases for all types of energy stimulate the search for energy savings, which will allow consumers to reduce their energy bills. In addition, to obtain financing from the state and / or local budgets, investments from international funds for the energy modernization of budgetary objects, it is necessary to justify a complex of energy-saving measures based on the results of the energy audit and the availability of energy certificates of buildings. Energy audits shows that the customer does not always clearly understand the priority of energy efficient measures and the real level of losses due to elements of fencing structures, in engineering systems of power supply, heating, ventilation etc. This leads to irrational allocation of funds for the implementation of energy efficient measures. Only a comprehensive energy audit of the building and its engineering systems will help the customer understand the tasks. The investment budget for energy efficiency measures is always limited and, as a rule, less than the amount of investment proposals, measures should be ranked in order to choose the most effective solutions.

Choosing the criteria for ranking energy-saving measures is a difficult task that cannot always be based on technical and economic calculations, so it is important to search for natural and economic criteria by which energy-saving measures should be ranked in packages. The division of energy-saving measures into small and high-cost ones depends on the financial capacity of the customer and is therefore conditional. To obtain the correct results of calculating the savings from the implementation of energy-saving measures, it is necessary to focus on the baseline of energy consumption, which it is based on the design mode of operation and the regulatory microclimate in the premises. The problem of determining the baseline level of energy consumption is an urgent one and it needs further discussion and research.

energy efficiency, energy audit, budget object, ranking criteria

Одержано (Received) 11.03.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 14.03.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.94 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).173-183

Г.М Дрєєва, викл., **О.А. Смірнов**, проф., д-р техн. наук, **О.М. Дрєєв,** канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
e-mail: gannadreeva@gmail.com, dr.SmirnovOA@gmail.com, drey.sanya@gmail.com

Метод генерування фрактальноподібної числової послідовності на основі скінченного автомату для моделювання трафіку у мережі

У даній роботі розглядається проблематика представлення трафіку, для моделювання його поведінки при навантаженні комп'ютерних мереж. Визначено що трафік в комп'ютерних мережах на певних масштабах є фракталоподібним і при цьому класичні закони розрахунку параметрів системи масового обслуговування дають хибні результати Предметом вивчення у статті є метод генерування фрактальноподібної числової послідовності на основі скінченного автомату для моделювання трафіку у мережі. Метою роботи є створення генератора фрактальних бінарних послідовностей на основі скінченного автомату та використання методу генерування фрактальноподібної числової послідовності на основі скінченного автомату для моделювання трафіку у мережі. Для цього у роботі були вирішені наступні задачі: побудований фрактальноподібний трафік шляхом використання запропонованого генератора випадкових чисел, визначені його недоліки; визначено місце генератора фрактального трафіку в системах імітаційного моделювання; здійснено генерування фрактальноподібної числової послідовності на основі скінченного автомату; оцінено статистичні властивості часткових сум генерованих послідовностей. Результатом роботи є реалізація методу генерування фрактальноподібної числової послідовності на основі скінченного автомату для моделювання трафіку у мережі. Висновки: показано актуальність задачі створення генераторів фрактальних бінарних послідовностей без використання нескінченних розподілів; запропоновано використати генератор фрактальної бінарної послідовності на основі скінченного автомату; показано можливість попереднього визначення фрактальної розмірності генерованого трафіку при інтенсивності λ=0.5. Визначені подальші напрямки досліджень, які полягають у розв'язанні наступних задач: провести аналітичні оцінки показника Херста генерованої бінарної послідовності при інтенсивності трафіку λ=0.5; показати варіативність фрактальної розмірності бінарної послідовності й при інших інтенсивностях λ; вивести аналітичні вирази для отримання параметрів генератора з заданою густиною вихідних бітів з керуванням їх фрактальної розмірності; покращити аналітичні оцінки та їх узагальненням на довільну інтенсивність генерованого трафіку.

генератор фрактальної двійкової послідовності, трафік, комп'ютерні мережі

А.Н Дреева, препод.**, А.А.Смирнов**, проф., докт. техн. наук, А**.Н. Дреев,** канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Метод генерирования фрактальноподобной числовой последовательности на основе конечного автомата для моделирования трафика в сети

В данной работе рассматривается проблематика представления трафика, для моделирования его поведения при нагрузке компьютерных сетей. Определено, что трафик в компьютерных сетях при определенных масштабах является фракталоподобным и при этом классические законы расчета параметров системы массового обслуживания дают ложные результаты. Предметом исследования в статье является метод генерирования фракталоподобной числовой последовательности на основе конечного автомата для моделирования трафика в сети. Целью работы является создание генератора фрактальных бинарных последовательностей на основе конечного автомата и использования метода генерирования фракталоподобной числовой последовательности на основе конечного автомата для

© Г.М Дрєєва, О.А. Смірнов, О.М. Дрєєв, 2019

моделирования трафика в сети. Для этого в работе были решены следующие задачи: построен фракталоподобный трафик путем использования предложенного генератора случайных чисел, определены его недостатки; определено место генератора фрактального трафика в системах имитационного моделирования; осуществлено генерирование фракталоподобной числовой последовательности на основе конечного автомата; оценены статистические свойства частичных сумм генерируемых последовательностей. Результатом работы является реализация метода генерирования фракталоподобной числовой последовательности на основе конечного автомата для моделирования трафика в сети. Выводы: показана актуальность задачи создания генераторов фрактальных бинарных последовательностей без использования бесконечных распределений; предложено использовать генератор фрактальной бинарной последовательности на основе конечного автомата; показана возможность предварительного определения фрактальной размерности генерируемого трафика при интенсивности $\lambda = 0.5$. Определены дальнейшие направления исследований, которые заключаются в решении следующих задач: провести аналитические оценки показателя Херста генерируемой бинарной последовательности при интенсивности трафика $\lambda = 0.5$; показать вариативность фрактальной размерности бинарной последовательности и при других интенсивности λ; вывести аналитические выражения для получения параметров генератора с заданной плотностью выходных бит с управлением их фрактальной размерности; улучшить аналитические оценки и их обобщение на произвольную интенсивность генерируемого трафика.

генератор фрактальной двоичной последовательности, трафик, компьютерные сети

Постановка проблеми. Багато комп'ютерних систем представлені математичними моделями у вигляді систем масового обслуговування. Це є актуальним при розробки систем забезпечення обміну інформацією в комп'ютерних та телекомунікаційних мережах. Доведено, що трафік в комп'ютерних мережах на певних масштабах є фракталоподібним і при цьому класичні закони розрахунку параметрів системи масового обслуговування дають хибні результати. Найбільш надійними засобами розрахунку параметрів системи масового обслуговування з фрактальним трафіком на сьогодні є результати імітаційного моделювання, бо переважна більшість фрактальних джерел трафіку не піддаються аналітичному розв'язанню. Тому для проведення чисельних експериментів з імітуванням необхідно мати генератори фракталоподібного трафіку.

Вже традиційно для отримання фракталоподібного трафіку на сьогоднішній день використовують випадкові числа, які генеруються за законами розподілу з "важким хвостом". Розподіли з "важким хвостом" мають повільно спадаючий характер розподілу густини ймовірності, що призводить до нескінченного значення дисперсії розподілу, коли математичне сподівання має конкретне значення; іноді використовуються моделі в яких математичне сподівання теж прямує до нескінченності. На жаль, математичні абстракції та узагальнення, які полегшують математичні перетворення або взагалі роблять їх можливими, мають межі практичного використання.

Яскравим прикладом зловживання нескінченно малими величинами при використанні інтегрально-диференціального обчислення можна знайти в фізиці матеріалів: застосування інтегралу для рахування енергії напруження матеріалу тріщин призводить до виникнення нескінченності в напруженості матеріалу в точці росту тріщини (рис. 1). Фізично таке не є можливим, причиною цього є порушення закону Юнга при значних деформаціях та дискретна природа речовин – речовина складається з дискретних часток і інтегральне числення є по факту наближенням до реальності і використовується лише з причин математичного спрощення моделі фізичних процесів [1].

Відповідно до трафіку в комп'ютерній мережі, вузол зв'язку не може отримати нескінченно великий запит на обслуговування з причини обмеження швидкості передачі по лініям зв'язку. Обмеження генерованого запиту в процесах імітаційного моделювання систем масового обслуговування проводиться штучно, але це порушує

теоретичні властивості фрактальності трафіку, тому результати моделювання не можуть вважатися надійними. За зазначеними проблемами з використанням розподілів з “важким хвостом” в роботі пропонується використовувати генератор фрактального трафіку на основі графу скінченного автомату.

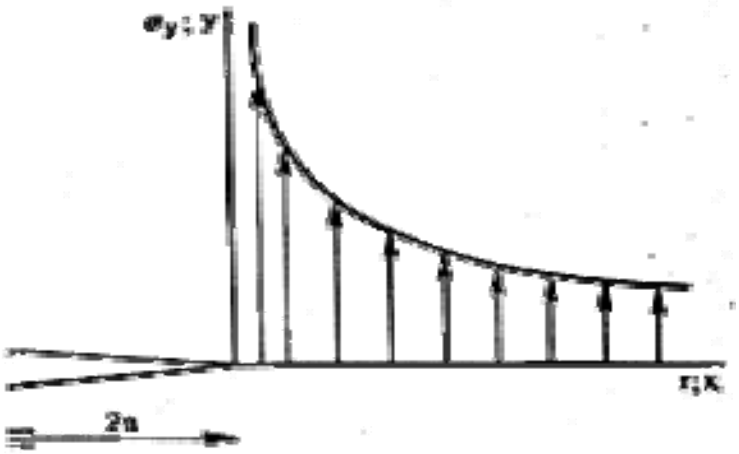


Рисунок 1 – Графік модуля напруженості біля точки росту тріщини

Джерело: [1]

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз публікацій [1-20] показав актуальність питання моделювання трафіку у комп’ютерних мережах. Зокрема, в [2] була проведена оцінка часу затримки пакетів в умовах зв'язку при обслуговуванні трафіку складної структури на основі розробленої імітаційної моделі. В якості критерію складності структури трафіку використовуються коефіцієнт варіації інтервалу часу між черговими пакетами. В якості моделей трафаретних конструкцій використовуються потоки, які мають Парето- і гіперекспоненційне розподілення широкого діапазону змін їхніх вхідних параметрів і рівня завантаження вузлового обладнання мережі зв'язку. В [3] проаналізовані сучасні методи моделювання мережевого трафіку. Показано, що створення універсальної імітаційної моделі (УІМ) з їх допомогою проблемне з причини великого обсягу дослідницької роботи, необхідної для адаптації приватних моделей до всього різноманіття характеристик різних джерел мережевого навантаження і конфігурації мережі. Запропоновано застосування контекстних методів для побудови УІМ. В якості основи для побудови УІМ обраний метод динамічного марковского моделювання (ДММ). Проведена адаптація методу ДММ для УІМ і розроблена методика його застосування. У роботі [4] сформульована математична модель мультисервісного каналу зв'язку на основі експоненційної GERT-мережі. У працях [5-16] розглянуті питання генерації фрактального трафіку. У роботах [17-19] пропонується метод агрегування фрактального трафіку телекомунікаційних мереж, його прогнозування та аналіз. У роботі [20] Представлені результати вибору оптимальної часової шкали при апроксимації максимуму черзі для трафікового процесу, описуваного фрактальним броунівським рухом. Доведено ряд тверджень, що дозволяють провести аналіз обраних метрик точності, доведено оптимальність на обраної метриці експоненційних часових шкал. Досліджено асимптотичні характеристики побудованих експоненційних тимчасових шкал, показані переваги і недоліки пропонованого підходу при аналізі трафіку з довготривалою залежністю, доведена застосовність підходу для будь-якого кінцевого порога черзі. Виходячи з аналізу останніх досліджень і публікацій можливо зробити висновок, що питання

моделювання трафіку та використання для цих цілей генераторів фракталоподібних послідовностей є актуальним. Відкритими є питання створення генератора фрактальних бінарних послідовностей на основі скінченного автомату.

Постановка завдання. Таким чином, метою даної роботи є створення генератора фрактальних бінарних послідовностей на основі скінченного автомату та використання методу генерування фрактальноподібної числової послідовності на основі скінченного автомату для моделювання трафіку у мережі.

Виклад основного матеріалу.

Місце генератору фрактального трафіку в системах імітаційного моделювання. Нехай проводиться вивчення поведінки маршрутизатору в телекомунікаційній комп'ютерній мережі, який має N рівнозначних каналів з підключеними клієнтами, має можливість перенаправити *M* пакетів за одиницю часу та містить загальний внутрішній буфер-чергу на K пакетів (рис. 2).

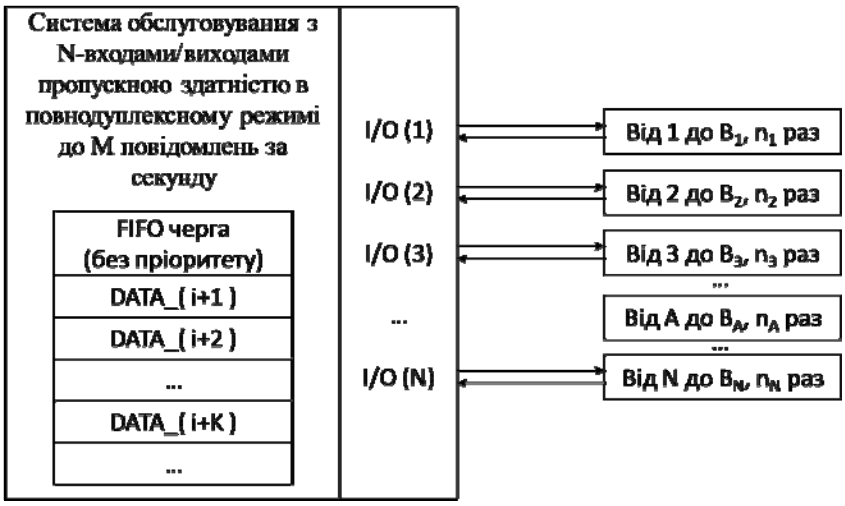


Рисунок 2 – Структурна схема процесу імітаційного моделювання

Джерело: [4]

Тоді клієнти, які під'єднані до ліній входу/виходу (I/O на схемі), є генераторами фрактального трафіку та споживачами цього трафіку. Кожен клієнт генерує фракталоподібний трафік, але й зміна адреси посилання повинна змінюватися фрактально. Для забезпечення роботи описаної схеми потрібно мати генератор фракталоподібного трафіку з можливістю регулювання інтенсивності запитів та їх фрактальної розмірності. Під час проведення імітації, кожен клієнт генерує з вказаною ймовірністю наявність пакету даних а також генерує випадкового отримувача пакету даних. Вибір отримувача пакету теж повинне мати фрактальну природу (для завантаження великого об'єму інформації звернення до одного й того джерела є високоймовірним, а при проведенні сканування мережі – запити гарантовано будуть переходити по клієнтам по черзі). Проблема генерування фракталоподібного трафіку розв'язується генераторами на основі розподілу Парето, проте обрання отримувача пакету проводиться за допомогою простого рівномірного розподілу для відомих авторам системам імітації. Причиною цього є незастосовність розподілу Парето для імітування обрання отримувача інформаційного пакету.

Процес моделювання проводиться за програмними "квантами часу", коли відбувається передача одного пакету фіксованої величини та обробка фіксованої кількості пакетів з черги. Якщо кілька пакетів претендують на перехід до одного й того

ж приймача, то надсилається лише той, що перший надійшов до системи. При переповненій черзі можна використовувати два варіанти: скидати “старі” пакети з черги, або блокувати приймання нових пакетів з джерел трафіку.

В процесі виконання моделювання заплановано порівняння теоретичних передбачень з експериментально визначеними величинами як для максимально повного так і для усіченого розподілу Парето, яке використано для генерування трафіку набором клієнтів. При цьому обмеження пропускної спроможності окремих каналів враховано в реалізації генератора трафіку в разі використання усіченого варіанту розподілу.

Класично розподіл щільності ймовірності Парето представлено аналітично наступним чином:

$$f_X(x) = \begin{cases} \dfrac{k \cdot x_m^k}{x^{k+1}}, x \geq x_m \\ 0, x < x_m \end{cases}, \quad (1)$$

де x – випадкова величина; x_m>0, k>0 – параметри розподілу; $kx_m/(k\text{-}1)$ – математичне очікування при k>1. Для цього розподілу дисперсія при 1<k<2 прямує до нескінченності.

Генерування фрактальноподібної числової послідовності на основі скінченного автомату. Для генерування фракталоподібного телеграфного сигналу пропонується використовувати скінченний автомат, граф якого показано на рис. 3. На рисунку використано наступні умовні позначення: «0» та «1» – стани автомату, коли на вихід подається відповідне значення; λ_i – ймовірність відповідного переходу; p_0 та p_1 – ймовірності знайти систему у відповідному стані у випадковий момент часу.

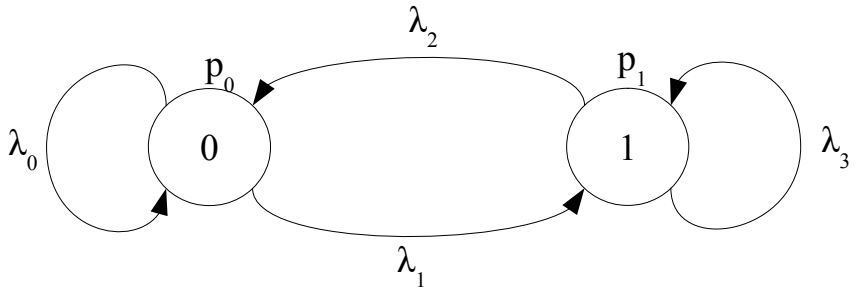


Рисунок 3 – Модель генератора фракталоподібного трафіку на скінченному автоматі
Джерело: [4]

Скінчений автомат має два стани «0» та «1», при цьому ймовірність переходу від «0» до «1» та від «1» до «0» в загальному випадку можуть бути різними. Для ймовірностей переходів λ повинні виконуватися наступні вимоги:

$$\begin{cases} \lambda_0 + \lambda_1 = 1 \\ \lambda_2 + \lambda_3 = 1 \end{cases}. \quad (2)$$

При умові λ_1=λ_2, граф стає симетричним і ймовірності p_0=p_1=0.5 – при довгочасному спостеріганні система знаходиться рівно ймовірно в одному з станів. В такому випадку математичне очікування генерованого ряду є M=0.5, а дисперсія – D=0.25. Хоч генерування наступного значення й залежить від попереднього значення, статистичні величини співпадають і для ряду незалежних випробувань. Доведемо це твердження аналітично.

Для графу рис. 3 справедливі наступні диференціальні рівняння відносно ймовірності станів системи:

$$\begin{cases} \dfrac{dp_0(t)}{dt} = -\lambda_1 p_0(t) + \lambda_2 p_1(t) - \lambda_0 p_0(t) + \lambda_0 p_0(t), \\ \dfrac{dp_1(t)}{dt} = \lambda_1 p_0(t) - \lambda_2 p_1(t) - \lambda_3 p_1(t) + \lambda_3 p_1(t). \end{cases} \quad (3)$$

Якщо врахувати, що знаходження системи в одному зі станів є гарантованою подією $p_0+p_1=1$ та використати умові стаціонарності процесу в часі (коли ймовірності вже не змінюють свого значення і їх похідні рівні нулеві), перетворення системи (3) дає наступну систему:

$$\begin{cases} \lambda_1 p_0(t) - \lambda_2 p_1(t) = 0, \\ p_0(t) + p_1(t) = 1. \end{cases} \quad (4)$$

З останньої системи можна отримати ймовірності перебування системи у станах «0» та «1» (5):

$$p_0 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}; p_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}. \quad (5)$$

Якщо врахувати умову симетричності графу $\lambda=\lambda_1=\lambda_2$, то ймовірності можна виразити наступним чином (6):

$$(\lambda = \lambda_1 = \lambda_2) \Rightarrow \left(p_0 = \frac{\lambda}{\lambda + \lambda}; p_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \lambda} \right) \Rightarrow (p_0 = p_1 = 0.5). \quad (6)$$

За означенням математичного сподівання та дисперсії ми матимемо аналогічні значення, як і для незалежних випробувань генерування «0» та «1» з рівними ймовірностями: $M(x)=0.5$, $D(x)=0.5$. Проте для моделювання роботи систем обслуговування, більш впливовий результат має розподіл ймовірності часткових сум генерованих послідовностей, на яку й покажемо значний вплив фрактальної розмірності отриманих послідовностей.

Оцінка статистичних властивостей часткових сум генерованих послідовностей. З метою обґрунтування доцільності теоретичних досліджень потрібно провести експериментальне підтвердження формування фрактального трафіку на часткових сумах. Для цього було створене програмне забезпечення для генерування псевдовипадкових чисел «0» та «1». На основі використаного генератора побудовано 100 сум по 100 елементів в кожній. Результати моделювання показано на рис. 4. Як і очікувалося, в цьому випадку сума в середньому склала значення близьке до $M(S)=49.42$ (теоретично 50) з дисперсією $D(S)=24.04$ (теоретично 25). Тепер потрібно пересвідчитися в порушенні значення дисперсії при використанні генератора на скінченому автоматі.

Перший дослід проведено з генератором для якого ймовірність змінити стан на протилежний складає $\lambda=0.5$. Результати показано на рис. 5. Розрахунок математичного очікування суми отриманих елементів є $M(S_{0.5})=49.75$, дисперсія складає $D(S_{0.5})=28.15$. Отримані результати є близькими до теоретичних, які отримано в разі використання незалежних випробувань. В якості висновку можна стверджувати, що при $\lambda=0.5$ генератор на скінченому автоматі є аналогом генератора випадкових чисел.

Для наочності результатів далі проведено досліди при значеннях ймовірності змінити стан λ значно відмінних від 0.5, а саме при $\lambda=0.05$ та $\lambda=0.95$.

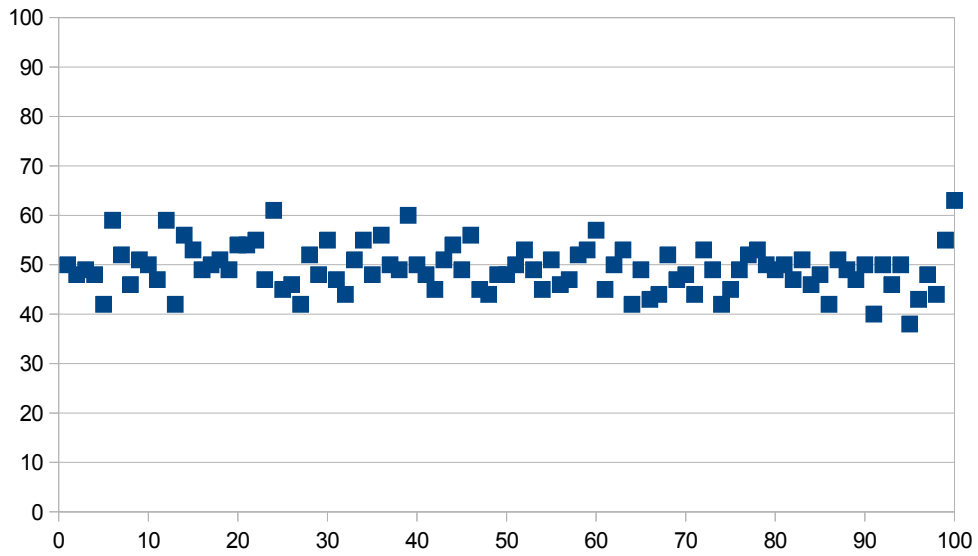


Рисунок 4 – Випробування з отримання часткових сум зі 100 послідовних значень при незалежних випробуваннях M(S)=49.42, D(S)=24.04

Джерело: розроблено автором

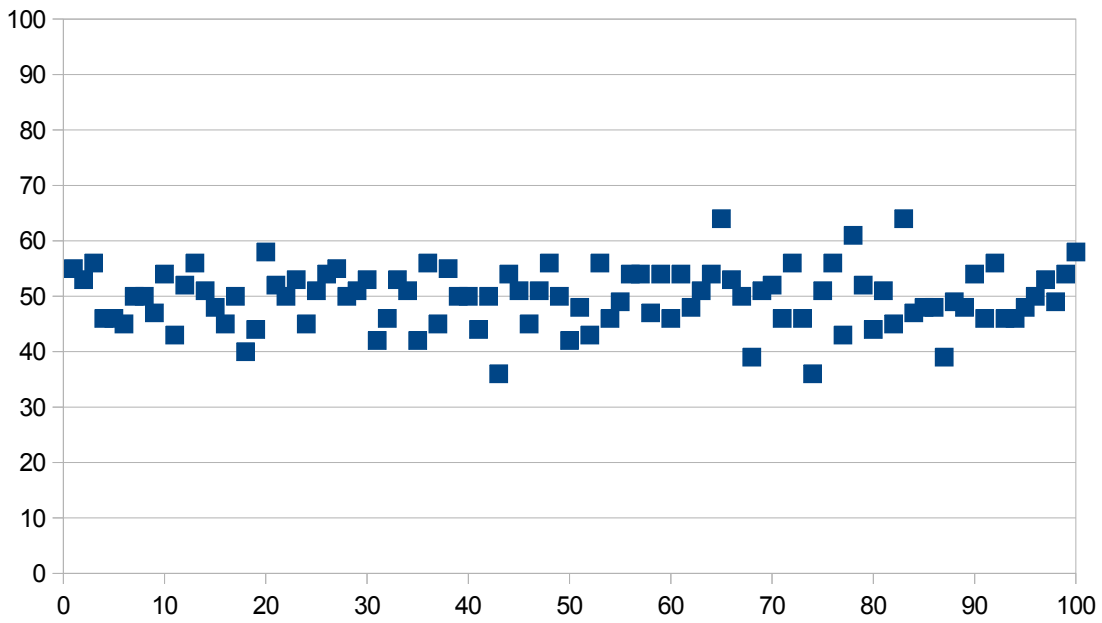


Рисунок 5 – Випробування з отримання часткових сум зі 100 послідовних значень при λ=0.5, M(S0.5)=49.75, D(S0.5)=28.15

Джерело: розроблено автором

Експеримент при високій ймовірності системи змінити свій стан (λ=0.95), генерований ряд має вкрай малу чисельність довгих серій з «1» та «0». Графік такої послідовності насичений високочастотними складовими, й намагається змінити попередню динаміку – ряд є антиперсистентним. Графік результату рахування 100 генерованих значень показаний на рис. 6. Цей графік характерний тим, що отримані суми мало відрізняються від математичного очікування, дисперсія суми є малою: $M(S_{0.95})$=50.26, $D(S_{0.95})$=1,31.

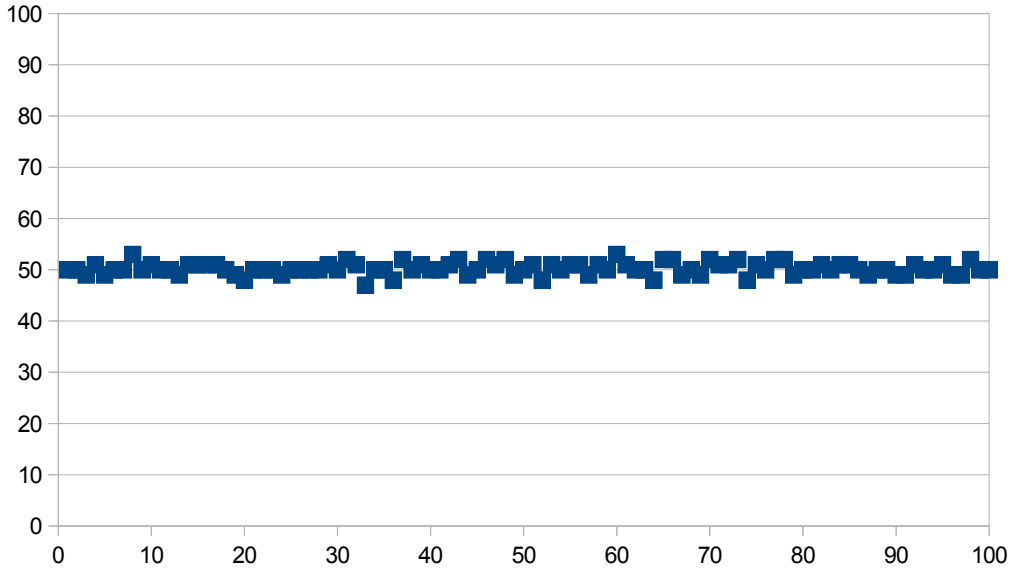


Рисунок 6 – Випробування з отримання часткових сум зі 100 послідовних значень при λ=0.95, M(S0.95)=50.26, D(S0.95)=1,31

Джерело: розроблено автором

Натомість дослід для малої ймовірності переходу в інший стан (λ=0.05), показує наявність довгих серій, які складаються лише з «0» або «1». При цьому суми рядів по 100 значень розкидані по всьому дозволеному діапазоні (рис. 7).

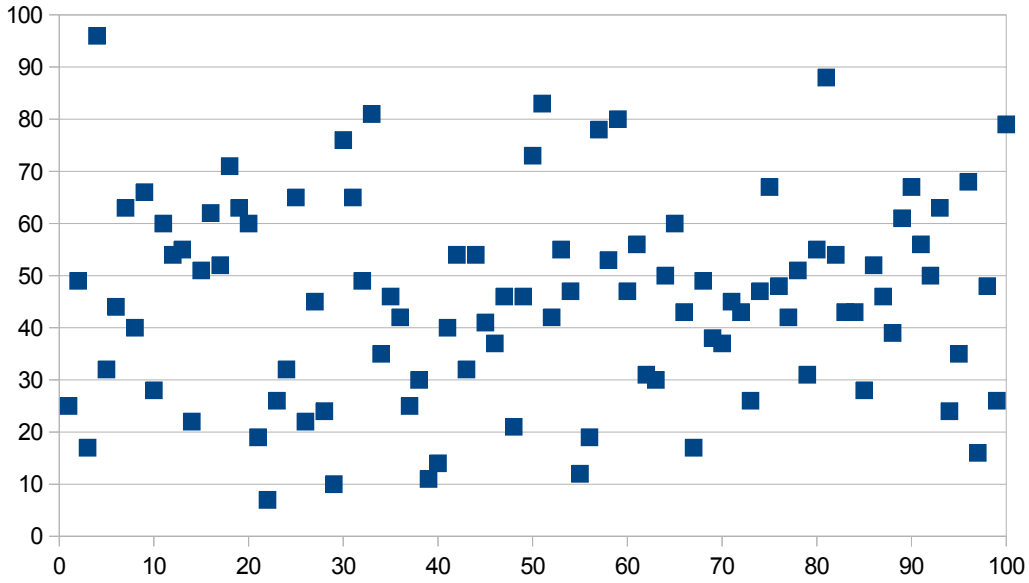


Рисунок 7 – Випробування з отримання часткових сум зі 100 послідовних значень при λ=0.05 M(S0.05)=45.46, D(S0.05)=360.68

Джерело: розроблено автором

В результаті математичне очікування суми ряду є незмінним (в межах статистичної похибки) $M(S_{0.05})$=45.46, а дисперсія приймає досить значну величину: $D(S_{0.05})$=360.68.

Відповідно до побудованих графіків до експериментального генерування псевдовипадкових послідовностей, можна зробити висновок про наявність

фрактальності в побудованих послідовностях. Тому задача теоретичної оцінки фрактальної розмірності послідовності, яку надає генератор, є актуальною.

Висновки. У даній роботі для реалізації методу генерування фрактальноподібної числової послідовності на основі скінченного автомату для моделювання трафіку у мережі були вирішені наступні завдання: показано актуальність задачі створення генераторів фрактальних бінарних послідовностей без використання нескінченних розподілів; запропоновано використати генератор фрактальної бінарної послідовності на основі скінченного автомату; показано можливість попереднього визначення фрактальної розмірності генерованого трафіку при інтенсивності λ=0.5. У подальшому потрібно продовжити роботу у наступних напрямках:

– провести аналітичні оцінки показника Херста генерованої бінарної послідовності при інтенсивності трафіку λ=0.5;

– показати варіативність фрактальної розмірності бінарної послідовності й при інших інтенсивностях λ;

– вивести аналітичні вирази для отримання параметрів генератора з заданою густиною вихідних бітів з керуванням їх фрактальної розмірності;

– покращити аналітичні оцінки та їх узагальненням на довільну інтенсивність генерованого трафіку.

Список літератури

1. Броек Д.. Основы механики разрушения. Высшая школа, Москва, 1980./ Перевод Дорофеева Виктора Ивановича (Broek D. Elementary engineering fracture mechanics, Лейден, 1974).
2. Ушанев К.В. Имитационные модели системы массового обслуживания типа *P*a/*M*/1, H2/*M*/1 и исследование на их основе качества обслуживания трафика со сложной структурой. *Системы управления, связи и безопасности*. 2015. №4. С.217-251.
3. Добровольский Е.В., Нечипорук О.Л. Моделирование сетевого трафика с использованием контекстных методов. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова.* 2005. № 1. С.24-32.
4. Семенов С.Г., Мелешко Е.В., Илюшко Я.В. Математическая модель мультисервисного канала связи на основе экспоненциальной GERT-сети. *Системи озброєння і військова техніка*, ХУПС, 2011. № 3(27). С.64-67.
5. Tamara Radivilova, Yousef Ibrahim Daradkeh, Lyudmyla Kirichenko. Development of QoS Methods in the Information Networks with Fractal Traffic. *International Journal of Electronics and Telecommunications*. 2018. 64 (1). P. 27-32.
6. Mahdi Barat, Zadeh Joveini, Javad Sadri, Hoda Alavi Khoushhal. Fractal Modeling of Big Data Networks. *International Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence (ICPRAI 2018)*. Canada, Montreal: Concordia University. 2018. P. 1-4.
7. Jiang D., Huo L., Li Y. Fine-granularity inference and estimations to network traffic for SDN. PLoS ONE 2018, 13(5). Doi.org/10.1371/journal.pone.0194302.
8. Bulakh V., Kirichenko L., Radivilova T. Time Series Classification Based on Fractal Properties. *International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP):* in Proceedings of the 2018 IEEE Second, 21–25 August 2018, Lviv, 2018. P. 198–201. Doi:10.1109/DSMP.2018.8478532.
9. Youri Raaijmakers, Hansjoerg Albrecher, Onno Boxma. The single server queue with mixing dependencies, 2017. February 6. (http://www.hec.unil.ch/halbrech_files/QueueMixing.pdf).
10. Xie K., Peng C, Wang X., Xie G., Wen J. Accurate recovery of internet traffic data under dynamic measurements, in Proc. of INFOCOM'17. 2017. P. 1–9.
11. Wang C, Maguluri S T, Javidi T. Heavy traffic queue length behavior in switches with reconfiguration delay, in Proc. of INFOCOM'17. 2017. P. 1–9.
12. Xie G, Xie K, Huang J, Wang X, Chen Y., Wen J. Fast low-rank matrix approximation with locality sensitive hashing for quick anomaly detection, in Proc. of INFOCOM'17. 2017. P. 1–9.
13. Tatamikova Tatiana Mikhailovna, Kutuzov Oleg Ivanovich. Evaluation and comparison of classical and fractal queuing systems. *XV International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems.* 2016. P.155 – 157.

14. Czarkowski Michał, Kaczmarek Sylwester, Wolff Maciej. Influence of Self -Similar Traffic Type on Perform ance of QoS Routing Algorithms. *INTL Journal of electronics and telecommunications*. 2016. Vol. 62, no. 1. P. 81-87.
15. Lakhmi Priya Das, Sanjay Kumar Patra, Sarojananda Mishra. Impact of hurst parameter value in self-similarity behaviour of network traffic. *International Journal of Research in Computer and Communication Technology*. 2016. Vol 5, no 12. P.631-633.
16. Hae-Duck Joshua Jeong. Modelling of self-similar teletraffic for simulation. University of Canterbury. July 2002. 270 p.
17. Кучук Г. А, О., Можаєв О., Воробйов О. В. Метод прогнозування фрактального трафіка. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи.* 2006. №6,.С. 181–188. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2006_6_34.
18. Кучук Г. А, Можаєв О. О., Воробйов О. В. Прогнозирование трафика для управления перегрузками интегрированной телекоммуникационной сети. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2007. № 8. С. 261–271. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2007_8_48.
19. Кучук Г. А., Можаєв О. О., Воробйов О. В. Аналіз та моделі самоподібного трафіка. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2006. № 9. С. 173–180. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2006_9_35.
20. Коваленко А. А., Кучук Г. А., Можаев А. А. Построение экспоненциальных временных шкал при анализе очередей мультисервисных сетей. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2010. № 7. С. 257–262. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2010_7_52.

References

1. Broek, D. (1980). *Osnovyi mehaniki razrusheniya*. Moskva: Vyisshaya shkola. Perevod Dorofeeva Viktora Ivanovicha. (1974). Leyden: Elementary engineering fracture mechanics [in Russian].
2. Ushanev, K.V. (2015). Imitatsionnyie modeli sistemyi massovogo obsluzhivaniya tipa Pa/M/1, H2/M/1 i issledovanie na ih osnove kachestva obsluzhivaniya trafika so slozhnoy strukturoy. *Sistemyi upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, *4*, 217-251 [in Russian].
3. Dobrovolskiy, E.V. & Nechiporuk, O.L. (2005). Modelirovanie setevogo trafika s ispolzovaniem kontekstnyih metodov. *NaukovI pratsI ONAZ Im. O.S. Popova*, *1*, 24-32 [in Russian].
4. Semenov, S.G., Meleshko, E.V. & Ilyushko, Ya.V. (2011). Matematicheskaya model multiservisnogo kanala svyazi na osnove eksponentsialnoy GERT-seti. *Sistemi ozbroEnnya I vIyskova tehnIka, HUPS*, *3(27)*, 64-67 [in Russian].
5. Tamara Radivilova, Yousef Ibrahim Daradkeh & Lyudmyla Kirichenko. (2018). Development of QoS Methods in the Information Networks with Fractal Traffic. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, *64 (1)*, 27-32 [in English].
6. Mahdi Barat, Zadeh Joveini, Javad Sadri & Hoda Alavi Khoushhal (2018). Fractal Modeling of Big Data Networks. *International Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence (ICPRAI 2018)*. Canada, Montreal: Concordia University, 1-4 [in English].
7. Jiang, D., Huo, L. & Li, Y. (2018). Fine-granularity inference and estimations to network traffic for SDN. PLoS ONE, 13(5). Doi.org/10.1371/journal.pone.0194302 [in English].
8. Bulakh, V., Kirichenko, L. & Radivilova, T. (2018). Time Series Classification Based on Fractal Properties. *International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP): in Proceedings of the 2018 IEEE Second, 21–25 August*. Lviv. (pp. 198–201). Doi:10.1109/DSMP.2018.8478532 [in English].
9. Youri Raaijmakers, Hansjoerg Albrecher & Onno Boxma. (2017) The single server queue with mixing dependencies February 6. (http://www.hec.unil.ch/halbrech_files/QueueMixing.pdf) [in English].
10. Xie, K., Peng, C, Wang, X., Xie, G. & Wen, J. (2017). Accurate recovery of internet traffic data under dynamic measurements, in Proc. of INFOCOM'17, (pp. 1–9) [in English].
11. Wang, C, Maguluri, S T & Javidi, T. (2017). Heavy traffic queue length behavior in switches with reconfiguration delay, in Proc. of INFOCOM'17, (pp. 1–9) [in English].
12. Xie, G, Xie, K, Huang, J, Wang, X, Chen, Y. & Wen, J. (2017). Fast low-rank matrix approximation with locality sensitive hashing for quick anomaly detection, in Proc. of INFOCOM'17, (pp. 1–9) [in English].
13. Tatamikova Tatiana Mikhailovna & Kutuzov Oleg Ivanovich. (2016). Evaluation and comparison of classical and fractal queuing systems. *XV International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems,* 155 – 157 [in English].

14. Czarkowski Michał, Kaczmarek Sylwester & Wolff Maciej. (2016). Influence of Self -Similar Traffic Type on Perform ance of QoS Routing Algorithms. *INTL Journal of electronics and telecommunications*, *Vol. 62, 1,* 81-87 [in English].
15. Lakhmi Priya Das, Sanjay Kumar Patra (2016). Sarojananda Mishra. Impact of hurst parameter value in self-similarity behaviour of network traffic. *International Journal of Research in Computer and Communication Technology*, *Vol 5, 12*, 631-633 [in English].
16. Hae-Duck Joshua Jeong. (2002). *Modelling of self-similar teletraffic for simulation.* University of Canterbury [in English].
17. Kuchuk, G. A, MozhaEv, O. O. & Vorobyov, O. V. (2006). Metod prognozuvannya fraktalnogo trafIka. *RadIoelektronnI I komp'yuternI sistemi*, *6*, 181–188. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2006_6_34 [in English].
18. Kuchuk, G. A, MozhaEv, O. O. & Vorobyov, O. V. (2007). Prognozirovanie trafika dlya upravleniya peregruzkami integrirovannoy telekommunikatsionnoy seti. *RadIoelektronnI I komp'yuternI sistemi*, *8*, 261–271. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2007_8_48 [in Russian].
19. Kuchuk, G. A., MozhaEv, O. O. & Vorobyov, O. V. (2006). AnalIz ta modelI samopodIbnogo trafIka. *Aviatsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya*, *9*, 173–180. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2006_9_35 [in English].
20. Kovalenko, A. A., Kuchuk, G. A. & Mozhaev, A. A. (2010). Postroenie eksponentsialnyih vremennyih shkal pri analize ocheredey multiservisnyih setey. *RadIoelektronnI I komp'yuternI sistemi*, *7*, 257–262. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2010_7_52 [in Russian].

Hanna Drieieva, teacher, **Oleksii Smirnov,** Prof., Doct. of Eng., **Oleksandr Drieiev,** PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

The Method of Generating a Fractally Similar Numerical Sequence Based on a Finite Automaton for Modeling Traffic in a Network

In this paper, the problem of presentation of traffic, for modeling its behavior when loading computer networks is considered. It is determined that traffic in computer networks on certain scales is fractal-like and at the same time the classical laws of calculation of parameters of a mass service system give false results.

The subject of study in the article is a method of generating a fractal numerical sequence based on a finite automaton for modeling traffic in a network. The purpose of the work is to create a generator of fractal binary sequences based on a finite automaton and to use the method of generating a fractal numerical sequence based on a finite automaton for modeling traffic in a network. To do this, the following tasks were solved: Fractal traffic was built using the proposed random number generator, its defects were determined; the place of the fractal traffic generator in the simulation systems is determined; the generation of a fractal numerical sequence on the basis of a finite automaton was performed; The statistical properties of partial sums of generated sequences are estimated. The result of the work is the implementation of the method of generating a fractal numerical sequence based on a finite automaton for modeling traffic in the network.

The relevance of the problem of creating generators of fractal binary sequences without the use of infinite distributions is shown; it is suggested to use a generator of a fractal binary sequence based on a finite automaton; the possibility of preliminary determination of the fractal dimension of the generated traffic with intensity $\lambda = 0.5$ is shown. Further directions of research, which consist in solving the following tasks, are determined: to carry out analytical estimations of the Hurst index of generated binary sequence with the traffic intensity $\lambda = 0.5$; show the variability of the fractal dimension of the binary sequence and with other intensities λ; output analytical expressions for generator parameters with a given output bits density with the control of their fractal dimension; improve analytical ratings and generalize them to the arbitrary intensity of generated traffic.

fractal binary sequence generator, traffic, computer networks

Одержано (Received) 08.02.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 10.04.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

УДК 004.78:004.056 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).184-194

Т.В. Смірнова, канд. техн. наук, **Є.К. Солових,** проф., д-р техн. наук,
О.А. Смірнов, проф., д-р техн. наук, **О.М. Дрєєв,** канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
e-mail: sm.tetyana@gmail.com, dr.SmirnovOA@gmail.com, drey.sanya@gmail.com

Побудова хмарних інформаційних технологій оптимізації технологічного процесу відновлення та зміцнення поверхонь деталей

У даній роботі розглядається проблематика оптимізації технологічного процесу відновлення та зміцнення поверхонь деталей в умовах гнучкої зміни параметрів проведення технологічних операцій. Для цього треба розробити відповідну інформаційну технологію у вигляді рекомендаційної системи, яка дозволяє обрати оптимізований ланцюг технологічних процесів, які у свою чергу дозволяють за заданими критеріями реалізувати технологічний процес відновлення та зміцнення поверхонь деталей. Виходячи з широкого розповсюдження Інтернету, та застосування його у сучасному виробництві, дана технологія пропонується у вигляді хмарного сервісу. Предметом вивчення у статті є хмарна інформаційна технологія оптимізації технологічного процесу відновлення та зміцнення поверхонь деталей. Метою роботи відповідно є побудова хмарної інформаційної технології оптимізації технологічного процесу відновлення та зміцнення поверхонь деталей із заданими характеристиками на основі комбінації декількох технологічних процесів. Для цього у даній роботі була розв'язана наступна низка задач: проведений огляд відомих експертних систем оптимізації технологічного процесу та їх приведення до абстрактного вигляду, для цього був представлений рух інформації в експертній системі оптимізації технологічних процесів, яка побудована на базі аналізу процесу електродугового напилення; формалізовано підмножини абстрактних експертних систем оптимізації технологічного процесу; формалізовано рекомендаційні системи для забезпечення оптимізації ланцюга технологічного процесу, як надбудови експертної системи над експертними системами окремих технологічних процесів. Результатами роботи є інформаційна технологія оптимізації технологічного процесу відновлення та зміцнення поверхонь деталей як хмарний сервіс. Висновки: в роботі у сукупності запропонована інформаційна технологія вирішення задачі побудови оптимізованого ланцюга технологічних процесів відновлення та зміцнювання поверхонь валів, з вибором більш оптимального процесу серед альтернативних, у вигляді хмарного сервісу.
інформаційні технології, експертні системи, відновлення, зміцнення, деталь, технологічний процес

Т.В. Смирнова, канд. техн. наук, **Е.К. Соловых**, проф.,д-р техн. наук, **А.А. Смирнов**, проф., д-р техн. наук, **А.Н. Дреев,** канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницький, Украина

Построение облачных информационных технологий оптимизации технологических процессов восстановления и упрочнения поверхностей деталей

В данной работе рассматривается проблематика оптимизации технологического процесса восстановления и упрочнения поверхностей деталей в условиях гибкого изменения параметров проведения технологических операций. Для этого необходимо разработать соответствующую информационную технологию в виде рекомендательной системы, которая позволяет выбрать оптимизированный цепь технологических процессов, которые в свою очередь позволяют по заданным критериям реализовать технологический процесс восстановления и упрочнения поверхностей деталей. Исходя из широкого распространения Интернета, и применение его в современном производстве, данная технология предлагается в виде облачного сервиса. Предметом изучения в статье является облачная информационная технология оптимизации технологического процесса восстановления и упрочнения поверхностей деталей. Целью работы соответственно являются построение облачной информационной технологии оптимизации технологического процесса восстановления и упрочнения поверхностей деталей с заданными характеристиками на основе комбинации нескольких технологических процессов.

© Т.В. Смірнова, Є.К. Солових, О.А. Смірнов, О.М. Дрєєв, 2019

Для этого в данной работе был решен следующий ряд задач: проведен обзор известных экспертных систем оптимизации технологического процесса и их приведение к абстрактному виду, для этого было представлено движение информации в экспертной системе оптимизации технологических процессов, построенных на базе анализа процесса электродугового напыления; формализовано подмножество абстрактных экспертных систем оптимизации технологического процесса; формализованы рекомендательные системы для обеспечения оптимизации цепи технологического процесса, как надстройки экспертной системы над экспертными системами отдельных технологических процессов. Результатами работы является информационная технология оптимизации технологического процесса восстановления и упрочнения поверхностей деталей как облачный сервис. Выводы: в работе в совокупности предложена информационная технология решения задачи построения оптимизированной последовательности технологических процессов восстановления и упрочнения поверхностей валов, с выбором более оптимального процесса среди альтернативных, в виде облачного сервиса.
информационные технологии, экспертные системы, восстановления, укрепления, деталь, технологический процесс

Постановка проблеми. Сучасний розвиток науки вимагає застосування новітніх інформаційних технологій майже в усіх галузях виробництва. Це застосовується також й для підвищення якості виробництва тих, або інших деталей. У даній роботі розглядається проблематика оптимізації технологічного процесу відновлення та зміцнення поверхонь деталей. Для цього треба розробити відповідну інформаційну технологію у вигляді рекомендаційної системи, яка дозволяє обрати оптимізований ланцюг технологічних процесів, які дозволяють за заданими критеріями реалізувати технологічний процес відновлення та зміцнення поверхонь деталей. Досягнення поставленої мети вимагає розв'язання низки задач, однак для їх формулювання та визначеності в застосовуваних хмарних інформаційних технологіях, потрібно визначити види та область застосування експертних та рекомендаційних систем для забезпечення оптимізації ланцюга технологічних процесів. Виходячи з широкого розповсюдження Інтернету, та застосування його у сучасному виробництві, дана технологія пропонується у вигляді хмарного сервісу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В теперішній час активно розроблюються інформаційні системи (ІС) підтримки прийняття рішень для забезпечення оптимізації окремих технологічних процесів (ТП) [1]. Систем для вирішення задачі побудови оптимізованого ланцюга ТП та систем вибору більш оптимального ТП не вистачає [2]. Аналіз останніх досліджень та публікацій [3-16] показав, що питання застосування інформаційних технологій у вигляді відповідних інформаційних систем в технологічних процесах дуже актуальне. Крім того, з розвитком комп'ютерних технологій зростає актуальність використання хмарних технологій в реалізації ІС. Тому проблема оптимізації ланцюга ТП в інформаційному забезпеченні експертних систем (ЕС) у вигляді хмарного сервісу актуальна.

Постановка завдання. Таким чином, метою даної роботи є побудова хмарної інформаційної технології оптимізації ТП відновлення та зміцнення поверхонь деталей із заданими характеристиками на основі комбінації декількох ТП.

Виклад основного матеріалу.

Досягнення поставленої мети вимагає розв'язання низки задач Для їх формулювання та визначеності в застосовуваних хмарних інформаційних технологіях потрібно почати з визначення виду та області застосування експертних та рекомендаційних систем для забезпечення оптимізації ланцюга ТП.

Огляд відомих ЕС оптимізації ТП та приведення їх до абстрактного вигляду. В роботі [3], представлено розробку ІС підтримки рішень, до складу якої входить ЕС з оптимізації металорізальних ТП, інформаційна модель якої показана на рис. 1.

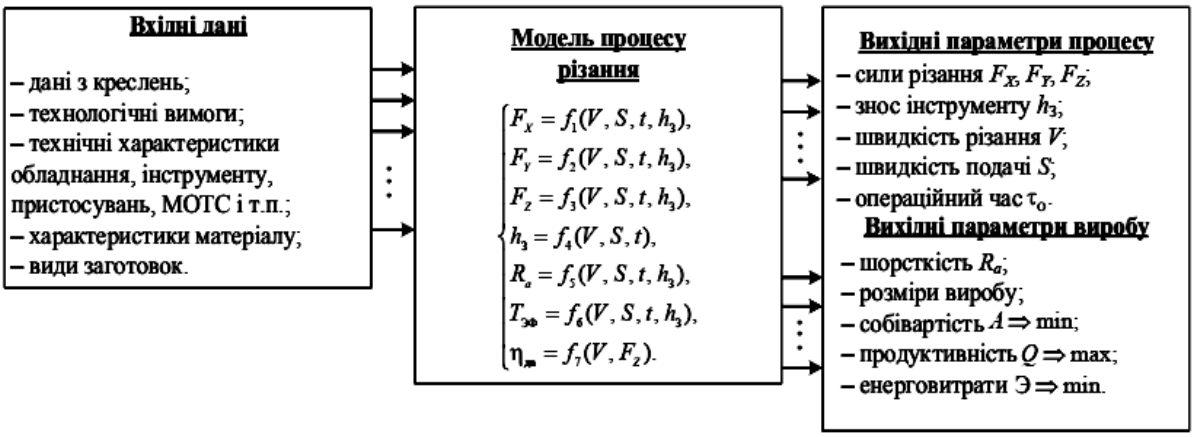


Рисунок 1 – Модель процесу різання

Джерело: [3]

З рис. 1 можливо побачити, що модель містить функції-моделі металорізального процесу, розрахунки параметрів, які можна включити до оптимізації, виділені вхідні та вихідні дані. При цьому до вхідних даних відносяться вимоги до результату обробки та обмеження на ресурси, а до вихідних даних віднесено параметри ТП та параметри отриманого виробу з витратами на його виробництво.

Аналогічний підхід можливо застосувати для технологічного процесу відновлення та зміцнення поверхонь деталей. Для цього представимо ЕС оптимізації ТП та приведемо її до абстрактного вигляду, у вигляді, який відображений на рисунку 2.

Нехай маємо математичну модель технологічного процесу k відновлення поверхонь, яку позначимо наступним чином:

$$\vec{Y}_k = f\left(\vec{X}_k, \vec{V}_k, \vec{Z}_k, \vec{R}_k\right), \tag{1}$$

де $\vec{Y}_k \in Y$ – кількісні значення підмножини характеристик поверхонь, яка отримана за результатами технологічного процесу k;

$\vec{X}_k \in X$ – кількісні значення підмножини відомих та контрольованих параметрів окремого технологічного процесу з усіх доступних;

$\vec{V}$ – відомі але не контрольовані величини процесу;

$\vec{Z}$ – невідомі та не контрольовані величини;

$\vec{R}$ – випадкові величини, що впливають на процес;

$\vec{Y}$ – параметри, які досягаються в процесі технологічної обробки.

Випадкова складова є не контрольованою, тому в моделях часто ними нехтують, але в процесі оцінювання адекватності моделі обов’язково робиться пошук надійних інтервалів очікуваних величин з реальними результатами.. Відповідно до цього, з причини того, що в загальному випадку невідома кількість даних для побудови математичної моделі технологічного процесу, неможливо заздалегідь визначити методи її побудови. Для цього потрібно доповнити модель додатковими даними та засобами побудов математичних моделей M.

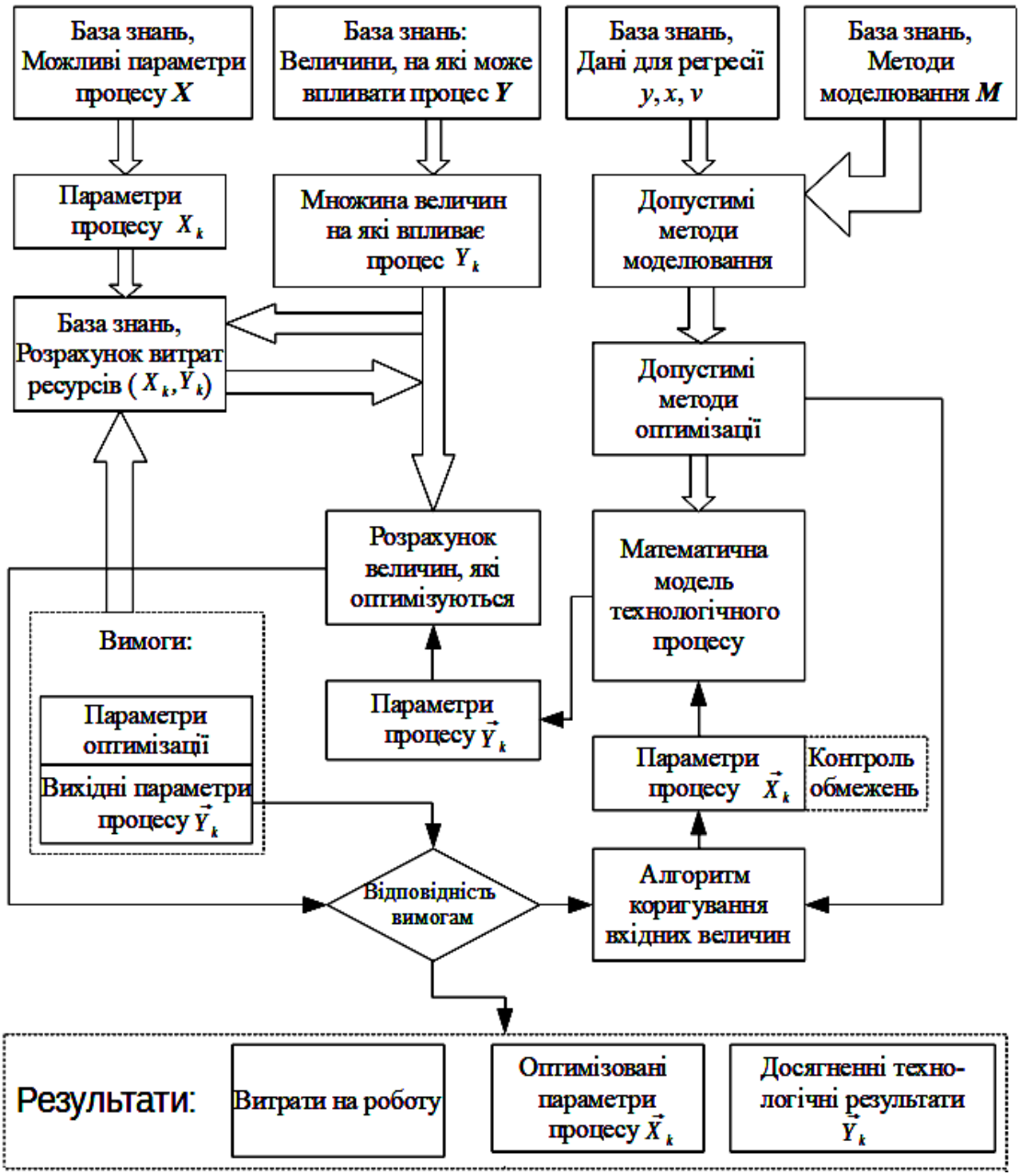


Рисунок 2 – Діаграма потоку інформації в реалізації узагальненої *k*-ї ЕС оптимізації ТП
Джерело: [3]

Множина застосовних методів побудови математичних моделей процесу позначатиметься $\vec{M}_k \in M$ і буде залежною від наявного набору даних для побудови моделей (2):

$$\vec{M}_k = C\left[M, y \underline{\underline{def}} Y_k, x \underline{\underline{def}} X_k, v \underline{\underline{def}} V_k\right], \tag{2}$$

де def визначає операцію відбору відомих значень які будуть використані для побудови математичної моделі. Таке визначення вибору множини методів побудови математичних моделей обґрунтовано тим, що при великій кількості даних можна для регресії використати методи на основі апроксимацій або нейронні мережі. При малому наборі даних вибір звужується до вибору між методом найменших квадратів, сплайнів або інтерполяційних операцій. Відповідно до цього, операція фільтрування допустимих

методів (2) є необхідною, і при доповненні бази знань, методи математичного моделювання можуть змінюватися. Вибір методу з допустимих F може бути покладено на людину або виконуватися автоматично за заздалегідь внесеними пріоритетами. Фактично, експертна система міститиме в собі вкладену експертну систему математичного моделювання та алгоритмів пошуку максимумів та мінімумів на ній. Результатом дії такої системи є готова математична модель (3):

$$f : \left[\vec{M}_k, y, x, v \right], \tag{3}$$

де f – функція яка використана в (1).

Нерідко технологічні процеси є складовими складних, багатоетапних, технологій відновлення або зміцнення поверхонь деталей. В такому випадку поверхня під час обробки не приймає на виході значення Y_k, а відбувається перетворення властивостей поверхні $\vec{Y}_k \to \vec{Y}_{k+1}$, при цьому на результат можуть впливати вхідні властивості, як при шліфуванні, або можуть й не впливати, як при електродуговому напиленні. Тому для узагальненої моделі технологічного процесу, модель (1) потрібно доповнити явно вхідними параметрами поверхні, що з врахуванням (2) та (3) надає наступний вираз:

$$\vec{Y}_k = F\left[C\left[M, y, x, v\right]\right]\left(\vec{X}_k, \vec{V}_k, \vec{Z}_k, \vec{R}_k, \vec{Y}_{k-1} \right). \tag{4}$$

Таким чином, на рис. 2 представлено рух інформації в ЕС оптимізації ТП, яка побудована на базі аналізу процесу електродугового напилення (ЕДН), також присутній коловий рух інформації з перевіркою досягнення заданих умов.

Наявність такого циклу в ряді методів пошуку оптимуму присутній і процесах металорізання (рис. 3).

Рисунок 3 – Схема оптимізації ТП металообробки

Джерело: [3]

Це свідчить про те, що узагальнення ТП, принаймні, дозволить отримати ІС для операцій відновлення поверхонь деталей, так і для операцій, які використовують обробку різанням.

Формалізація підмножини абстрактних ЕС оптимізації ТП. На основі математичного співвідношення (4) та діаграми потоку інформації в узагальненій ЕС ТП (рис. 2), проведемо формалізацію.

Для цього використаємо наступні позначення множин, які формують базу знань для ряду ТП: $S = \langle X, Y, V, M, P, D, G \rangle$, яка включає в себе операцію виділення підмножин елементів, що стосуються окремої технологічної операції *k*:

– X_k – множина керованих параметрів ТП *k*;

– Y_k – множина параметрів деталі, які контролює або змінює ТП *k*;

– V_k – множина параметрів які не керуються, але потрібно враховувати при виконанні ТП *k*;

– M_k – множина методів отримання математичної моделі ТП *k*;

– $P(m)$, $m \subset P(M_k)$ – обраний екземпляр з методів оптимізації, який застосовний для вказаних математичних моделей, R – операція вибору методу з множини методів. Операція вибору може проводитися автоматично або за вибором розробника ЕС;

– D_k – множина функцій розрахунку матеріальних, в тому числі й часових витрат на здійснення ТП *k*, за якими може проводитися процес оптимізації. Сюди ж входять лінійні або більш складні комбінації для отримання остаточної багатофакторної вагової оптимізаційної функції;

– G_k – множина матеріальних ресурсів, які використовує ТП.

Знаком вектору визначаємо конкретний кортеж реальних величин, які відповідають множині обраних величин та характеристик. Тоді за рис. 2 матимемо наступні співвідношення для окремого ТП *k* (5):

$$\begin{cases} \vec{X}_k = m\left(\vec{Y}_k, \vec{V}_k, \vec{Y}_{k-1}, \vec{G}_k\right), \\ \vec{G}_k = D_k\left(\vec{X}_k, \vec{V}_k\right), \\ \left|\vec{G}_k\right| \to \min, \\ \left|\vec{G}_k\right| = \infty, \text{ якщо } \vec{Y}_{k-1} \notin Y_k \end{cases} \tag{5}$$

Тут значення нормування має більш широке значення, яке приймає зміст виділення скаляру з вектору матеріальних витрат. Метод виділення скаляру може сильно відрізнятися в залежності від обраного ТП, але в більшості випадків з цю операцію можна прийняти лінійну комбінацію матеріальних та часових витрат. В разі потреби досягнення максимальності одного з показників, пропонується в лінійній комбінації використовувати від'ємні коефіцієнти.

Складність в пошуку оптимального режиму обробки полягає в тому, що система (4) містить в якості аргументів та результатів одні й ті самі множини числових значень. При цьому операції *m* та D_k можуть мати нелінійний характер, можуть мати ділянки запізнення, або не виражатимуться аналітично, коли процеси розрахунку можуть виконуватися декларативно або бути результатом імітаційного моделювання.

Також, для застосовності деяких алгоритмів оптимізації проведено доповнення

$\left|\vec{G}_k\right| \to \infty, \vec{Y}_{k-1} \notin Y_k$, яке вступає в силу коли поступає неможлива вимога до ТП і повертає значно перевищену потребу в ресурсах. Тим самим будь-який процес стає придатним для використання, але його використання приймається за вкрай не ефективне. Таке введення дозволяє включити до алгоритмів оптимізації додатково велику базу пошукових евристик. Також аналітичне доповнення розрахунків використаних ресурсів швидким ростом ресурсних потреб при виході за вхідні вимоги ТП, розширює методики оптимізації градієнтними спусками. Сукупність S та (5) формують формальне завдання множини ТП. Додавання до бази знань нового ТП супроводжується наступними операціями (6):

$$\{S = S \bigcup S_k, S_k = \langle X_k, Y_k, V_k, M_k, P_k, D_k, G_k \rangle, \quad (6)$$

де k – номер доданого до системи ТП. Графічне зображення (5) та (6) представлено на рис. 4.

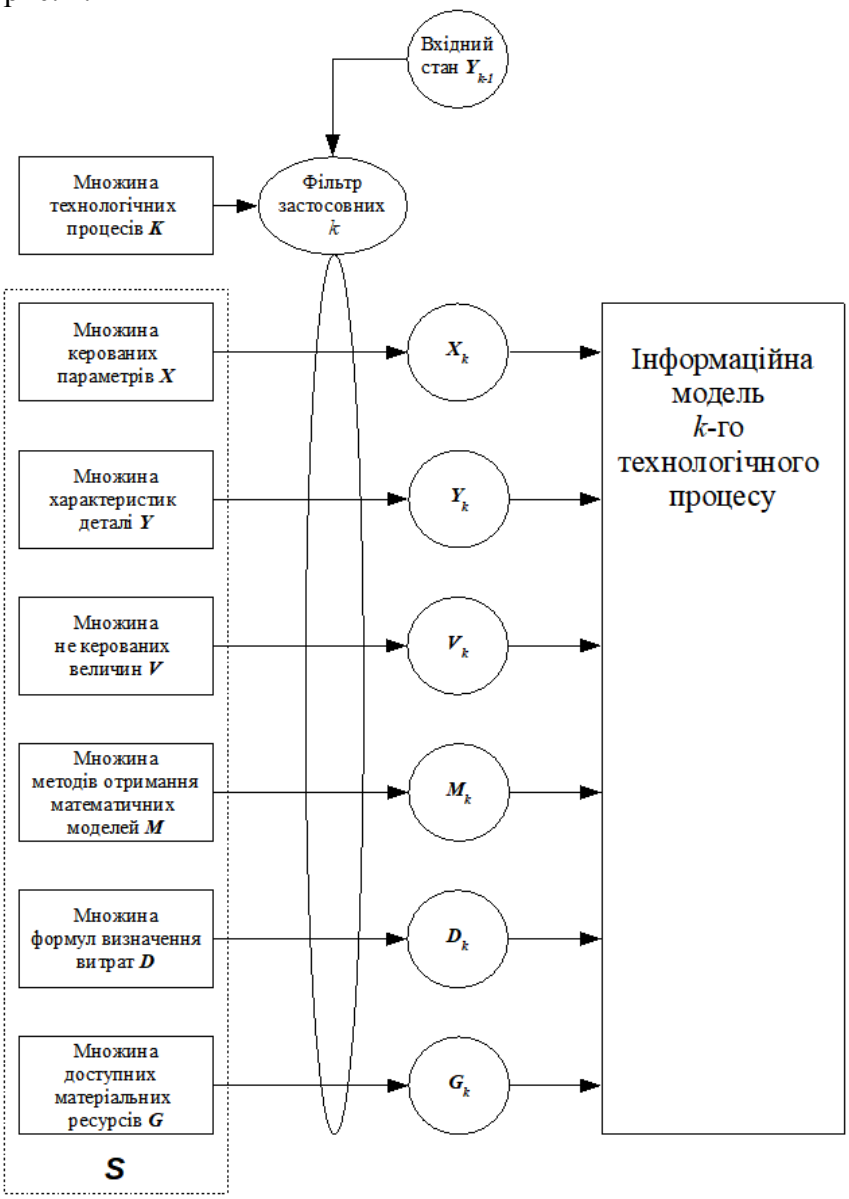


Рисунок 4 – Схема формування окремої інформаційної моделі ТП з загальної бази знань

Джерело: [3]

Формалізація рекомендаційних систем для забезпечення оптимізації ланцюга ТП, як надбудови ЕС над експертними системами окремих ТП. Виготовлення продукції вимагає використання послідовності ТП. Наприклад відновлення поверхонь валів включає напилення металу, доведення поверхні до заданих геометричних параметрів з врахуванням допусків та вимог до якості поверхні, а потім проводиться обробка поверхні з метою покращення її міцності зчеплення та стійкості до зношення.

Кожен з ТП, згідно введеним позначенням приймає деталь з параметрами $\vec{Y}_{k-1}$ та повертає її з параметрами $\vec{Y}_k$. Це формує ланцюг технологічних операцій (7):

$$Y = \sum_{(k)} \vec{Y}_k \,, \tag{7}$$

де $\langle k \rangle$ є екземпляром комбінаторної конфігурації з доступних ТП, а k-1 позначає попередній ТП.

На основі (7) можна проілюструвати цикл обробки як граф доступних процесів (рис. 5):

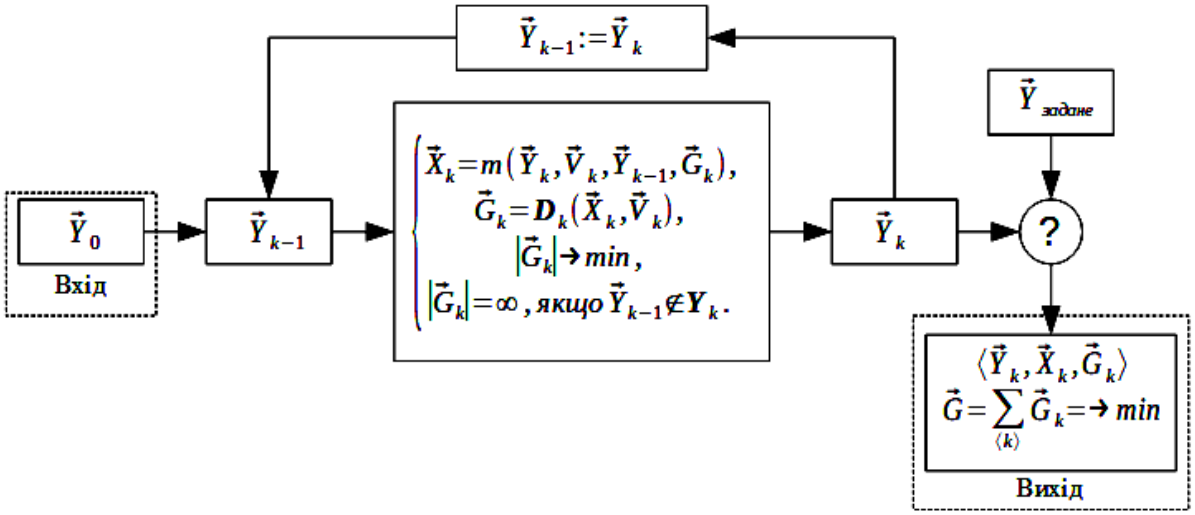


Рисунок 5 – Схема інформаційної моделі побудови ланцюга ТП

Джерело: розроблено автором

В розгорнутому вигляді циклічне представлення на рис. 5 переходить в визначення ланцюга ТП наступним чином (рис. 6), де позначені темним кольором застосовні для вхідного стану ТП.

Описаний граф (рис. 6) є узагальненням графу технології виробництва на основі металорізальних процесів [3]. В результаті, сукупність відношень (4), (5) та (6), дія яких представлена графами на рис. 4, 5, та 6, складають узагальнену модель ланцюга абстрактних ТП.

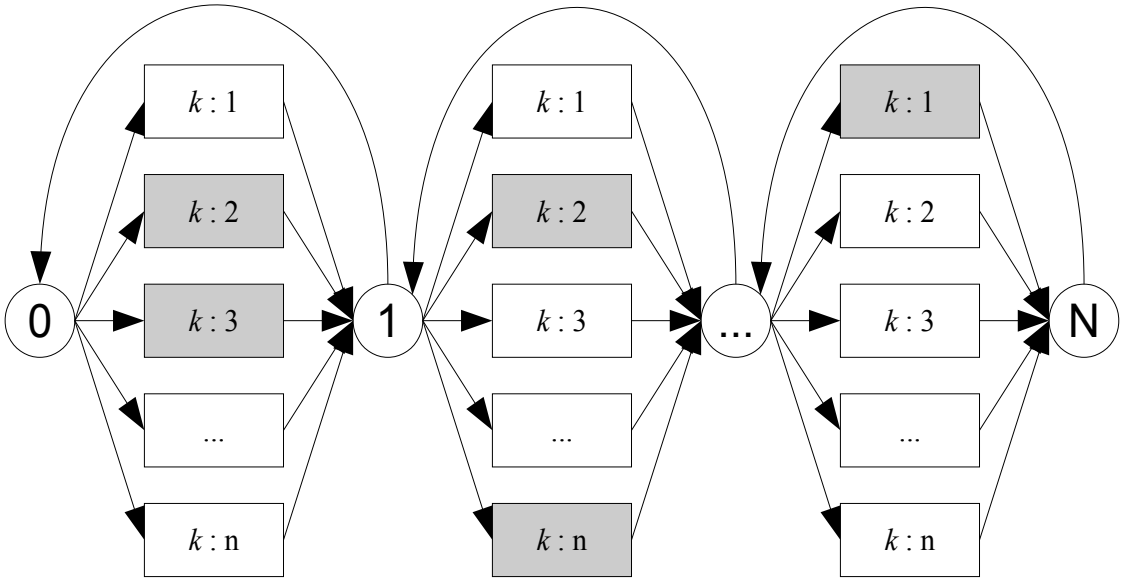


Рисунок 6 – Схема ланцюга ТП з врахуванням можливих повторень операцій зворотними зв'язками

Джерело: [3]

Висновки. Таким чином в даній роботі у сукупності запропонована інформаційна технологія вирішення задачі побудови оптимізованого ланцюга ТП відновлення та зміцнювання поверхонь валів, з вибором більш оптимального процесу серед альтернативних, у вигляді хмарного сервісу.

Список літератури

1. Хох В.Д., Мелешко Є.В., Якименко М.С., Дослідження методів побудови експертних систем. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2016. вип. 4(40). С.48-52.
2. Скрипка К.І., Зенкин М.А. Експертна система автоматизованого вибору способів відновлення спрацьованих деталей. *Вісник ЖДТУ. Технічні науки*. 2004. № 1 (28). С. 66-68.
3. Лимаренко В. В. Інформаційна система підтримки рішень для автоматизації створення технологічних процесів механообробки деталей високоточного обладнання: дисертація канд. техн. наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків. 2019.
4. Лимаренко В.В., Хавина И.П., Рисованный А.Н. Постановка и решение задачи параметрической оптимизации операций резания металлов. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава: ПНТУ ім. Ю. Кондратюка. 2017. вип. 4 (44). С. 20–24,
5. Лимаренко В.В, Хавина И.П. Решение задачи оптимизации параметров обработки металлов при операции точения. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. Харків: НАУ ім. Н. Є. Жуковського «ХАІ». 2017. вип. 3 (83). С. 77–86.
6. Бабич К.К., Секирин А.И., Новиков Д.Д. Подсистема оптимизации работы гибких производственных систем с использованием многокритериальных генетических алгоритмов. *Інформатика і кібернетика*. Покровськ: ДонНТУ. 2017. № 3 (9). С. 24–28.
7. Gania I.P., Stachowiak A., Oleśkyw-Szłapka J. Flexible Manufacturing Systems: Industry 4.0 Solution. *24th International Conference on Production Research*. Poznan. 2017. P.57–62.
8. Slim Bechikh, Rituparna Datta, Abhishek Gupta. Recent Advances in Evolutionary Multi-objective Optimization. Switzerland: Springer International Publishing. 2017. P. 165.
9. Magruk A. The internet of things as the future technological trend of the innovative development of logistics. *Research in Logistics and Production*. Poznan: University of Technology. 2016, №7. P. 16–24.
10. Wit Grzesik. Advanced Machining Processes of Metallic Materials. *Theory, Modelling, and Applications*. Amsterdam. 2016. 2nd Edition. P. 608.
11. Rathod K.B., Lalwani D. Modeling of Cutting Forces for Finishing and Roughing Operations in Oblique Cutting. *Journal of Manufacturing Engineering*. Amsterdam: Elsevier. 2016. Vol. 11. P. 126–134.

12. Milan Milutinović, Ljubodrag Tanović. Cutting Forces in Hard Turning Comprising Tool Flank Wear and its implication for the Friction Between Tool and Workpiece. *Tehnički vjesnik*. 2016. № 23. P. 1373–1379.
13. Rao C.J., Sreeamulu D., Arun Tom Mathew. Analysis of Tool Life during Turning Operation by Determining Optimal Process Parameters. Procedia Engineering. Amsterdam: Elsevier. 2014. № 97. P. 241–250.
14. Nidhiry N.M., Saravanan R. FMS scheduling optimization using modified NSGA-II. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*. 2014. Vol. 2, № 2. P. 1–6.
15. Nidhiry N. M., Saravanan R. Scheduling optimization of a flexible manufacturing system using a modified NSGA-II algorithm. *Advances in Production Engineering & Management*. 2014.Vol. 9, № 3. P. 139–151.
16. Wan J. Yan H., Liu Q.Enabling cyber-physical systems with machine-to-machine technologies. *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*. 2013. №13. P 187–196.

References

1. Hoh, V.D., Meleshko, E.V. & Yakimenko, M.S. (2016). DoslIdzhennya metodIv pobudovi ekspertnih sistem. *Sistemi upravlInnya, navIgatsIYi ta zv'yazku*, *4(40)*, 48-52 [in Ukrainian].
2. Skripka, K.I. & Zenkin, M.A. (2004). Ekspertna sistema avtomatizovanogo viboru sposobIv vIdnovlennya spratsovanih detaley. *VIsnik ZhDTU. TehnIchnI nauki*, *1 (28)*, 66-68 [in Ukrainian].
3. Limarenko, V. V. (2019). InformatsIyna sistema pIdtrimki rIshen dlya avtomatizatsIYi stvorennya tehnologIchnih protsesIv mehanoobrobki detaley visokotochnogo obladnannya: *disertatsIya kand. tehn. Nauk*. HarkIv [in Ukrainian].
4. Limarenko, V.V., Havina, I.P., & Risovannyiy, A.N. (2017). Postanovka i reshenie zadachi parametricheskoy optimizatsii operatsiy rezaniya metallov. *Sistemi upravlInnya, navIgatsIYi ta zv'yazku*, *4 (44)*, 20–24 [in Russian].
5. Limarenko, V.V & Havina, I.P. (2017). Reshenie zadachi optimizatsii parametrov obrabotki metallov pri operatsii tocheniya. *RadIoelektronnI I komp'yuternI sistem, 3 (83),* 77–86 [in Russian].
6. Babich, K.K., Sekirin, A.I. & Novikov, D.D. (2017). Podsistema optimizatsii rabotyi gibkih proizvodstvennyih sistem s ispolzovaniem mnogokriterialnyih geneticheskih algoritmov. *Informatika I kIbernetika*. Pokrovsk: DonNTU, *3 (9)*, 24–28 [in Russian].
7. Gania, I.P., Stachowiak, A. & Oleśkyw-Szłapka, J. (2017). Flexible Manufacturing Systems: Industry 4.0 Solution. *24th International Conference on Production Research*, 57–62 [in English].
8. Slim Bechikh, Rituparna Datta & Abhishek Gupta. (2017). Recent Advances in Evolutionary Multi-objective Optimization, Switzerland: Springer International Publishing, 165 [in English].
9. Magruk A. (2016). The internet of things as the future technological trend of the innovative development of logistics. *Research in Logistics and Production*. Poznan: University of Technology, *№7*, 16–24 [in English].
10. Wit, Grzesik. (2016). Advanced Machining Processes of Metallic Materials. *Theory, Modelling, and Applications*. Amsterdam, 2nd Edition, 608 [in English].
11. Rathod, K.B. & Lalwani D. (2016). Modeling of Cutting Forces for Finishing and Roughing Operations in Oblique Cutting. *Journal of Manufacturing Engineering*, *11*, 126–134 [in English].
12. Milan, Milutinović & Ljubodrag, Tanović. (2016).Cutting Forces in Hard Turning Comprising Tool Flank Wear and its implication for the Friction Between Tool and Workpiece. *Tehnički vjesnik*, *№ 23*, 1373–1379 [in English].
13. Rao, C.J., Sreeamulu, D. & Arun Tom Mathew. (2014). Analysis of Tool Life during Turning Operation by Determining Optimal Process Parameters. *Procedia Engineering*. Amsterdam: Elsevier, *№ 97*, 241–250 [in English].
14. Nidhiry, N.M. & Saravanan, R. (2014). FMS scheduling optimization using modified NSGA-II. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, *2, № 2*, 1–6 [in English].
15. Nidhiry, N. M. & Saravanan, R. (2014). Scheduling optimization of a flexible manufacturing system using a modified NSGA-II algorithm. *Advances in Production Engineering & Management*, *9, № 3*, 139–151 [in English].
16. Wan, J. Yan, H. & Liu, Q. (2013). Enabling cyber-physical systems with machine-to-machine technologies. *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, *№13*, 187–196 [in English].

Tetiana Smirnova, PhD tech. sci., **Yevhenii Solovykh,** Prof., Doct. of Eng.,
Oleksii Smirnov, Prof., Doct. of Eng., **Oleksandr Drieiev,** PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Construction of Cloud information Technologies for Optimization of Technological Process of Restoration and Strengthening of Surfaces of Parts

In the given work the problem of optimization of the technological process of restoration and strengthening of surfaces of parts is considered in the conditions of flexible change of parameters of carrying out of technological operations. To do this, we need to develop an appropriate information technology in the form of a recommendation system that allows you to choose an optimized chain of technological processes, which in turn allows you to implement the technological process of recovery and strengthening of parts surfaces in accordance with the given criteria. Proceeding from the widespread distribution of the Internet, and its application in modern production, this technology is offered in the form of cloud service. The subject of the study in the article is the cloud information technology optimizing the technological process of recovery and strengthening of parts surfaces. The purpose of the work, respectively, is to build a cloud information technology optimizing the technological process of recovery and strengthening the surfaces of parts with specified characteristics based on a combination of several technological processes. For this purpose, the following set of tasks was solved in this work: an overview of known expert systems of optimization of the technological process and their reduction to an abstract view was carried out; for this purpose, information movement was introduced in the expert system of optimization of technological processes, which was based on the analysis of the process of electric arc spraying; formalized subsets of abstract expert systems for optimizing the technological process; formalized recommendation systems for optimization of the technological process chain, as an add-on of the expert system over the expert systems of individual technological processes. The results of work are the information technology of optimization of the technological process of restoration and strengthening of parts surfaces as a cloud service. Conclusions: in the whole, the information technology of solving the problem of constructing an optimized chain of technological processes of restoration and strengthening of surfaces of shafts, with the choice of a more optimal process among alternatives, in the form of cloud service is proposed.

information technologies, expert systems, restoration, strengthening, detail, technological process

Одержано (Received) 08.02.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 10.04.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

УДК 004.7:658.5.011 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).194-201

Dmitro Trushakov, Assos. Prof., PhD tech. sci., **Taras Glushenko,** Junior Specialist, **Nuzhny Vitaliy,** Junior Specialist
Central Ukranian National University,

To substantiate the principle of building local computer networks

The article considers the basic principles of the construction of local computer networks. Described is a peer-to-peer local computer network based on Fast Ethernet technology, its purpose, basic parameters and operating principles, as well as the necessary hardware and software.

local computer network, topology, switch, workstation, network traffic

Д.В. Трушаков, доц., канд. техн. наук, **Т.О. Глущенко,** мл. спец., **В.В. Нужный,** мл. спец.
Центральноукраїнський національний технічний університет, м Кропивницький, Україна

К обоснованию принципа построения современных локальных компьютерных сетей

В статье рассмотрены основные принципы построения локальных компьютерных сетей. Описана одноранговая локальная компьютерная сеть на основе технології Fast Ethernet, ее назначение, основные параметры и принципы работы, а также необходимое аппаратное и програмное обеспечение.

локальная компьютерная сеть, топологія, комутатор, рабочая станция, сетевой трафик

© Dmitro Trushakov, Taras Glushenko, Nuzhny Vitaliy, 2019

Statement of the problem. It is generally known that the Local Computer Network (LCN) is a collection of computers connected by communication lines that provides network users with the potential for sharing resources of all computers. On the other hand, more simply, a computer network is a set of computers and different devices that provide information exchange between computers on the network without the use of any intermediate media. It is also possible to attribute that, the main purpose of computer networks is the sharing of resources and the implementation of interactive communication both within the same firm, and beyond its borders [1].

Setting objectives. In previously written works devoted to computer technology, the focus was on reliability issues [2-4]. However, now attention should also be paid to principle of building local computer networks.

The purpose of writing an article is the need to develop a local computer network, to identify and substantiate the hardware and software system of the system and subsystems of workplaces, to bring the order of their adjustment. Provide protection for the program part and databases of the network, connecting to the Internet. The software and hardware of the network must meet the needs.

Presenting main material. The main purpose of computer networks is the sharing of resources and the implementation of interactive communication. Since the inception of local networks, they have constantly improved, expanded their capabilities in accordance with the standards with which they operate. This has led to the emergence of different types of networks that differ in certain ways. Let's look at some of them.

The Ethernet network is simple, reliable, cheap and efficient, has high data transfer speeds and has become the most widespread one. In some developments, Ethernet adapters are integrated into the motherboard. The first versions are for coaxial cable. Today, this network is described in standards 802.3 and 82, which can also use twisted pair and fiber. There are several types of cable connections, they are labeled as follows: NNN Base-XX. The first figures characterize the transmission rate, Mbit / s, the XX characters - the maximum length of the segment in hundreds of meters or the medium of transmission, Base is a direct unmodulated transmission. Ethernet network usually consists of several bus segments, connected by means of hubs. The Ethernet network has become the basis for the creation of new high-speed networks, such as Fast Ethernet and Gigabit Ethernet. Fast Ethernet uses a pair of different categories of wires or fiber optic and hubs. Coaxial cables are not supported. The distance between the hubs should not exceed 100 m. You can attach an unlimited number of segments to the network. The maximum distance between the two stations in the network is 210 m. There can be no more than two repeaters between the workstations. The properties of the network depend on the type of cable used. Network speed 100 Mbps. Works with standard 802.3u. In July 1996, the engineering team began developing a standard at a rate of 1000 Mbit / s. The Gigabit Ethernet 802.3z standard was approved in 1998. Fiber optic cable and twisted pair can be used. The length of the segment for multimode cable is 500 m, for single mode - 2000 m. Depending on the application area, specifications for coaxial cables and twisted pair are separately defined. In this network, full-duplex repeaters are used, the minimum packet length is increased from 64 to 512 bytes, and the maximum is from 1500 to 9000 bytes.

Token Ring is a circular topology network (Fig. 1), developed by the Swedish engineer Olaf Sodbalom in the 1960s. Patented in 1981. Today, there are two variants of this network - with transmission rates of 4, 16 and 100 Mbps. . An option is also developed for 1000Mbps. The owner and developer of Token Ring is IBM. Compared to the Ethernet network, Token Ring ranks second in use. Token Ring is much more complicated than Ethernet, both technically and with algorithms and operating procedures. Token Ring adapters are three to five times more expensive than Ethernet adapters. At the same time, it has advantages, in

particular, it works more efficiently at high loads (in this case, Ethernet uses up to 30-40% of the nominal bandwidth, and Token Ring - 90%).

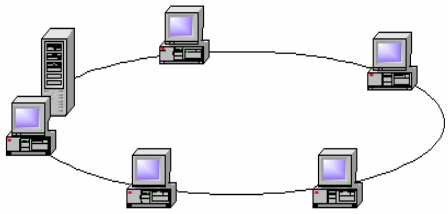


Figure 1 - Example of a typical Token Ring network ring topology
Original source: [1]

Token Ring has a marker access method implemented. Marker is a triple-ring circle ring. The station receiving this frame removes it from the network and transmits its information frame, which makes a full circle and returns to the station that transmitted it. This station removes the information frame from the network and passes the marker.

This network distinguishes between regular and irregular errors. Irregular error is an unstable error that temporarily disrupts the ring. If the station detects regular errors, the station repeats the data transfer, if, after 8 repetitions, the error does not disappear, the frame is temporarily removed from the network and is testing. If during the test errors are found then the frame is eliminated. The network goes into normal operation

ArcNet is a marker locale of a star (Figure 2a) or a bus (Figure 2b) of the topology developed by Datapoint in the early 70's of the 20th century. It uses the marker access method with the formation of a logical ring and the transmission of a special frame marker that gives permission to transmit. ArcNet's specification describes not only the access method, but also the electrical characteristics of the network. The speed of data transmission reaches 2.5 Mbps. The frame length is 508 bytes.

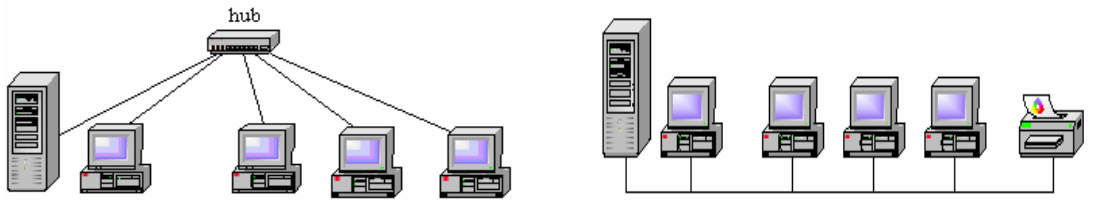


Figure 2 - An example marker local network ArcNet star (Figure 2a) or bus (Figure 2b) topology
Original source: [1]

ArcNet has two topologies: distributed star and bus. The most common topology is the star. Workstations in such a network are connected to hubs that can be active or passive. Active concentrators amplify the signal, have an external power supply.

You can connect up to eight stations at a distance of up to 600 m. Passive concentrator only ramps signals. You can connect only four stations at a distance of 30m.

The cost of ArcNet network adapters depends on network topology. Star topology adapters are much cheaper than Ethernet adapters and three times cheaper than Token Ring adapters. ArcNet is not only the cheapest but has the most flexible and easiest-to-use technology. A disadvantage can be considered a biased mechanism for the interaction of nodes (initially requested transmission. If the receiver agrees, there is a transfer. Each transmission is individually confirmed). However, despite the emergence of the ArcNet Plus network at a transmission rate of 20 Mbps, an increase in the maximum frame size from 516 to 4224 bytes, it is gradually replacing the Ethernet network.

The FDDI (Fiber Distributed Data Interfase) standard is one of the promising solutions supported by major PC makers. In terms of topology, the FDDI network (Figure 3) is a double-fiber optic ring (the second ring is back-up). The speed of information transmission in it is 100 Mbps. Each ring has a length of up to 200 km . Separate nodes of the network can not be separated from each other at a distance of 2.5 km. The maximum number of network stations is 1000. The FDDI networks are considered as transitions between LM and city networks. The main medium of FDDI transmission is fiber optic cables. At the same time there are developments of this network for copper wire. Maximum transmission distance is 100m. You can use both shielded and not shielded twisted pair. The FDDI network uses a 4V5B encoding scheme that encodes 4-bit data combinations in 5-bit light pulse combinations. The marker in this network is transmitted as soon as the station frame is transferred, without waiting for the frame to be returned by the ring.

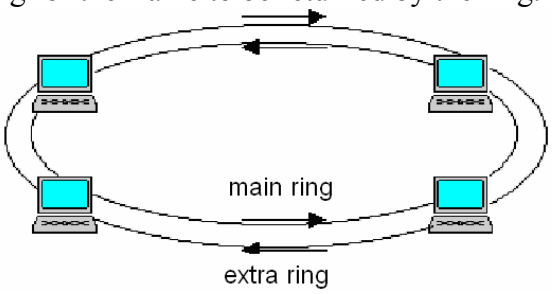


Figure 3 - Ring topology with double fiber optic ring

Original source: [1]

ATM (Asynchronous Transfer Mode) technology is used both in local and global networks. The basic idea is to transfer digital, voice and multimedia data over the same channels. Strictly speaking, there is no solid standard for ATM equipment. Initially, the speed of transmission was 155 Mbps (for desktop systems - 25 Mbps), then - 662 Mbps, and now work is underway to speed up to 2488 Mbps. At ATM speed, it successfully competes with Gigabit Ethernet. By the way, ATM appeared earlier than Gigabit Ethernet. As a medium for transmitting information in a local area network, ATM technology involves the use of an optical fiber cable and an unshielded twisted pair.

Structuring IP network. An IP address is the identifier (unique numeric number) of the network layer used to address computers or devices in networks that are built using TCP/IP.

The IP address consists of four 8-bit numbers, called octets. An example of an IP address can be the address 127.0.0.1 (Local IP address, it is impossible to change, and it is on each OS only one / Localhost).

The IP address consists of two parts [5]: the network number and the hostname. In the case of an isolated network, its address may be chosen by the administrator from addresses specially reserved for such networks (10.0.0.0 / 8, 172.16.0.0/12 or 192.168.0.0/16). If the network should work as an integral part of the Internet, then the network address is provided by the provider or regional Internet Registry (RIR).

The host number in the IP protocol is assigned regardless of the local host address. The router is defined by several networks at once. Therefore, each port of the router has its own IP address. The end node may also be included in multiple IP networks. In this case, the computer must have multiple IP addresses, according to the number of network connections. Thus, an IP address is not a separate computer or router, but one network connection.

Depending on the size of the network, the number of addresses may be larger or smaller. There are several classes of networks for different needs, which depend on the maximum number of addresses for hosts.

Class A: Includes networks from 1.0.0.0 to 127.0.0.0. The network number is in the first octet. This provides a 24-bit bit to indicate hosts. Allows use of approximately 16 million hosts on the network.

Class B: accommodates networks from 128.0.0.0 to 191.255.0.0; The network number is in the first two octets. Counts 16320 networks with 65024 hosts in each.

Class C: Network range from 192.0.0.0 to 223.255.255.0; network number - the first three octets. There are about 2 million networks with 254 hosts in each.

Class D, E, and F: addresses falling within the range from 224.0.0.0 to 254.0.0.0 are either experimental, or stored for future use and do not describe any network.

An example of an IP class scheme is shown in Fig. 4

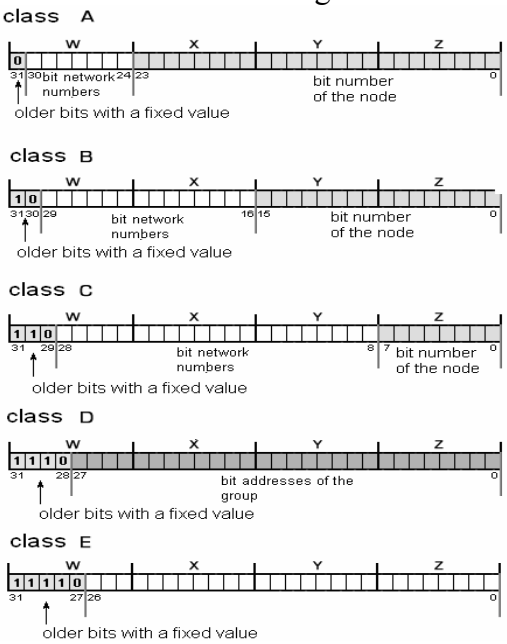


Figure 4 - Schematic of IP address classes

Original source: [5]

For the local network of the school's natural-mathematical cycle, the class of IP-addresses of the school was chosen. This class is most commonly used and used for such tasks. Accordingly, all IP-addressed personal computers were installed (Table 1).

Table 1 – IP addresses assigned to personal computers

Type	Category	Length, m	Endpoints		Subnet mask	IP address mode
			Beginning	End		
UTP	5	2	PC1	Patch panel	255.255.255.0	192.168.1.1
UTP	5	8	PC2	Patch panel	255.255.255.0	192.168.1.2
UTP	5	10	PC3	Patch panel	255.255.255.0	192.168.1.3
UTP	5	12	PC4	Patch panel	255.255.255.0	192.168.1.4
UTP	5	14	PC5	Patch panel	255.255.255.0	192.168.1.5
UTP	5	16	PC6	Patch panel	255.255.255.0	192.168.1.6
UTP	5	18	PC7	Patch panel	255.255.255.0	192.168.1.7
UTP	5	20	PC8	Patch panel	255.255.255.0	192.168.1.8
Tatal		100				

Original source: developed by the author

Calculation of the cabling system. There are two ways to calculate the required number of cable products to create LCNs.

First, we calculate the pre-requisite for copper UTP5e cable to create LCN. To do this, determine the cable that has the largest length (L_{max}) and the length of the smallest cable (L_{min}), the total number of cables in the pre-selection version is determined by the expression:

$$L_{tot.pr} = \left[\left(L_{\max} + L_{\min}\right)/2\right] \times N \times k\,, \tag{1}$$

where $L_{tot.pr.}$ – total pretensional length of copper cable in meter;
L_{max} – the length of the longest cable LKM in (m) $L40 = 20m$;
L_{min} – the length of the smallest cable in (m) $L25 = 2m$;
N – total number of cables in LCN, 8pcs;
k – the factor of the stock is selected within the limits of 1,2 ... 1,6.

We substitute in the formula (1) the value and compute:

$$L_{tot.pr} = \left[\left(20m + 2m\right)/2\right] \times 8 \times 1.5 = 132m\,.$$

Thus, for the preliminary ordering of the amount of cable on the LCN, the calculated value $L_{tot.pr.}$ is taken 132 meter.

Calculate the required number of cables, using its dilution according to the structure of the network in the premises. To do this, using the measured dimensions in the scheme, we measure the approximate length of each cable LCN in accordance with the scheme of network connections, we give the measured lengths of the cables.

We calculate the required cable length for LCN with the expression:

$$L_{tot.l.} = k \times L_{\Sigma}\,, \tag{2}$$

where $L_{tot.r.l.}$ = total required length in meter;
k – the factor of the stock is selected within the limits 1,2 ... 1,4;
L_{Σ} – the total length of the cable is 100 meter, shown in Table 1.

It is also necessary to add cable lengths to connect the switches with patch panels to the total length. Since the switch is used on the network for 16 ports and 12 is used, then the required number of segments is equal to 12 pieces at their length of 0.5 meters, which is 6m, which we add to the total number and get L_{Σ} = 106 meter.

At the end we substitute values in the expression (2) and we calculate:

$$L = 1.4 \times 106 = 148.4m\,.$$

In the specification, we put the received cable length L = 149 meter.

Calculate the cross section of the box. Determined in two ways - based on the total area of the cable section, which is calculated by the expression:

$$S = k \times Scros \times N\,, \tag{3}$$

where S – area of the cross-section of the box (mm^2);
S_{cros} – cross section of cable;
N – number of cables in the box;
k – stock factor, is selected within the limits of 1,4 ... 1,6.

$$Scros = \pi \times d^2/4\,. \tag{4}$$

The second method – the cross-sectional area of the box is determined using the tab in the box of a specified number of cables, shown in Fig. 5.

Taking into account the further modernization and scaling of LKM, the resulting area is increased by a coefficient equal to 1.6.

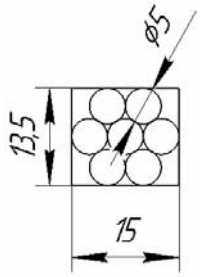


Figure 5 – Dimensions of cables in (mm)
Original source: developed by the author

We calculate the required section of the box by formula (4):

$$Scros = 3.14 \times 5^2 / 4 = 3.925\,\text{mm}^2$$

Calculate the cross section of the box by formula (3):

$$S = 1.6 \times 3.925 \times 7 = 43.96\,\text{mm}^2$$

We accept for installation in a study box a box measuring 16 × 16 mm.

Conclusions. The materials of the article give an example of the design of a local computer peer-to-peer network based on Fast Ethernet technology, with a data transfer rate of 100 Mbps with the Star topology, which includes 8 workstations, 1 FFT, 1 switch, 1 modem and 1 patch -panel. The connection of workstations to the switch via a patch panel was made using a copper cable with twisted pair of category 5. The purpose and main parameters of local computer networks were considered, an analytical review of the main technologies was carried out, the local computer network project was selected and substantiated. networks on the main network standards and the most optimal and modern. Each network computer was assigned an IP address. Since all computers are in the same room, IP addresses are not split into several subnets.

References

1. Столлинг В.Современные компьютерные сети. 2-е изд. СПб.: Питер, 2003. 783 с.
2. Дослідження надійності інформаційної системи / Д.В. Трушаков, Л.А. Ніколаєва, Н.Б. Коренецька, Д.Ю. Мошна. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* 2010. Вип.23. С.274-280.
3. Трушаков Д.В., Кенавішвілі Д.А. Дослідження надійності персональної електронної обчислювальної машини. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2011. Вип.24, ч. І. С.67-72.
4. Трушаков Д.В., Мошна Д.Ю. Створення конфігурацій обчислювальних комплексів з підвищеною надійністю. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2011. Вип. 41, ч. ІІ. С. 174-181
5. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб.: Издательство "Питер", 2002. 672 с.

References

1. Stolling, V. (2003). *Modern computer networks*. (2nd ed.). SPb.: Piter [in Russian]
2. Trushakov, D.V., Nikolaieva, L.A., Korenets'ka, N.B. & Moshna D.Yu. (2010). Doslidzhennia nadijnosti informatsijnoi systemy [The researches of reliability of information systems]. *Zbirnyk naukovykh prats' Kirovohrads'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v sil's'kohospodars'komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Collected Works of Kirovohrad National Technical University. Machinery in Agricultural Production, Industry machine building, Automation*. *23*, 274-280 [in Ukrainian]

3. Trushakov, D.V. & Kenavishvili, D.A. (2011). Doslidzhennia nadijnosti personal'noi elektronnoi obchysliuval'noi mashyny [The research the reliability of the personal computer]. *Zbirnyk naukovykh prats' Kirovohrads'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v sil's'kohospodars'komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Collected Works of Kirovohrad National Technical University. Machinery in Agricultural Production, Industry machine building, Automation. 24, vol I.* 67-72 [in Ukrainian].
4. Trushakov, D.V. & Moshna, D.Yu. (2011). Stvorennia konfihuratsij obchysliuval'nykh kompleksiv z pidvyschenoiu nadijnistiu [Creation of the configuration computing system with higher reliability]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil's'kohospodars'kykh mashyn. Zahal'noderzhavnyj mizhvidomchyj naukovo-tekhnichnyj zbirnyk – National Interagency Scientific and Technical Collection of Works. Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines. 41*, *Vol. II*, 174-181 [in Ukrainian].
5. Olifer, V.G. & Olifer, N.A. (2002). *Komp'juternye seti. Principy, tehnologii, protokoly [Computer networks. Principles, technologies, protocols]*. SPb.: Izdatel'stvo "Piter" [in Russian].

Д.В. Трушаков, доц., канд. техн. наук, **Т.О. Глущенко,** мол.спец., **В.В. Нужний,** мол.спец.
Центральноукраїнський національний технічний університет, м Кропивницький, Україна

До обґрунтування принципу побудови локальних комп'ютерних мереж

Метою написання статті є потреба розробити локальну комп'ютерну мережу , визначити і обґрунтувати склад апаратного і програмного забезпечення робочих місць, привести порядок їх налагодження.

В статті розглянуто основні принципи побудови локальних комп'ютерних мереж. Описана однорангова локальна комп'ютерна мережа на основі технології Fast Ethernet, її призначення, основні параметри та принцип роботи, а також необхідне апаратне та програмне забезпечення. Локальна комп'ютерна мережа – це сукупність комп'ютерів, з'єднаних лініями зв'язку, яка забезпечує користувачам мережі потенційну можливість спільного використання ресурсів всіх комп'ютерів. Простіше кажучи, комп'ютерна мережа - це сукупність комп'ютерів і різних пристроїв, що забезпечують інформаційний обмін між комп'ютерами в мережі без використання яких-небудь проміжних носіїв інформації. Основне призначення комп'ютерних мереж - спільне використання ресурсів і здійснення інтерактивного зв'язку як усередині одного приміщення, так і за його межами.

В матеріалах статті приведено приклад проектування локальної комп'ютерної однорангової мережі на основі технології Fast Ethernet, швидкість передачі даних якої 100 Мб/с з топологією «Зірка», в яку входить 8 робочих станцій, 1 БФП, 1 комутатор, 1 модем та 1 патч-панель. Підключення робочих станцій до комутатора, через патч-панель, виконано за допомогою мідного кабелю з витими парами категорії 5. Було розглянуто призначення та основні параметри локальних комп'ютерних мереж, проведено аналітичний огляд основних технологій, вибрано та обґрунтовано реалізацію проекту локальної комп'ютерної мережі мереж на основні стандартів мереж та обрано найбільш оптимальну та сучасну. Кожному комп'ютеру мережі було присвоєно IP-адресу. Так як всі комп'ютери знаходяться в одному приміщенні, IP-адреси не розбивалася на декілька підмереж.

локальна комп'ютерна мережа, топологія, комутатор, робоча станція, мережевий трафік

Одержано (Received) 18.09.2018 *Прорецензовано (Reviewed) 16.02.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

РОБОТОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ

УДК 007.52 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).202-210

І. І. Павленко, проф., д-р техн. наук, **М.О. Годунко,** доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна
e-mail: pavlenkoii@ukr.net

Розрахунок не зрівноважено утримуваних деталей захватними пристроями роботів

Виконано обґрунтування розрахунку сил затиску в захватному пристрої робота при утриманні деталей зі зміщеним центром мас. Виведено формули для розрахунку даних сил. Встановлено залежності між основними конструктивними характеристиками захватного пристрою та силами затиску.
захватні пристрої, сили затиску, промисловий робот

И.И. Павленко, проф., д-р техн. наук, **М.О. Годунко,** доц., канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Расчет неуравновешенно удерживаемых деталей схватами роботов

Выполнено обоснование расчета сил зажима в захватном устройстве робота при содержании деталей со смещенным центром тяжести. Выведены формулы для расчета данных сил. Установлены зависимости между основными конструктивными характеристиками захватного устройства и силами зажима.
захватные устройства, силы зажима, промышленный робот

Постановка проблеми. Захватні пристрої є одним із відповідальних виконавчим (робочим) органом промислових роботів. Головною їх особливістю є те, що вони представляють собою кінцеву частину просторово незамкненої руки робота, яка повинна здійснювати високошвидкісні зворотно-поступальні (обертові) рухи з необхідною точністю. При цьому захват повинен надійно утримувати транспортовані деталі маючи мінімальну свою масу. Все це можливе при виконанні точних їх розрахунків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В значній кількості виконуваних роботом операцій захвату приходиться утримувати не зрівноважено затиснуті ним деталі. Це може мати місце, як при початковому їх захопленні, так і в процесі циклу функціонування робота з деталлю коли він установлює її на верстат де вона оброблюється і отримує іншу форму та розміри. Всі ці особливості призводять до зміни силового навантаження на захватний пристрій, а, відповідно, до зміни працездатної його якості.

Першим кроком у дослідженні цих питань є визначення необхідних сил затиску утримуваних деталей. Для цього з урахуванням всіх вихідних умов складаємо розрахункову схему (рис. 1), де деталь затиснута захватом при несиметричному (не зрівноваженому) її розміщенні. В раніше виконаних дослідженнях [1] встановлено, що при визначенні сил затиску деталей, по таким розрахунковим схемам, може мати місце умова де кількість складених рівнянь рівноваги утримуваної деталі менше кількості невідомих сил затиску. Тому для вирішення поставленого завдання приймалась

© І. І. Павленко, М.О. Годунко, 2019

додаткова умова коли визначаються мінімально необхідні сили затиску, які потім збільшуються на потрібний коефіцієнт запасу. Таку ж умову приймаємо і в даних розрахунках.

Постановка завдання. Таким чином, метою даних досліджень є розробка методики визначення сил затиску при утриманні роботом деталей зі зміщеним центром мас, з урахуванням конструктивних особливостей захватного пристрою, умов затиску та виконуваних рухів промисловим роботом.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до наведеної схеми на затиснуту деталь вертикально розміщеним захватним пристроєм діють ексцентрично прикладені сила ваги деталі G і сила інерції I з плечем h. Таким чином, на захватний пристрій окрім зовнішніх сил G та I діє момент від цих сил, які повинні зрівноважуватись силами затиску.

Спочатку визначаємо загальний розподіл необхідних сил затиску між окремими частинами затискних призм, так як умовою рівноваги затиснутої деталі є сили затиску, які розміщуються по протилежним (крайнім) площинам затискних призм.

Відповідно до наведеної схеми (рис. 1, а) рівняння рівноваги будуть:

$$\sum M_A = (G+I)h - R_{2B}b = 0 \ , \tag{1}$$

звідки

$$R_{2B} = (G+I)\frac{h}{b} \tag{2}$$

при $h = 0$; $R_{2B} = 0$

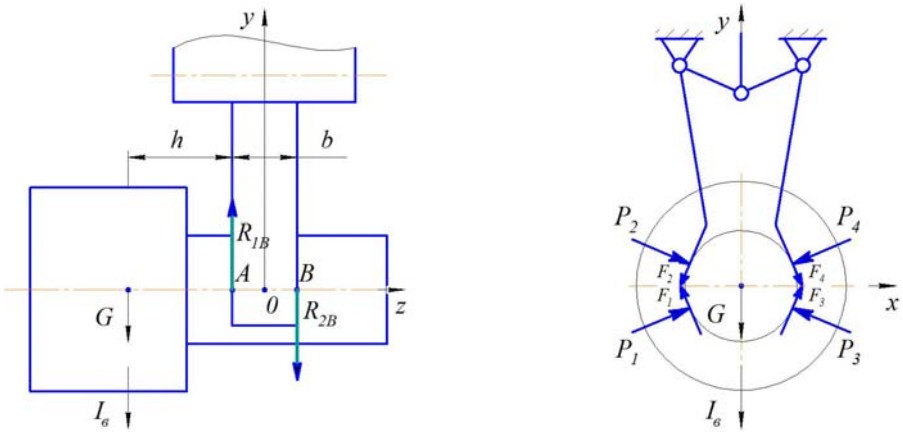
$$\sum M_B = (G+I)(h+b) - R_{1B}b = 0 \ , \tag{3}$$

звідки

$$R_{1B} = (G+I)\frac{h+b}{b} \tag{4}$$

при $h = 0$; $R_{1B} = G + I$

Для визначення конкретного розподілу сил по окремих точках затиску деталі (сили – P_1; P_2; P_3; P_4) розглянемо схему представлену на рис. 1, б.



а – вид спереду; б – вид збоку

Рисунок 1 – Розрахункова схема для вертикально навантаженого захватного пристрою
Джерело: розроблено авторами

В даній схемі нижні складові сил затиску (ліва частина затискних призм) P_1 та P_3 формують своїми вертикальними проекціями силу R_{1B}:

$$R_{1B} = P_1 \cos\frac{\alpha}{2} + F_1 \sin\frac{\alpha}{2} + P_3 \cos\frac{\alpha}{2} + F_3 \sin\frac{\alpha}{2}, \quad (5)$$

де F_1 і F_3 – сили тертя в точках контакту затискних призм з деталлю.

$$F_1 = fP_1;\ F_3 = fP_3, \quad (6)$$

де f – коефіцієнт тертя.

Так як схема симетрична відносно вертикальної вісі то $P_1 = P_3 = P$, а відповідно:

$$F = F_1 = F_3 = fP. \quad (7)$$

Підставляючи у вихідне рівняння отримаємо:

$$R_{1B} = P_1\left(\cos\frac{\alpha}{2} + f\sin\frac{\alpha}{2}\right) + P_3\left(\cos\frac{\alpha}{2} + f\sin\frac{\alpha}{2}\right). \quad (8)$$

Враховуючи те, що наведена розрахункова схема симетрична відносно вертикальної вісі, то

$$P_1 = P_3 = \frac{R_{1B}}{2\left(\cos\frac{\alpha}{2} + f\sin\frac{\alpha}{2}\right)}, \quad (9)$$

або підставляючи раніше визначену величину сили R_{1B} отримаємо:

$$P_1 = P_3 = (G + I)\frac{h + b}{2b\left(\cos\frac{\alpha}{2} + f\sin\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (10)$$

Подібно верхні складові сил затиску (права частина затискних призм) P_2 та P_4 формують вертикальними складовими силу R_{2B}:

$$R_{2B} = P_2 \cos\frac{\alpha}{2} + F_2 \sin\frac{\alpha}{2} + P_4 \cos\frac{\alpha}{2} + F_4 \sin\frac{\alpha}{2}. \quad (11)$$

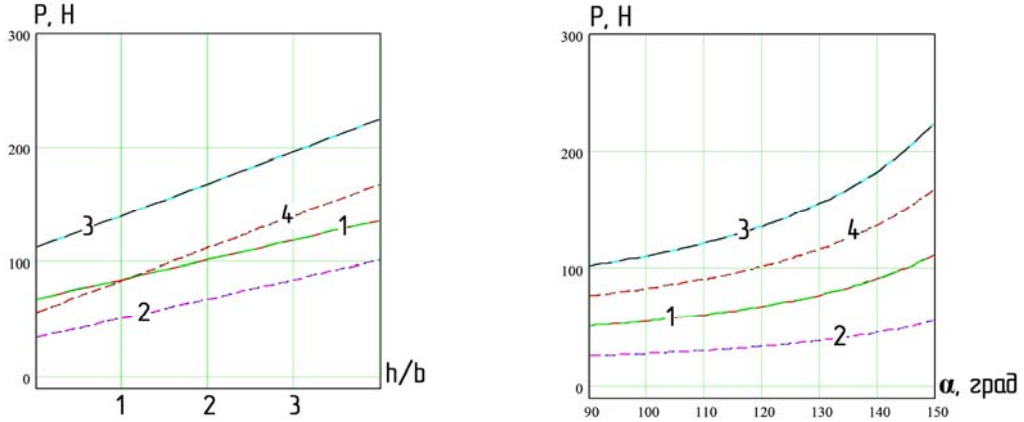
Повторюючи перетворення як у попередньому варіанті кінцево отримаємо:

$$P_2 = P_4 = (G + I)\frac{h}{2b\left(\cos\frac{\alpha}{2} + f\sin\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (12)$$

Із отриманих формул видно, що сили P_1 та P_3 більші за сили P_2 та P_4 і чим більше плече, тим більша різниця між силами R_1 та R_2. Детально вплив параметрів затискної схеми на величину сил затиску (P_i) представлено на графіках (рис. 2).

Із отриманих залежностей видно, що збільшення плеча (h) прикладання зовнішніх сил G і I призводить до лінійного інтенсивного зростання необхідних сил затиску, та появи згинаючого моменту, який додатково навантажує конструкцію захватного пристрою. При цьому важливо враховувати, що «дальні» сили затиску P_1 і P_3 мають більше плече їх прикладання до важелів захватного пристрою, а тому це також потрібно враховувати на загальне навантаження захватного пристрою.

Не зрівноваженість затискної системи має місце також тоді коли зовнішні сили G і I прикладені в межах ширини (b) затискних губок пристрою але не по його середині. Для даного випадку зовнішні сили розміщуються між точками А і О. Відповідно максимальні сили R_1 і R_2 будуть при $h = 0$, величина яких при цій умові наведена вище, а при зменшенні плеча до точки «О» сили реакцій також будуть зменшувати переходячи в зрівноважений затиск деталі.



а б

а – залежності сил затиску від плеча прикладання зовнішніх сил (1 – P1та P3 при h = 10..30, b=10, G=20, I=20, φ=0, *f*=0.1, α =120; 2 - P2 та P4: h = 10..30, b=10, G=20, I=20, φ=0, *f*=0.1, α =120; 3 - P1 та P3: h = 10..30, b=10, G=20, I=20, φ=0, *f*=0.1, α =150; 4 - P2 та P4: h = 10..30, b=10, G=20, I=20, φ=0, *f*=0.1, α =150); б – залежності сил затиску від кута затискних призм (1 − P1 та P3 при α = 90..150, G=20, I=20, φ=0, *f*=0.1, b=10, h=10; 2 − P2 та P4 при α = 90..150, G=20, I=20, φ=0, *f*=0.1, b=10, h=10; 3 − P1 та P3 при α = 90..150, G=20, I=20, φ=0, *f*=0.1, b=10, h=30; 4 − P2 та P4 при α = 90..150, G=20, I=20, φ=0, *f*=0.1, b=10, h=30)

Рисунок 2 – Залежності сил затиску від плеча прикладання (h/b) зовнішніх сил та кута (α) затискних призм

Джерело: розроблено авторами

Розглянутий розрахунок виконано для умови затиску захватним пристроєм деталі номінального діаметра коли вершини затискних призм співпадають з віссю симетрії – X. Це є поодиноким прикладом утримання захватом деталей тому, що вони є універсальними пристроями які передбачають роботу з різними розмірами деталей. Один із таких прикладів представлено на рис.3.

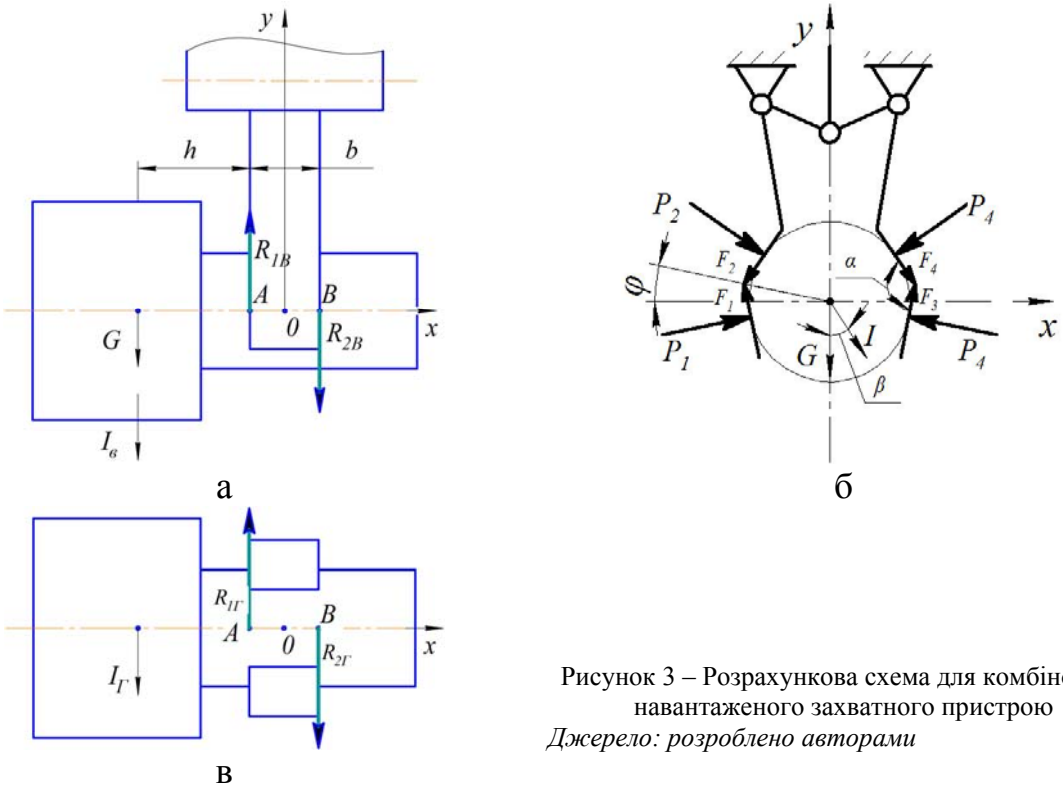


Рисунок 3 – Розрахункова схема для комбіновано навантаженого захватного пристрою

Джерело: розроблено авторами

Додатковою особливістю розрахунку зазначених пристроїв є врахування того факту, що робот здійснює різні просторові переміщення деталі із значними прискореннями, а тому в розрахунковій схемі показано різний напрямок дії сили ваги деталі і сили її інерції. Таким чином, в розрахункову схему додатково включено: β - кут напрямку сили інерції; φ - кут розміщення вершин призм залежно від діаметра утримуваної деталі.

Визначення загальних сил R_1 та R_2 виконується подібно до вищенаведеного прикладу. Першою відмінністю є те, що зовнішні сили G та I діють в різних площинах. Тому спочатку визначаємо загальні сили R_1 та R_2 в цих площинах.

Так у вертикальній площині (рис. 3, а) рівняння рівноваги будуть:

$$\sum M_A = (G + I\cos\beta)h - R_{2B}b = 0, \tag{13}$$

звідки

$$R_{2B} = (G + I\cos\beta)\frac{h}{b}, \tag{14}$$

$$\sum M_B = (G + I\cos\beta)(h + b) - R_{1B}b = 0. \tag{15}$$

Тоді

$$R_{1B} = (G + I\cos\beta)\frac{h+b}{b}. \tag{16}$$

Подібно визначаємо загальні сили в горизонтальній площині:

$$\sum M_A = I\sin\beta \cdot h - R_{2Г}b = 0, \tag{17}$$

звідки

$$R_{2Г} = I\sin\beta\frac{h}{b}, \tag{18}$$

$$\sum M_B = I\sin\beta(h + b) - R_{1Г}b = 0. \tag{19}$$

Тоді

$$R_{1Г} = I\sin\beta\frac{h+b}{b}. \tag{20}$$

Після цього переходимо до розподілу визначених сил між окремими силами затиску – P_i. Для цього складаємо рівняння рівноваги утримуваної деталі в різних площинах. Для вертикальної площини таке рівняння має вид (рис. 3, а, в):

$$R_{1B} = P_{1B}\cos\left(\frac{\alpha}{2}+\varphi\right) + F_{1B}\sin\left(\frac{\alpha}{2}+\varphi\right) + P_{3B}\cos\left(\frac{\alpha}{2}+\varphi\right) + F_{3B}\sin\left(\frac{\alpha}{2}+\varphi\right). \tag{21}$$

Враховуючи симетричність схеми отримаємо:

$$P_{1B} = P_{3B} = \frac{R_{1B}}{2\left(\cos\left(\frac{\alpha}{2}+\varphi\right) + f\sin\left(\frac{\alpha}{2}+\varphi\right)\right)}; \tag{22}$$

або

$$P_{1B} = P_{3B} = (G + I\cos\beta)\frac{h+b}{2b\left(\cos\left(\frac{\alpha}{2}+\varphi\right) + f\sin\left(\frac{\alpha}{2}+\varphi\right)\right)}. \tag{23}$$

Відповідно визначаємо сили R_{2B}, де в підсумку отримаємо:

$$R_{2B} = P_{2B}\cos\left(\frac{\alpha}{2}-\varphi\right) + F_{2B}\sin\left(\frac{\alpha}{2}-\varphi\right) + P_{4B}\cos\left(\frac{\alpha}{2}-\varphi\right) + F_{4B}\sin\left(\frac{\alpha}{2}-\varphi\right). \tag{24}$$

Після подібних перетворень

$$P_{2B} = P_{4B} = \left(G + I\cos\beta\right)\frac{h}{2b\left(\cos\left(\frac{\alpha}{2}-\varphi\right)+f\sin\left(\frac{\alpha}{2}-\varphi\right)\right)} \ . \quad (25)$$

Розподіл сил в горизонтальній площині розглядаємо в тій же послідовності. Такі рівняння мають вид (рис. 3, б, в):

$$R_{1Г} = P_{3Г}\sin\left(\frac{\alpha}{2}+\varphi\right) + P_{4Г}\sin\left(\frac{\alpha}{2}-\varphi\right) \ . \quad (26)$$

Так як сили тертя в даному напрямку відсутні, то:

$$R_{3Г} = \frac{I\sin\beta\frac{h+b}{b} - P_{4Г}\sin\left(\frac{\alpha}{2}-\varphi\right)}{b} . \quad (27)$$

Для вирішення цього рівняння приймаємо додаткову умову [6], що вертикальні складові сил $P_{3Г}$ та $P_{4Г}$ між собою зрівноважені через затиснуту деталь, а тому в підсумку отримуємо:

$$R_{3Г} = I\sin\beta\frac{\left(h+b\right)\cos\left(\frac{\alpha}{2}-\varphi\right)}{b\sin\alpha} ; \quad (28)$$

$$R_{4Г} = I\sin\beta\frac{\left(h+b\right)\cos\left(\frac{\alpha}{2}+\varphi\right)}{b\sin\alpha} . \quad (29)$$

Подібно визначаємо розподіл сили $P_{2Г}$:

$$R_{2Г} = P_{1Г}\sin\left(\frac{\alpha}{2}+\varphi\right) + P_{2Г}\sin\left(\frac{\alpha}{2}-\varphi\right), \quad (30)$$

де

$$P_{1Г} = I\sin\beta\frac{h}{b} . \quad (31)$$

Зрівноваженість сил у вертикальному напрямку $P_{1ГВ} = P_{2ГВ}$ отримаємо

$$P_{1B}\cos\left(\frac{\alpha}{2}+\varphi\right) = P_{2B}\cos\left(\frac{\alpha}{2}-\varphi\right), \quad (32)$$

тоді

$$P_{1B} = P_{2B}\frac{\cos\left(\frac{\alpha}{2}-\varphi\right)}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}+\varphi\right)} ; \ P_{2B} = P_{1B}\frac{\cos\left(\frac{\alpha}{2}+\varphi\right)}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}-\varphi\right)} . \quad (33)$$

Підставляючи у попереднє рівняння отримаємо в кінцевому виді:

$$P_{1Г} = I\sin\beta\frac{h\cos\left(\frac{\alpha}{2}-\varphi\right)}{b\sin\alpha} ; \ P_{2Г} = I\sin\beta\frac{h\cos\left(\frac{\alpha}{2}+\varphi\right)}{b\sin\alpha} . \quad (34)$$

Розрахувавши складові сил затиску в різних площинах переходимо до визначення їх сумарних величин:

$$P_1 = P_{1B} + P_{1Г} = \left(G + I\cos\beta\right)\frac{h+b}{2\cdot b\left(\cos\left(\frac{\alpha}{2}+\varphi\right)+f\sin\left(\frac{\alpha}{2}+\varphi\right)\right)} + I\sin\beta\frac{h\cos\left(\frac{\alpha}{2}-\varphi\right)}{b\sin\alpha} ; \quad (35)$$

$$P_2 = P_{2B} + P_{2\Gamma} = \left(G + I\cos\beta\right)\frac{h}{2\cdot b\left(\cos\left(\frac{\alpha}{2}-\varphi\right)+f\sin\left(\frac{\alpha}{2}-\varphi\right)\right)} + I\sin\beta\frac{h\cos\left(\frac{\alpha}{2}-\varphi\right)}{b\sin\alpha}; \quad (36)$$

$$P_3 = P_{3B} + P_{3\Gamma} = \left(G + I\cos\beta\right)\frac{h+b}{2\cdot b\left(\cos\left(\frac{\alpha}{2}+\varphi\right)+f\sin\left(\frac{\alpha}{2}+\varphi\right)\right)} + I\sin\beta\frac{(h+b)\cos\left(\frac{\alpha}{2}-\varphi\right)}{b\sin\alpha}; \quad (37)$$

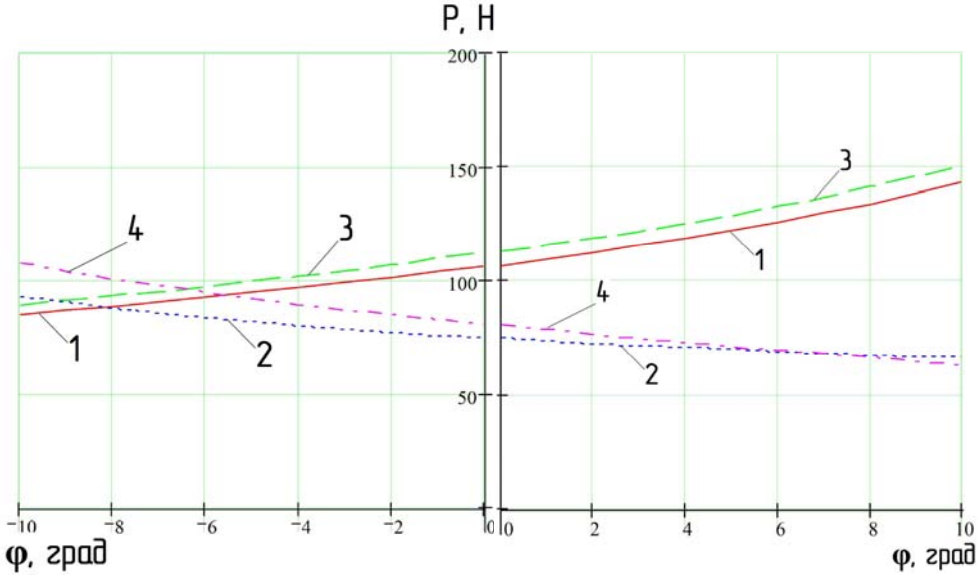
$$P_4 = P_{4B} + P_{4\Gamma} = \left(G + I\cos\beta\right)\frac{h}{2\cdot b\left(\cos\left(\frac{\alpha}{2}-\varphi\right)+f\sin\left(\frac{\alpha}{2}-\varphi\right)\right)} + I\sin\beta\frac{(h+b)\cos\left(\frac{\alpha}{2}+\varphi\right)}{b\sin\alpha}. \quad (38)$$

При умові коли кути $\varphi = 0$, $\beta = 0$ сили затиску будуть:

$$P_1 = \left(G+I\right)\frac{h+b}{2\cdot b\left(\cos\frac{\alpha}{2}+f\sin\frac{\alpha}{2}\right)}; \quad P_2 = \left(G+I\right)\frac{h}{2\cdot b\left(\cos\frac{\alpha}{2}+f\sin\frac{\alpha}{2}\right)}; \quad (39)$$

$$P_3 = \left(G+I\right)\frac{h+b}{2\cdot b\left(\cos\frac{\alpha}{2}+f\sin\frac{\alpha}{2}\right)}; \quad P_4 = \left(G+I\right)\frac{h}{2\cdot b\left(\cos\frac{\alpha}{2}+f\sin\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (40)$$

Тобто їх значення дорівнюють силам для попереднього варіанту (рис. 1), що підтверджує правильність їх визначення. В узагальненому виді вплив параметрів розрахункової схеми (рис. 3) подібний до варіанту – рис. 1, а вплив кута φ на сили затиску наведено на рис. 4.



а б

а – залежності сил затиску від кута зміщення затискних призм нижче вісі деталі (1 – P1, 2 – P2, 3 – P3, 4 – P4 при φ = -10...0, β=30, b=10, G=20, I=20, h=20, *f*=0.1, α =120);
б – залежності сил затиску від кута зміщення затискних призм вище вісі деталі (1 – P1, 2 – P2, 3 – P3, 4 – P4 при φ = 0...+10, β=30, b=10, G=20, I=20, h=20, *f*=0.1, α =120)

Рисунок 4 – Залежності сил затиску від кута зміщення затискних призм (φ)
Джерело: розроблено авторами

Висновки. В результаті дослідження сил затиску в захватному пристрої при утриманні деталі зі зміщеним центром мас отримано такі результати:

1. Виконані дослідження дозволяють точно визначати діючі силові навантаження на захватний пристрій та обгрунтовано визначати його конструктивні параметри.

2. Використання такого варіанту не зрівноваженого затиску деталей можливий при не значному зміщенні центру прикладання зовнішніх сил відносно вісі симетрії захватного пристрою та достатній жорсткості його конструкції і максимально можливій ширині затискних важелів.

3. При наявності значних не зрівноважених навантажень на захватний пристрій, може бути доцільним заміна захвата з одною парою затискних важелів на захват з двома парами затискних важелів, де силове їх навантаження визначається за такими ж формулами, але конструкція при цьому може бути більш жорсткою.

Список літератури

1. Павленко І.І., Годунко М.О. Захватні пристрої роботів: навч. посібник. Кіровоград: КНТУ. 2014. 367с.
2. Козырев Ю.Г. Захватные устройства и инструменты промышленных роботов: учеб. пособие. Москва: КНОРУС. 2011. 465с.
3. Monkman, S.Hesse, R.Steinmann & H.Schunk. (2007) Robot Grippers. G.J. Copyright WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
4. Проць Я.І. Захоплювальні пристрої промислових роботів: навч. посібник. Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет ім.І.Пулюя. 2008. 232с.
5. Козырев Ю.Г. Применение промышленных роботов: учебное пособие. Москва: КНОРУС. 2011, 488с.
6. Павленко І.І. Промислові роботи та РТК: монографія. Кропивницький: Лисенко В.Ф. 2016. 492с.
7. K.Koskinen. (2016). Design of a smart gripper for industrial applications., 8th June.
8. Caucey G.C. & R.D. Quinn. Gripper design guidelines for modular manufacturing. Procceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat.No.98CH36146) n. pag. Web.8 June.
9. Raymond R. Ma & Aaron M. Dollar. (2016) Yale Openhand Project - Model T. Eng.yale.edu. N.p.. Web. 21 June.

Referencis

1. Pavlenko, I.I. & Ghodunko, M.O. (2014). *Zakhvatni prystroji robotiv [Robot grippers]*. Kirovoghrad: KNTU [in Ukrainian].
2. Kozyrev, Yu.G. (2011). *Zakhvatnye ustroistva i instrumenty promyshlennykh robotov [Gripping devices and tools of industrial robots]*. Moskow: KNORUS [in Russian].
3. Monkman, S.Hesse, Steinmann, R. & Schunk, H. (2007). Robot Grippers. G.J. Copyright WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
4. Procj, Ja.I. (2008). *Zakhopljuvaljni prystroji promyslovykh robotiv [Gripping devices for industrial robots]*. Ternopil: Ternopiljsjkyj derzhavnyj tekhnichnyj universytet im.I.Puljuja [in Ukrainian].
5. Kozyrev, Yu.G. (2011). *Primenenie promyshlennykh robotov [The use of industrial robots]*. Moskow: KNORUS [in Russian].
6. Pavlenko, I.I. (2016). *Promyslovi roboty ta RTK [Industrial robots and RTC]*. Kropyvnycjkyj: Vydavecj Lysenko V.F. [in Ukrainian]
7. Koskinen, K. (2016). Design of a smart gripper for industrial applications., 8th June.
8. Caucey, G.C. & Quinn, R.D. (2016). Gripper design guidelines for modular manufacturing. Procceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat.No.98CH36146) n. pag. Web.8 June.
9. Raymond, R. Ma & Aaron, M. Dollar. (2016). Yale Openhand Project - Model T. Eng.yale.edu. N.p.. Web. 21 June.

Ivan Pavlenko, Prof., DSc., **Maxym Hodunko,** Assos. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Calculation of Unbalanced Parts Grippers by Robots

The substantiation of the calculation of the clamping forces in the gripping device of the robot with the maintenance of parts with an offset center of gravity. The formulas for calculating these forces are derived. Dependencies between the main design characteristics of the gripping device and the clamping forces are established.

Grippers are one of the responsible executive bodies of industrial robots. Their main feature is that they represent a finite part of the spatially unlocked hand of the robot, which must perform high-speed reciprocating (rotating) movements with the required accuracy. In this case, the grip must reliably hold the transported parts with a minimum of their mass. All this is possible when performing their exact calculations. In a large number of robots of capture operations, it is necessary to keep parts that are not evenly squeezed into it. This may take place, both during initial capture and during the cycle of the operation of work with the detail when it sets it on a machine where it is processed and gets a different shape and size. All these features lead to a change in the power load on the gripper, and, accordingly, to change the working capacity of its quality.

The first step in the study of these issues is to determine the required clamping forces of the retained parts. To do this, taking into account all baseline conditions, we compile a calculation scheme, where the detail is clamped with the capture with an asymmetric (not balanced) its placement. In earlier studies, it was found that in determining the forces of clamping of parts, according to such calculation schemes, there may be a condition where the number of complicated equations of equilibrium of the held part is less than the number of unknown clamping forces. Therefore, an additional condition was adopted for solving the task, when the minimum required clamping forces were determined, which then increased to the required stock factor. The same condition we accept in these calculations.

gripping devices, clamping forces, industrial robot

Одержано (Received) 22.05.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 28.05.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ У ПРОМИСЛОВОСТІ ТА СІЛЬСКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

УДК 681.513;62.505;621.9.04 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).211-219

В.А. Зозуля, доц., канд. техн. наук, **С.І. Осадчий,** проф., д-р техн. наук,
М.М. Мельніченко, асп.
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: irish38@ukr.net

Аналіз характеристики точності відтворення еталонної траєкторії платформою Гауфа-Стюарта з системою управління для різних видів завдань

Мета статті полягає в аналізі публікацій направлених на отримання оцінки точності відтворення тестового сигналу платформою Гауфа–Стюарта з певною системою керування для різних видів задач на підставі експериментальних даних. Були виявлені особливості конструкції, системи керування, типу тестового сигналу та умов експерименту, які впливають на характеристики точності платформи Гауфа–Стюарта.
платформа Гауфа-Стюарта, система управління, еталонна траєкторія, оцінки точності

В.А. Зозуля, доц., канд. техн. наук, С.И. Осадчий, проф., д-р техн. наук, Н.Н. Мельниченко, асп.
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Анализ характеристики точности воспроизведения эталонной траектории платформой Гауфа-Стюарта с системой управления для различных видов задач

Цель статьи заключается в анализе публикаций направленных на получение оценки точности воспроизведения тестового сигнала платформой Гауфа-Стюарта с определенной системой управления для различных видов задач на основании экспериментальных данных. Были выявлены особенности конструкции, системы управления, типа тестового сигнала и условий эксперимента, которые влияют на характеристики точности платформы Гауфа-Стюарта.
платформа Гауфа-Стюарта, система управления, эталонная траектория, оценки точности

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Особливий інтерес представляє механізми паралельної кінематичної структури на основі платформи Гауфа-Стюарта (гексапод), яка має шість однотипних кінематичних ланцюгів (штанг) і має шість ступенів вільності рухомої платформи [1,2]. Програмно регулюючи довжину штанг, можна керувати положенням вихідної ланки, переміщати її в вертикальному і горизонтальному напрямках, повертати в трьох площинах.

Багатьма авторами були розроблені та досліджені зразки платформи Гауфа-Стюарта (гексапод) [2-6]. Зокрема, авторами [4] розроблено дослідний зразок верстата на основі платформи Гауфа-Стюарта (гексапод), до складу якої входять: шість сервосистем змінного струму, однокомпьютерній варіант системи PCNC (Personal Computer Numerical Control) на основі вільно поширюваного програмного забезпечення з відкритим кодом LinuxCNC на платформі ОС Linux Ubuntu. Створена фізична модель може бути застосована для фізичного моделювання руху об’єктів в 3D просторі, механізмів переміщення робочих органів металорізальних верстатів та контрольно-вимірювальних машин з паралельної кінематикою і інших технічних об'єктів.

© В.А. Зозуля, С.І. Осадчий, М.М. Мельніченко, 2019

Але, з багатьох літературних джерел, наприклад [2, 5-8], відомо, що платформа Гауфа-Стюарта відноситься до багатовимірного об'єкту управління, динаміка, якої залежить від сфери її застосування. З наведеного огляду літературних джерел, використання платформи Гауфа-Стюарта для вирішення різних завдань, можна побачити, що існують технологічні завдання при яких вона здійснює рух, точно слідуючи бажаної траєкторії і положенню орієнтації в певному часовому інтервалі: при значному впливі, що збурює з боку навколишнього середовища (оброблювальний центр - режим в зоні обробки, стабілізаційна платформа - під впливом поривів вітру, морської качки) так і при незначному впливі, що збурює з боку навколишнього середовища (тренажер льотної підготовки, вібраційна платформа). При цьому практично всі види завдань, які вирішуються платформою Гауфа-Стюарта здійснюються в режимі програмного управління.

Важливою частиною даних досліджень є розробка системи управління рухом механізму несучої системи платформи Гауфа-Стюарта, виходячи із заданих вимог, що пред'являються до системи. Однак, досягнення граничних динамічних характеристик такими механізмами можливо тільки в результаті розробки і впровадження оптимальних замкнених систем управління [9]. Однією з граничних динамічних характеристик є оцінка точності.

Існують публікацій [10, 11] спрямовані на аналіз показника точності позиціювання, який є інтегральною оцінкою точності виготовлення основних базових деталей несучої системи механізму і визначається сукупною дією всіх первинних похибок механізму при нульовій швидкості руху (оцінка в статиці). Такі дослідження не дозволяють дати оцінку точності виконання заданої траєкторії несучою механічною системою разом з системою управління і тим більше визначити граничні можливості підвищення точності.

Постановка проблеми. Виходячи з цього проблема дослідження полягає у тому, що за результатами випробування платформи Гауфа-Стюарта оцінити зв'язок якості виконання завдання стеження за еталонною траєкторією в динаміці для різних видів задач з відповідним способом керування.

Постановка завдання. Мета статті полягає в аналізі публікацій направлених на отримання оцінки точності відтворення тестового сигналу платформою Гауфа–Стюарта з певною системою керування для різних видів задач на підставі експериментальних даних. При цьому виявити особливості конструкції, системи керування, типу тестового сигналу та умов експерименту, які впливають на характеристики точності платформи Гауфа–Стюарта.

Виклад основного матеріалу. Для оцінки точності руху механізму несучої системи гексаподу в динаміці все частіше застосовується методика вимірювання точності відпрацювання еталонної траєкторії, зокрема, окружності, заданого радіуса. Методи і порядок проведення оцінки точності відпрацювання кругової траєкторії регламентуються ДСТУ 30544 «Методи перевірки точності і постійності відпрацювання кругової траєкторії» і стандартом ISO 230-4 [12].

В роботі [10] представлені оцінки точності роботи верстата-гексапод «Гексамех-1». В основу несучої системи верстата покладена перевернута платформа Гауфа-Стюарта, яка має шість ступенів рухливості. Верстат-гексапод «Гексамех-1» призначений для обробки складних криволінійних поверхонь великогабаритних деталей методом швидкісного фрезерування, свердління і розточування. В якості системи ЧПУ застосована система управління «POWER AUTOMATION» зі спеціальною платою переходу від декартової системи координат в систему L - координат (систему координат приводів штанг), з використанням системи управління

на основі ПІД регулятора. У цій роботі наведено експериментальні дослідження оцінки точності відпрацювання еталонної окружності, яка виконується верстатом-гексаподом «Гексамех-1» з радіусом 150мм в площині XY на висоті 300 мм над площиною столу, при швидкості обходу кола 500 мм / хв. Відносна похибка відтворення еталонної окружності по координаті X 18%, по координаті Y 15%, середнє квадратичне відхилення 17%.

Аналіз експериментальних даних представлених в роботі [10] показує, що характер поведінки кривої відхилення від окружності мало залежить від висоти розташування платформи Гауфа-Стюарта над площиною столу, як і від радіусу кола. У розглянутому джерелі вважають, що низькочастотна складова кривої відхилення від середнього значення - це, кінематичне відхилення, яке викликається первинними похибками механізму - платформи Гауфа-Стюарта, відхилення положення розмірів і форми реального елемента кінематичної пари в тілі ланки від положення, розмірів і форми ідеального елементу, а також проковзування в парах кочення , які не враховуються в алгоритмі калібрування верстата. Спостерігається високочастотна складова, амплітуда якої збільшується зі збільшенням швидкості обходу кола. Дослідження точності відпрацювання кругової траєкторії при різних швидкостях обходу показали, що амплітуда високочастотних коливань залежить від швидкості обходу кола, частота коливань, яких близька до 1-й власній частоті несучої системи верстата-гексаподу. Середнє квадратичне відхилення (розсіювання значень випадкової величини відносно її математичного очікування - ДСТУ 8.736-2011) характеризує ступінь вибору натягу у всіх рухомих і нерухомих стиках вузлів верстата-гексапод, а також характеризує сили тертя в рухомих вузлах верстата-гексапод (спрямовувачі, ШГП, підшипники і ін.).

У статті [13] представлений прототип фрезерного верстата-гексаподу Hexaglide, розробленого Інститутом верстатобудування в ETH Zurich, Швейцарія на базі перевернутої платформи Гауфа-Стюарта. Для управління Hexaglide запропонована схема, нелінійного адаптивного регулятора з спостерігачем за швидкістю, аналогічний так званому регулятору обчисленого крутного моменту. При цьому динамічна модель платформи Гауфа-Стюарта в режимі реального часу використовує потрібні значення замість фактичних координат платформи. Оскільки розрахунок динамічної моделі платформи Гауфа-Стюарта в декартовій системі координат з використанням чисельного алгоритму для вирішення прямої кінематики займає дуже багато часу. Так само наведені порівняльні експериментальні дані точності відтворення еталонної траєкторії з діаметром кола 40 мм, для верстата-гексапод Hexaglide під керуванням ПД регулятора і під управлінням нелінійного адаптивного регулятора з спостерігачем. Для ПД регулятора при швидкості 0,1 м/с відхилення від окружності мінімальне - 17 μм, максимальне - 19 μм, відносна похибка - 9%; при швидкості 0,3 м/с мінімальне - 24 μм, максимальне - 127 μм, відносна похибка - 34%; при швидкості 0,4 м/с мінімальне - 56 μм, максимальне - 253 μм, відносна похибка - 66%. Для нелінійного адаптивного регулятора при швидкості 0,4 м / с відхилення від окружності мінімальне - 11 μм, максимальне - 34 μм, відносна похибка - 10%. Аналіз експериментальних даних точності відтворення еталонної окружності показує залежність збільшення похибки від швидкості відтворення, для ПД регулятора. Так само можна зробити висновок, що нелінійний адаптивний регулятор з спостерігачем за швидкістю володіє в кілька разів більше точністю, ніж звичайний ПД регулятор.

У статті [14] представлена платформа Гауфа-Стюарта, розроблена в Політехнічному університеті Каталонії (UPC). Ця платформа була адаптована до загальної задачі спостереження. Управління кожної віссю здійснюється ПД

регулятором. Наведено експериментальні дані оцінки точності відтворення кола радіусом 100 мм. Максимальна помилка відтворення траєкторії по абсолютній величині становить менше 3,8 мм або відносна похибка 3,8%.

У статті [15] розглядається експериментальна установка робота-маніпулятора, на основі платформи Гауфа - Стюарта. Верхня платформа його може переміщатися в межах ±0,2 м по осях X і Y, ±0,1 м по осі Z, ±25° по крену і тангажу і ±30° по рисканню. У цій статті запропоновано дослідження регулятора на основі зворотної динаміки, також званий регулятор обчисленого крутного моменту. В основі цього регулятора лежить припущення, що нелінійні матриці коефіцієнтів динамічної моделі платформи Гауфа-Стюарта через малий діапазон руху можна апроксимувати і отримати постійними. Тим самим спростивши реалізацію цього регулятора в реальному часі. Помилки моделювання, викликані таким наближенням, компенсуються робастним регулятором H∞, який розглядає помилку як збурення, при цьому ПІД-регулятор використовується в прямому зв'язку для стеження за положенням. Так само в цій статті представлені результати експериментів, в яких центр платформи відтворює еталонну кругову траєкторію з радіусом 0,02 м в площині XY з швидкістю 0,314 м / с під управлінням регулятора на основі зворотної динаміки з компенсацією невизначеностей робастних регулятором H∞ і простого ПІД- регулятора. Максимальне відхилення від еталонної окружності для регулятора на основі зворотної динаміки одно 0,75 мм або відносна похибка 3,75%, для ПІД-регулятора 3 мм або відносна похибка 15%. Можна зробити висновок, що регулятор на основі зворотної динаміки з компенсацією невизначеностей робастним регулятором H∞ набагато якісніше відстежує еталонну траєкторію, ніж простий ПІД-регулятор.

Для дослідження характеристик по точності в динаміці платформи Гауфа-Стюарта з системою управління крім кругової траєкторії використовується синусоїдальний тестовий сигнал.

В роботі [16] наведено випробувальний стенд на базі платформи Гауфа-Стюарта під назвою Active-helideck. Він спроектований як активний вертолітний майданчик, який використовується при посадці і зльоті з кораблів або з морських споруд. Active-helideck компенсує коливання корабля під дією морської хвилі. Компенсація здійснюється за допомогою з координованого дії його шести приводів у відповідності з сигналами інерціального вимірювального пристрою, який визначає поточний стан вертолітного майданчика.

Так само в цій роботі наведено експериментальне дослідження метою, якого було визначити можливість стабілізації активного вертолітного майданчика з платформою Гауфа-Стюарта під дією коливань корабельної палуби. Управління положенням активного вертолітного майданчика і корабельної палуби здійснюється за допомогою ПД регулятора. Моделювання коливання морської хвилі (корабельної палуби) виконується паралельним роботом з трьома ступенями свободи, уздовж осі z - у вертикальному напрямку, і обертанням по осях - крену і тангажу, за допомогою синусоїдальних коливань (частота ≈0,1 Гц при амплітуді 70мм). З експериментальних результатів можна визначити, що похибка стабілізації положення вертолітного майданчика представлена кутами Ейлера та дорівнює: максимальне відхилення курсу (рискання) - 0,005°, крену - 0,01° тангажу - 0,012° в лінійних переміщеннях X - 28 мм, або відносна похибка 40 %, Y - 34мм або відносна похибка 48,5%, і Z - 4 мм або відносна похибка 5,7%.

Можна зробити висновок, що для платформи Гауфа-Стюарта, яка виконує стабілізацію положення, дуже важливо мати якісні показники точності за кутами крену, тангажу, курсу (рискання) і за лінійною координатою Z. Крім того, недоліком при

оцінці точності стабілізації є те, що експериментальне дослідження були проведені при регулярному сигналі, а експлуатація платформи Active-helideck здійснюється при впливі морської хитавиці, тобто випадкових коливаннях.

Для аналітичного представлення спектру нерегулярного морського хвилювання можна використовувати два методи. У першому з них параметри спектра розглядають як функції умов хвилеутворення: швидкості і тривалості дії вітру, довжини розгону хвиль і т. д. У другому методі вважають відомими видимі елементи хвиль (наприклад, середню висоту або висоту 3% забезпеченості, середній період) і параметри спектра визначають як функції цих елементів. Перший метод використовують, головним чином, для прогнозів хвилювання, другий - для розрахунку впливу хвиль на різні споруди, в тому числі і на кораблі.

Реальне морське хвилювання нерегулярно і трехмерно. Таке хвилювання характеризують просторово-часовими спектрами. Вони ґрунтуються на уявленні схвильованої поверхні моря тривимірною моделлю у вигляді неізотропного однорідного випадкового поля. Так наприклад, в роботі [17] були отримані графічні зображення спектральних і взаємних спектральних щільностей тривимірної просторової качки "важкого" корабля (ПКІК "Юрій Гагарін").

У статті [5] запропонована експериментальна установка паралельного маніпулятора з 6 ступенями свободи, на основі платформи Гауфа-Стюарта. На основі експериментальних даних проведено порівняльний аналіз точності відтворення тестових траєкторій паралельним маніпулятором під керуванням трьох регуляторів: робастного нелінійного регулятора на основі робочого простору з методом непрямої оцінки стану і тертя системи (закон управління називається TRNCE); нелінійного регулятора на основі робочого простору з методом непрямої оцінки стану і тертя системи (закон управління називається TNCE); ПІД регулятора на основі простору узагальненої координати з методом непрямої оцінки стану і тертя системи (закон управління PIDE). Схема непрямої оцінки стану системи складається з методу Ньютона-Рафсона і алгоритму альфа-бета-трекера, які є простим рішенням і легко застосовні до реальної системи замість дорогого датчика 6 DOF стану. Спостерігач тертя Фрідленде-Парку застосовується в якості еквівалентної оцінки тертя для ослаблення невизначеного обурення через тертя. Була виконана оцінка точності відтворення різноспрямованих чотирьох тестових синусоїдальних сигналів: крен - 2,0°/1,0 Гц, тангажу - 5,0°/0,5 Гц, рискання - 2,5°/1,0 Гц і вертикальна хитавиця - 5,0 мм/0,5 Гц. Лінійні похибки відтворення тестового сигналу у регулятора TRNCE розташовуються в межах + 0,77мм або відносна похибка 15,4% і - 0,48мм або відносна похибка 9,6%, у TNCE між + 0,76 мм або відносна похибка 15,2%. і - 0,52мм або відносна похибка 10,4%, а у PIDE в межах ± 1,5 мм або відносна похибка 30%. Кутові похибки у регулятора TRNCE розташовуються в межах ± 0,35°, у TNCE в межах ± 0,45°, тоді як похибки у регулятора PIDE ± 1,5°.

Аналіз похибок при відтворенні тестового синусоїдального сигналу показав, що нелінійні регулятори TRNCE і TNCE мають меншу похибку, ніж PIDE, за рахунок керування у робочому просторі, компенсації нелінійностей (сили інерції, гравітації, Коріоліса і центробіжних). Більш якісне управління на основі регулятора TRNCE, обумовлене робастністю регулятора, яка враховує невизначеності системи.

У дослідницькій роботі [6] представлений маніпулятор на основі платформи Гауфа-Стюарта для додатків біомеханічного тестування вивчення колінних суглобів людини. Так само він може бути використаний в роботизованих додатках, які вимагають високої точності позиціонування при великих зовнішніх навантаженнях (наприклад, механічна обробка).

Динамічна точність маніпулятора на основі платформи Гауфа-Стюарта вимірювалася при вхідному синусоїдальній сигналі з амплітудою ±1мм і ±1° з частотою 0,1 Гц для кожної з шести ступенів свободи послідовно протягом трьох циклів. Під управлінням децентралізованого (для кожної осі) ПІД регулятора, були отримані середньоквадратичні помилки по лінійним координатам: X - 0,01 мм або відносна похибка 1%, Y- 0,0196мм або відносна похибка 1,96%, Z - 0,0035мм або відносна похибка 0,35%; по кутових координатах: крен - 0,0482°, тангажу - 0,0018°, курс (рискання) - 0,0322°. Під управлінням ПІД регулятора, були отримані середньоквадратичні помилки по лінійним координатам: X - 0,0098мм або відносна похибка 9,8%, Y - 0,0068мм або відносна похибка 0,68%, Z - 0,0026мм або відносна похибка 0,26 %; по кутових координатах: крен - 0,0347°, тангажу - 0,0015°, курс (рискання) - 0,0231°.

Так само в цій роботі наведено аналіз точності відтворення тестового сигналу маніпулятором на основі платформи Гауфа-Стюарта за допомогою алгоритму управління опором (силою), коли зовнішній контур управління опором розміщений навколо внутрішнього контуру управління положення. Динамічна точність маніпулятора на основі платформи Гауфа-Стюарта вимірювалася при зсуві (переміщення по осях X і Y), осьовому навантаженні (переміщення по осі Z), вигину (обертання по осі X і Y) і крученні (обертання по осі Z). При цьому використовувався синусоїдальний сигнал з амплітудою +/- 3 мм (+/- 10 градусів для обертання) і частотою 0,1 Гц для кожної з шести ступенів свободи послідовно протягом трьох циклів. Середньоквадратичні помилки при зсуві (переміщення по осі X): X - 6,40μм, Y- 4,92μм, Z - 1,87μм, крен - 6,02м°, тангажу - 4,08м°, курс (рискання) - 6,23м°. Середньоквадратичні помилки при зсуві (переміщення по осі Y): X - 2,51μм, Y- 6,40μм, Z - 1,32μм, крен - 4,17м°, тангажу - 3,44м°, курс (рискання) - 3,52м°. Середньоквадратичні помилки при осьової навантаженні (переміщення по осі Z): X - 18,68μм, Y- 18,28μм, Z - 9,87μм, крен - 18,64м°, тангажу - 27,44м°, курс (рискання) - 17,20м°. Середньоквадратичні помилки при вигині (обертання по осі X): X - 6,34μм, Y- 14,16μм, Z - 3,01μм, крен - 10,50м°, тангажу - 7,81м°, курс (рискання) - 10,53м°. Середньоквадратичні помилки при вигині (обертання по осі Y): X - 9,66μм, Y- 7,53μм, Z - 3,28μм, крен - 7,37м°, тангажу - 8,25м°, курс (рискання) - 8,00м°. Середньоквадратичні помилки при крученні (обертання по осі Z): X - 10,39μм, Y- 7,63μм, Z - 3,03μм, крен - 10,47м°, тангажу - 13,32м°, курс (рискання) - 7,42м°.

Проаналізувавши експериментальні показники точності відтворення тестового сигналу по кожній з шести ступенів свободи можна зробити висновок, що максимальна похибка відхилення по лінійної координаті це 18,68μм або відносна похибка 0,62% при осьової навантаженні (переміщення по осі Z), по куту крен - 18,64м° також при осьової навантаженні (переміщення по осі Z). Абсолютна точність маніпулятора на основі платформи Гауфа-Стюарта була підтверджена на основі ISO 10360 перевірочного випробування для координатно-вимірювальних машин.

Висновки. З наведеного аналізу точності роботи механізму несучої системи платформи Гауфа-Стюарта в динаміці можна зробити наступні висновки.

Щоб поліпшити якість характеристик по точності необхідно попередньо провести калібрування несучої системи платформи Гауфа-Стюарта, тим самим уточнивши параметри кінематичної моделі і корекцію на різні люфти і ступеня натягу.

Для оцінки точності відтворення еталонної траєкторії в динаміці в основному використовується кругова траєкторія і синусоїдальний сигнал, тобто регулярний сигнал. Платформа Гауфа-Стюарта для різних видів виконуваних завдань показує різні

характеристики по точності. Це пов'язано не тільки виду виконуваних завдань, а й від параметрів конструкції, використовуваної системи управління. Як показує аналіз, точність відтворення залежить так само від швидкості руху, і від напрямку руху (в прямому або зворотному ході).

Для більш якісної оцінки точності управління платформою Гауфа-Стюарта при виконанні конкретного завдання, необхідно в якості тестового сигналу використовувати сигнал, який максимально наближає до реальних умови експлуатації.

Аналіз показує, що використовуються в якості системи управління платформи Гауфа-Стюарта робасні і адаптивні регулятори виконують більш точно відтворення траєкторії ніж прості ПД, ПІД. Це так само підтверджує необхідність використання зворотного зв'язку, який охоплює всю несучу механічну систему платформи Гауфа-Стюарта, а не тільки кожної штанги окремо. Так само можна побачити, що не одна із запропонованих систем управління не можуть гарантувати оптимальне використання платформи Гауфа-Стюарта, щоб досягти граничних точностних можливостей.

Список літератури

1. Stewart D. A platform with 6 degrees of freedom. *Proc. of the Institution of mechanical engineers, 180* (Part 1, 15), 1965. P. 371–386.
2. Merlet, J.-P. Parallel Robots. Springer; 2nd edition, 2006. 394 p.
3. Кузнєцов Ю.М., Дмитрієв Д.О., Діневич Г.Ю. Компоновки верстатів з механізмами паралельної структури : монографія. К.; Херсон: Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т", Херсон. нац. техн. ун-т. 2009. 456 с.
4. Розробка фізичної моделі верстата на основі механізму паралельної структури з системою керування приводами переміщення робочого органа: Звіт по НДДКР Кіровоградський національний технічний університет. № ДР 0109U00210, облік. № 0211U005056. Кіровоград, 2011. 176с.
5. Hag Seong Kim. Task Space Approach of Robust Nonlinear Control for a 6 DOF Parallel *Manipulator. Parallel Manipulators, New Developments* / Book edited by: Jee-Hwan Ryu. I-Tech Education and Publishing, 2008. P. 427-444. ISBN 978-3-902613-20-2. URL: http://www.intechopen.com/books/parallel_manipulators_new_developments (дата звернення: 1.05.2019).
6. Boyin Ding. A Study of a Gough-Stewart Platformbased Manipulator for Applications in Biomechanical Testing: A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Ph.D. in Mechanical Engineering / School of Mechanical Engineering, The University of Adelaide. South Australia, Australia, 2014. 237 p.
7. Hamid D. Taghirad. Parallel Robots. Mechanics and Control. CRC Press; 1 edition, by Taylor & Francis Group, 2013. 533 p.
8. Зозуля В.А., Осадчий С.І., Бєляєв Ю., Pawłowski P. Класифікація завдань і принципів управління механізмом паралельної кінематичної структури для вирішення різних завдань. *Automation of Technological and Business Processes.* 2018. Т.10, №2. С. 18 – 29.
9. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. Москва: Наука, 1966. 623с.
10. Сироткин Р. О. Экспериментальное исследование статических и динамических свойств механизма параллельной структуры на примере несущей системы станка – гексапода: дис. … канд. тех. наук: 05.02.11, 05.02.18 / Ростислав Олегович Сироткин. Москва. 2008. 170 с.
11. Дем'яненко А. С. Система контролю просторового положення інструменту верстата з механізмами паралельної структури: автореф. дис. на здобуття вч. ступеня канд. тех. наук: спец. 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти». Київ. 2015. 20 с.
12. Станки металлорежущие. Методы проверки точности и постоянства отработки круговой траектории. ГОСТ 30544-97. [Введен в действие от 1997-11-20]. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. 1997. 9 с.
13. Marcel Honegger. Nonlinear adaptive control of a 6 dof parallel manipulator. URL: https://www.researchgate.net/publication/228594629_Nonlinear_adaptive_control_of_a_6_dof_parallel_manipulator (дата звернення: 1.05.2019).
14. Rossell, Josep M., Vicente-Rodrigo, Jesus, Rubió-Massegú, J., Barcons, V. An effective strategy of real-time vision-based control for a Stewart platform. *IEEE International Conference on Industrial*

Technology. "Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Lyon, France, 19-22 February 2018". 2018, pp. 75-80. URL: http://hdl.handle.net/2117/114945 (дата звернення: 1.05.2019).

15. Se-Han Lee, Jae-Bok Song, Woo-Chun Choi, Daehie Hong. Position control of a Stewart platform using inverse dynamics control with approximate dynamics. *Journal of Mechatronics* 2003. Vol. 13. pp. 605–619.
16. Alexandre Campos, Jacqueline Quintero, Roque Saltar´en, Manuel Ferre and Rafael Aracil. An Active Helideck Testbed for Floating Structures based on a Stewart-Gough Platform. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. " Proceedings of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Acropolis Convention Center Nice, France, Sept, 22-26, 2008" pp. 3705-3710.
17. Вовк В.Г., Страшко В.А., Тимошенко Н.А. Трехмерная модель динамики стохастических угловых движений корабля в крейсерском движении. *Гіротехнолопї, навігація, керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки*: VI міжнародна науково-технічна конференція. Збірник доповідей. Частина II, 26-27 квітня 2007 р. Київ: Україна. 2007. С.14-19.

References

1. Stewart, D. (1965). A platform with 6 degrees of freedom. *Proc. of the Institution of mechanical engineers, 180* (Part 1, 15), P. 371–386 [in English].
2. Merlet, J.-P. (2006). Parallel Robots, Springer, 2nd edition. 394 p. [in English].
3. Kuznetsov, Yu. M., Dmitriev, D. O. & Dinevich, G. Yu. (2009). *Komponovky verstativ z mekhanizmamy paralel'noyi struktury [Compositions of machine tools with mechanisms of parallel structure]*. Kyiv; Kherson: Nats. tekhn. un-t Ukrayiny "Kyyiv. politekhn. in-t", Kherson. nats. tekhn. un-t [in Ukraine].
4. Rozrobka fizychnoyi modeli verstata na osnovi mekhanizmu paralelʹnoyi struktury z systemoyu keruvannya pryvodamy peremishchennya robochoho orhana [Development of the physical model of the machine on the basis of the mechanism of parallel structure with the control system of the actuators of movement of the working body]. (2011): Zvit po NDDKR Kirovohradsʹkyy natsionalʹnyy tekhnichnyy universytet. – № DR 0109U00210, oblik. № 0211U005056. Kirovograd [in Ukrainian].
5. Hag Seong Kim. (2008). Task Space Approach of Robust Nonlinear Control for a 6 DOF Parallel *Manipulator. Parallel Manipulators, New Developments* / Book edited by: Jee-Hwan Ryu. I-Tech Education and Publishing. P. 427-444. ISBN 978-3-902613-20-2. URL: http://www.intechopen.com/books/parallel_manipulators_new_[in English].
6. Boyin Ding. (2014). A Study of a Gough-Stewart Platformbased Manipulator for Applications in Biomechanical Testing: A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Ph.D. in Mechanical Engineering / School of Mechanical Engineering, The University of Adelaide. South Australia, Australia. 237 p. [in English].
7. Hamid D. Taghirad. (2013). Parallel Robots. Mechanics and Control. CRC Press; 1 edition, by Taylor & Francis Group. 533 p. [in English].
8. Zozulya, V.A., Osadchy, S.I., Belyaev, YU. & Pawłowski, P. (2018). Klasyfikatsiya zavdannya y Pryntsypiv upravlinnya mekhanizmom paralelʹnoyi kinematichnoyi struktury dlya vyrishennyu riznikh zavdannya [Classification of tasks and principles of management of the mechanism of a parallel kinematic structure for solving various problems]. *Automation of Technological and Business Processes*, *10 (2)*, 18 – 29 [in Ukraine].
9. Feldbaum A.A. (1966). *Osnovy teorii optimal'nykh avtomaticheskikh sistem [Fundamentals of the theory of optimal automatic systems]*. Moskow.: Nauka [in Russian].
10. Sirotkin R. A. (2008). Eksperimental'noye issledovaniye staticheskikh i dinamicheskikh svoystv mekhanizma parallel'noy struktury na primere nesushchey sistemy stanka – geksapod [Experimental study of the static and dynamic properties of the structure of the mechanism parallel to the example machine carrier system – hexapod] : *Candidate's thesis*. Moscow [in Russian].
11. Demyanenko A. S. (2015). Systema kontrolyu prostorovo polozhennya instrumentu verstata z mekhanizmami paralelʹnoyi struktury [The system of control of the spatial position of the tool of the machine with mechanisms of parallel structure]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kyiv [in Ukraine].
12. Stanki metallorezhushchiye. Metody proverki tochnosti i postoyanstva otrabotki krugovoy trayektorii [Metal-cutting machines. Methods for checking the accuracy and consistency of working out a circular path]. (1997). *HOST 30544-97 from 20th November 1997*. Minsk. Mezhgosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii [in Russian].
13. Marcel Honegger. (2019). Nonlinear adaptive control of a 6 dof parallel manipulator. URL:

https://www.researchgate.net/publication/228594629_Nonlinear_adaptive_control_of_a_6_dof_parallel_manipulator [in English].

14. Rossell, Josep M., Vicente-Rodrigo, Jesus, Rubió-Massegú, J., Barcons, V. (2018). An effective strategy of real-time vision-based control for a Stewart platform. *IEEE International Conference on Industrial Technology*. "Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Lyon, France, 19-22 February 2018". pp. 75-80. URL: http://hdl.handle.net/2117/114945 [in English].
15. Se-Han Lee, Jae-Bok Song, Woo-Chun Choi, Daehie Hong. (2003). Position control of a Stewart platform using inverse dynamics control with approximate dynamics. *Journal of Mechatronics*, *Vol. 13*, 605–619 [in English].
16. Alexandre Campos, Jacqueline Quintero, Roque Saltar´en, Manuel Ferre and Rafael Aracil. (2008). An Active Helideck Testbed for Floating Structures based on a Stewart-Gough Platform. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Proceedings of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Acropolis Convention Center Nice, France, Sept, 22-26. pp.3705-3710 [in English].
17. Vovk V.G., Strashko V.A., Timoshenko N.A. (2007). Tryvymirna model′ dynamiky stokhastychnykh kutovykh rukhiv korablya v kreysers′komu rusi [Three-dimensional model of the dynamics of the stochastic angular motions of a ship in cruising motion]. Proceedings from gyro technology, navigation, traffic management and aerospace engineering*: VI mizhnarodna naukovo-tekhnichna. Chastyna II (26-27 kvitnya 2007 hoda) - VI International Scientific and Technical Conference.* (pp.14-19). Kyyiv, Ukrayina [in Russian].

Valerii Zozulia, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Sergiy Osadchy,** Prof., DSc., **Mykola Melnichenko,** postgraduate
Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitsky, Ukraine

Analysis of the Accuracy of the Reproduction of the Reference Trajectory by the Gough-Stewart Platform with the Control System for Various types of Tasks

The purpose of the paper is to analyze publications aimed at obtaining an accurate estimate of the test signal reproduction by the Gough -Stewart platform with a specific control system for various types of tasks based on experimental data. At the same, to identify the features of the design, control system, type of test signal and experimental conditions that affect the accuracy characteristics of the Gough -Stewart platform.

In the paper an analysis of researches on the estimation of the accuracy of the motion of the mechanism of the carrier system of the Gough -Stewart system in the dynamics was performed in the development of the reference trajectory, in particular, the circumference and the sinusoidal signal, that is, regular signals. On the basis of the analysis, the connection between the quality of the task of tracking the reference trajectory for various types of tasks performed, from the design parameters used by the control system of the Gough-Stewart platform was evaluated. As the analysis shows, the accuracy of reproduction depends on the speed of movement, and on the direction of motion. For a better evaluation of the accuracy of the control of the Gough-Stewart platform when performing a specific task, it is necessary to use as a test signal a signal that is as close as possible to the actual operating conditions.

The analysis shows that used as a control system for the Gough-Stewart platform, robust and adaptive controls perform more precisely the reproduction of the trajectory than simple PD, PID. This also confirms the need for feedback that covers the entire carrier system of the Gough-Stewart platform, and not just each rod separately. It can also be seen that not one of the proposed control systems can guarantee the optimal use of the Gough-Stewart platform in order to achieve extremely precise characteristics.

Gough-Stewart platform, control system, reference trajectory, accuracy estimates

Одержано (Received) 28.05.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 31.05.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

УДК 004.8/681.5 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).220-227

О. П. Голик, доц., канд. техн. наук, **Р. В. Жесан,** доц., канд. техн. наук, **Ісмаіл Мухаммед,** асп.
Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
e-mail: dego@ukr.net

Обґрунтування автоматизації комп'ютерно-інтегрованої технології ідентифікації та моніторингу нафтових забруднень

В статті виконано аналіз останніх досліджень з технологій очистки морських вод від нафтових забруднень та обґрунтовано доцільність розробки робота зі штучним інтелектом, який зможе безпосередньо у місці забруднення здійснювати аналіз ступеня забруднення та виконувати відповідні очисні заходи. Запропоновано методику досліджень.
штучний інтелект, нафтові забруднення, робот, нейронна мережа

Е. П. Голик, доц., канд. техн. наук, **Р. В. Жесан,** доц., канд. техн. наук, **Исмаил Мухаммед,** асп.
Центральноукраинский национальный технический университет, Кропивницкий, Украина

Обоснование автоматизации компьютерно-интегрированной технологии идентификации и мониторинга нефтяных загрязнений

В статье выполнен анализ последних исследований технологий очистки морских вод от нефтяных загрязнений и обосновано целесообразность разработки робота с искусственным интеллектом, который сможет непосредственно в месте загрязнения осуществлять анализ степени загрязнения и выполнять соответствующие очистительные действия. Предложена методика исследований.
искусственный интеллект, нефтяные загрязнения, робот, нейронная сеть

Постановка проблеми. Однією з багатьох екологічних проблем різних галузей промисловості, зокрема паливно-енергетичного комплексу, є забруднення природного середовища нафтою та нафтопродуктами. Морські перевезення завдають велику шкоду морським екосистемам. Найбільші втрати нафти пов'язані з її транспортуванням з районів добування. Внаслідок аварійних ситуацій та скидання за борт танкерами промивних та баластних вод з'являються постійні поля забруднення на трасах морських шляхів. Під час аварії може розливатися до 40-50 тис.т. нафти та уражається поверхня площею близько 100 км^2 [1]. Навіть при простої морського транспорту відбуваються втрати нафтопродуктів та нафти.

Заходи з охорони навколишнього середовища, які спрямовані на очистку вод від нафтових забруднень, не можуть повністю усунути дану проблему. Тому площа забруднених територій зростає і формуються техногенні скупчення в приповерхневій гідросфері.

Таким чином актуальним є вдосконалення методів ідентифікації та моніторингу нафтових забруднень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [2] для моніторингу забруднення нафтою запропоновано використовувати технологію знімків SAR (Synthetic-aperture radar). Технологія KOMPSAT-5 (Korea MultiPurpose SATellite) переносить S-діапазон SAR для спостереження за Землею та здатний отримувати денну та нічну візуалізацію при будь-яких погодних умовах. Було досліджено регіон Перської затоки. Дана технологія дозволяє виявити географічне розташування та розмір плям забруднення нафтою та нафтопродуктами.

© О. П. Голик, Р. В. Жесан, Ісмаіл Мухаммед, 2019

Автором було запропоновано методику, яка полягає в ідентифікації областей розливу нафти, фільтрації зображень та візуальному аналізі розливів нафти. В результаті автор запропонував створити систему моніторингу розливів нафти в режимі реального часу на основі супутникових знімків SAR.

Однак дана технологія не дозволяє в повній мірі оцінити хімічний склад забруднень та усунути плями забруднень, які можуть залишатись на поверхні до 10 днів і більше.

Оцінити хімічний склад нафтових забруднень безпосередньо у місці аварії було наведено у роботі [3]. Авторами запропоновано дворівневий протокол польових досліджень для моніторингу залишків розливів нафти внаслідок аварії DWH (Deepwater Horizont), які було виявлено поблизу берегів Мексиканської затоки. Було досліджено 11 проб зразків забруднень за хімічними характеристиками. Даний метод дозволяє оцінити вид нафтових забруднень не тільки у морській воді, а й на прибережних територіях. Від існуючих методів він відрізняється тим, що є простішим та дешевшим у використанні.

Однак збір матеріалів для дослідження виконується уручну і потім матеріал надходить до лабораторії. Це призводить до неможливості використовувати даний метод у режимі реального часу для очистки нафтових забруднень, оскільки людина не завжди може потрапити вчасно до місця аварії і одночасно виконати дії з очищення забруднень.

В роботі [4] авторами представлено інформаційний підхід для розрахунку розливів нафти. На основі даних з супутникових систем було побудовано карти розподілу нафтових забруднень, які будуть корисні для роботи органів по боротьбі з забрудненнями морських вод. Метод розробки карт можна використовувати для будь-яких місцевостей, а отримані карти можна використовувати лише для місцевостей, що мають схоже географічне розташування з Лівійським узбережжям.

Авторами розглянуто способи очистки морських акваторій від нафтових забруднень [5]. Наведено механічні, фізико-хімічні та біологічні способи. Проведено аналіз кожного способу та виявлено їх переваги та недоліки. Механічні та фізико-хімічні методи здатні видалити нафту з поверхні води, однак при боротьбі з емульсованою нафтою та тонкою плівкою вони практично безсилі. Авторами запропоновано усунути даний недолік за допомогою біоремедаційного способу очистки водної екосистеми.

Робота [6] присвячена автоматизації процесів біологічної очистки стічних вод підприємств нафтової промисловості. Авторами використано нейрону мережу в задачі керування комплексом очисних споруд, яка дозволяє прогнозувати значення показників якості очищеної води, згідно виміряних на вході показниках неочищеної води. Для розв’язання даної задачі використано керування «з попередженням». Однак розроблену нейрону мережу не можна використовувати для будь-яких місцевостей, оскільки вона навчена для конкретного підприємства нафтової промисловості.

Запропоновано метод виявлення нафтових забруднень [7]. Автором у якості основи використано дані дистанційного зондування та методи геоінформатики. За допомогою радіолокаційних зображень було проведено ідентифікацію забруднень, що залишають танкери на поверхні води. Крім того, було використано дані системи автоматичної ідентифікації суден, що дозволило довести причетність суден до нафтових забруднень.

В роботах [8, 9] запропоновано для очистки поверхні води використовувати мульти-робота, який запобігає розповсюдженню нафтових плям. Основними компонентами робота є модуль GPS, модуль передавача та цифровий компас, мікроконтролер і регулятор напруги. Однак даний робот не виконує очистку води від

нафтових плям, а запобігає зростанню площі нафтових забруднень. Для реалізації поставленої в роботі мети необхідно мати близько сотні таких роботів.

В роботі [10] виконано аналіз існуючих технологій очистки поверхні води від нафтових забруднень. Автором зазначено, що дані технології потребують удосконалення, проте запропоновані роботи краще працюють, ніж комерційні скімери у важкодоступних місцях.

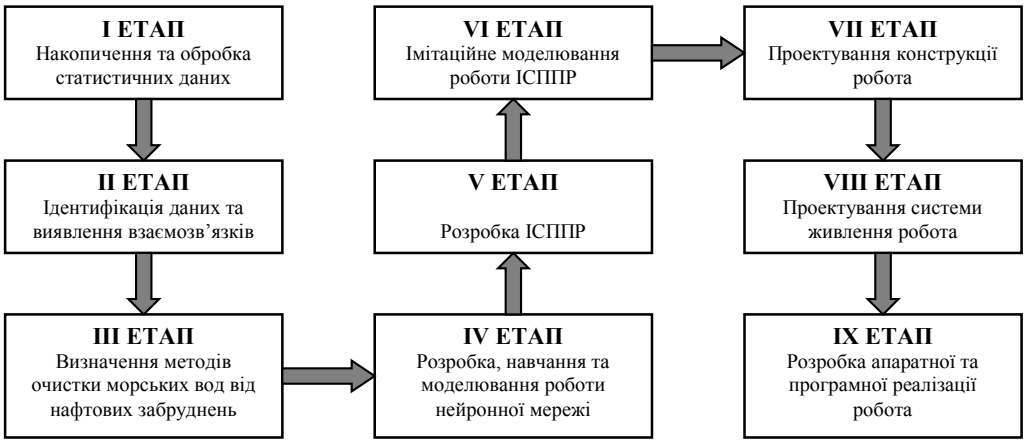
Постановка завдання. Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що технології автоматизованого комп'ютерно-інтегрованого моніторингу та ідентифікації нафтових забруднень потребують вдосконалення. Більшість робіт присвячена методам очистки нафтових забруднень для конкретних місцевостей, і тому не можуть бути універсальними.

Оскільки розливи нафти в морських водах відбуваються часто, то збитки морській екосистемі є суттєвими. Нафтові компанії не можуть попередити розливи нафти в майбутньому, але вони повинні бути готові до того, щоб швидко реагувати на заподіяні збитки. Такі технології знаходяться на ранній стадії розвитку.

Головне щоб ці технології були там, де відбудеться наступний розлив нафтопродуктів.

Метою роботи є розробка науково-обґрунтованої автоматизованої комп'ютерно-інтегрованої технології ідентифікації та моніторингу нафтових забруднень, шляхом розробки робота зі штучним інтелектом, який зможе безпосередньо у місці забруднення здійснювати аналіз ступеня забруднення та виконувати відповідні очисні заходи.

Основний матеріал. Для досягнення поставленої мети необхідно розробити методику досліджень, яка повинна містити відповідні етапи роботи, показані на рис. 1.



ІСППР – Інтелектуальна система підтримки прийняття рішень

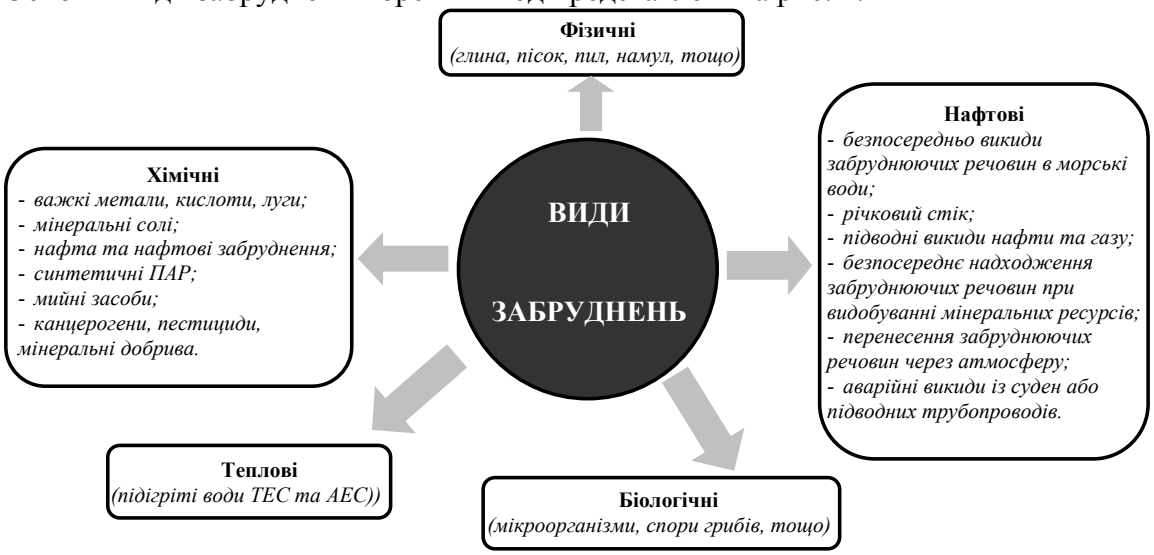
Рисунок 1 – Етапи розробки автоматизованої комп'ютерно-інтегрованої технології моніторингу та ідентифікації нафтових забруднень

Пропонується наступна методика.

На першому етапі необхідно провести дослідження типів нафтових забруднень, їх хімічного складу, властивостей та інші показники.

Джерелами забруднення, як правило, є нафтопереробні та нафтоочисні станції. Крім того при морських перевезеннях танкери також забруднюють воду, шляхом зливу баластних вод, промивки нафтових контейнерів та випадкових аварій. Найбільш часто нафтові розливи трапляються в таких географічних місцевостях: Атлантичне узбережжя США, Балтійське, Чорне та Середземне моря, Перська затока, Панамський канал, пролив Ла-Манш, узбережжя Японії, Мексиканська затока та ін.

Основні види забруднень морських вод представлені на рис. 2.



ПАР – поверхнево-активні речовини; ТЕС – теплова електростанція; АЕС – атомна електростанція

Рисунок 2 – Види забруднень морських вод

До складу нафти в основному входять вуглеводні компоненти, а саме: парафіни (до 90% складу), циклопарафіни (30-60%), ароматичні вуглеводні (20-40%), олефіни (до 10%).

Нафтові забруднення мають наступні властивості:

- властивості безпосередньо самої нафти;
- гідрологічний режим моря;
- рівень та характер фонового забруднення;
- концентрація в нафті та у воді поверхнево-активних речовин.

Наразі відомо два основних способи розв’язання проблеми забруднення морської води:

- заходи з попередження забруднення морської води;
- заходи з очистки існуючих забруднень.

В даній роботі пропонується розробити робота, який буде займатися очисткою нафтових забруднень, шляхом моніторингу та ідентифікації нафтових забруднень.

Основними причинами аварій, внаслідок яких виникають забруднення, є:

- деформація дна, зсуви та розмиви;
- стирання труб у місці їх перетину;
- пошкодження при дії торосистих льодових утворень;
- корозія труб.

Першим кроком необхідно виконати заходи з ліквідації забруднень морського середовища. На ефективність таких заходів впливають наступні чинники: швидкість вітру; великі площі розливів; висока в’язкість нафти.

Проаналізувавши заходи зі збору нафти з поверхні води можна припустити, що робот повинен виконувати наступні дії:

1. Збір розлитої нафти.
2. Ідентифікацію забруднення.
3. Вибір сорбенту для поглинання нафти.
4. За допомогою хімічних та біологічних препаратів розчинити нафтові плями.

5. Спалювання нафти та інші методи.

Крім того, необхідно розробити базу даних та базу знань, за допомогою яких робот мав би змогу на місці розливу оцінити тип забруднення та обрати найбільш підходящий метод очистки.

Опис глобальної логічної структури бази даних можна представити у вигляді схеми. Схема бази даних, як правило, дуже складна, оскільки вона визначає всі типи елементів даних, які зберігаються в базі даних, а також усі зв'язки між ними. При побудові схеми та підсхеми необхідно врахувати необов'язковий, можливий, умовний та обов'язковий зв'язки.

Ідентифікація проводиться з метою порівняння нафтових забруднень, розпізнавання та встановлення відповідності між розпізнаним нафтовим забрудненням і його еталоном. У процесі ідентифікації визначають відповідності між існуючим розливом нафти і його зразком, які характеризуються сукупністю певних ознак.

Для цього можна застосувати наступні способи ідентифікації: класифікаційний, посилальний, описовий, описово-посилальний та унікальних найменувань. Використання сполучення «об'єкт-ім'я» є обов'язковою умовою ідентифікації.

Класифікаційний метод доцільно використовувати в тих випадках, коли необхідно ідентифікувати групи однорідних об'єктів. Таким чином можна з великої кількості об'єктів виділяти саме ті, що мають певні ознаки.

Якщо відомі конкретні характеристики (властивості, показники, особливі ознаки, тощо) в нормативних або технічних документах, то слід обирати посилальний спосіб ідентифікації.

Описовий спосіб дає змогу ідентифікувати конкретний об'єкт шляхом опису його характеристик. При цьому однорідні об'єкти, що мають однакові найменування, сферу застосування і показники, можуть відрізнятись один від одного значеннями цих показників.

Якщо використовувати лише частину основних характеристик об'єкта у поєднанні з посиланням на документ, в якому наведені його характеристики, то слід використовувати описово-посилальний метод ідентифікації.

В ідентифікації у процесі встановлення тотожності використовують дві стадії: аналітичну та синтетичну. Процес встановлення тотожності полягає у всебічному вивченні та аналізі ознак об'єктів ідентифікації. Після проведення вивчення ознак здійснюється їх порівняння. Можливі наступні випадки:

- відсутній ідентифікований об'єкт;
- порівняння з ознаками ідентифікованого об'єкта неможливе.

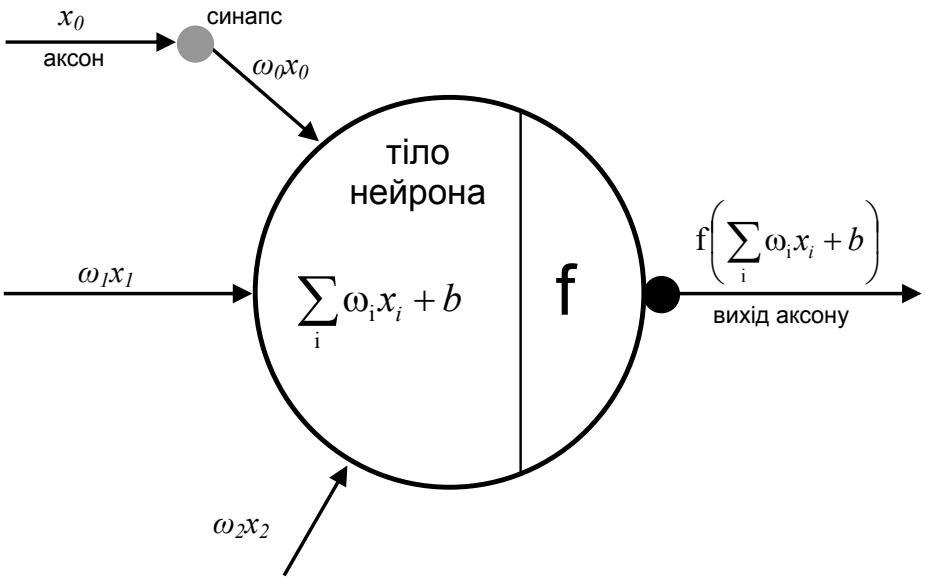
Кожен з об'єктів має множинність ознак, тому доцільно використовувати нечітку логіку. Для початку доцільно розглянути об'єкт з одним виходом та n входами. Вхідні змінні можуть бути кількісними ф якісними. Крім того необхідно ввести поняття лінгвістичних змінних та терми для їх оцінки. Після чого необхідно виконати фазифікацію змінних, обрати алгоритм опрацювання інформації та побудувати функції належності.

Штучні нейронні мережі дають змогу відтворити здатність навчатися і виправляти помилки. Штучний нейрон отримує вхідні сигнали через кілька вхідних каналів. Кожен вхідний сигнал проходить через з'єднання, що має певне значення. З кожним нейроном пов'язане порогове значення. Обчислюється зважена сума входів, з неї віднімається граничне значення. На рис. 3 наведена модель штучного нейрону [11].

Моделювання роботи нейронних мереж зі штучним інтелектом зручно виконувати за допомогою програмного пакету MATLAB. Саме для інтелектуальних нейронних мереж доцільно використовувати графічний інтерфейс користувача NNTool

(Neural Network Toolbox). Це дозволить у заданому діапазоні зміни вхідних змінних з заданою точністю відтворювати та моделювати довільну неперервну функцію цих змінних.

Для запобігання перенавчання мережі можна використати підхід, коли на початку роботи похибка мережі при навчальних та контрольних тестах буде однакова. Якщо контрольна похибка перестала зменшуватись або почала зростати – це вказує на те, що навчання слід завершити. Таким чином необхідно провести серію експериментів з різними мережами щоб обрати найбільш придатну. Якщо в результаті послідовних кроків навчання та контролю похибка залишається недопустимо великою, то доцільно змінити модель нейронної мережі (ускладнити мережу, збільшити кількість нейронів тощо).



x_i – вхідний сигнал; ω_i – вага вхідного сигналу; f – функція активації; b – ваговий коефіцієнт

Рисунок 3 – Модель штучного нейрону

Крім того можна використати модульний принцип навчання. Такий підхід представляє собою пошук рішення не в усьому просторі вагових коефіцієнтів, а лише в деякій його частині. Перевагами такого принципу навчання є: висока швидкість навчання мережі; більш зручний метод підбору структури нейронної мережі; контроль за навчанням.

Оскільки такі роботи повинні працювати у зовнішніх умовах, зокрема у морських водах, то для їх живлення доцільно використовувати сонячну енергію. При проектуванні систем гарантованого живлення роботів з сонячними установками необхідно володіти інформацією про сонячний енергетичний потенціал місцевості, де планують використовувати роботів.

Висновки. Для того щоб розробити робота, який повинен в реальному часі виконувати функції моніторингу, ідентифікації та очистки морських вод від нафтових забруднень, необхідно володіти інформацією про види розливів нафти, їх хімічний склад та методи і засоби очистки. На основі отриманої інформації створити бази даних та знань, що дасть змогу розробити нейронну мережу для робота.

Оскільки наслідки забруднень нафтопродуктами можуть швидко зростати, то потрібно щоб такі роботи були розташовані безпосередньо на морському транспорті. Таким чином можна усунути проблему дистанційного зондування.

Наразі триває роботи з накопичення статистичних даних та розробка бази даних.

Список літератури

1. Соловйова Ж. Ф., Нєпєіна Г.В. Забруднення світового океану нафтопродуктами. *Наукові праці. Екологія.* 2011. Т. 150, № 138. URL: http://ecology.chdu.edu.ua/article/view/63687/59185 (дата звернення: 12.03.2019).
2. Harahsheh, H. A. Oil spill detection and monitoring of Abu Dhabi coastal zone using Kompsat-5 SAR Imagery. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci*. 2016. Vol. XLI-B8, P. 1115-1121. URL: https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLI-B8/1115/2016/isprs-archives-XLI-B8-1115-2016.pdf (Last accessed 24 Apr 2019).
3. Han Y., Clement T.P. Development of a field testing protocol for identifying Deepwater Horizon oil spill residues trapped near Gulf of Mexico beaches. *PLoS ONE*, 2018 Vol. 13(1). DOI: 10.1371/journal.pone.0190508.
4. Eljabri, Abdallh & Gallagher, Caroline. Developing Integrated Remote Sensing and GIS Procedures for Oil Spills Monitoring at Libyan Coast. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2012. Vol. 44. URL: http://www.ipcbee.com/vol44/004-ICEBS2012-C10001.pdf (Last accessed 12 Apr 2019).
5. Долгополова В. Л., Патрушева О. В. Способы очистки морских акваторий от нефтяных загрязнений. *Молодой ученый*. 2016. №29 (133). С. 229-234. URL: https://moluch.ru/archive/133/37456/ (дата звернення: 13.05.2019).
6. Плехов В. Г., Дьяченко В. В., Дьяченко И. Л. Автоматизация процессов биологической очистки сточных вод предприятий нефтяной промышленности. *Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология*. 2012. №14. С. 22-33. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-protsessov-biologicheskoy-ochistki-stochnyh-vod-predpriyatiy-neftyanoy-promyshlennosti (звернення: 13.05.2019).
7. Затягалова В.В. Геоэкологический мониторинг загрязнений моря по данным дистанционного зондирования. *Образовательные ресурсы и технологии*. 2014. №5(8). С. 95-100. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/geoekologicheskiy-monitoring-zagryazneniy-morya-po-dannym-distantsionnogo-zondirovaniya (дата звернення: 13.05.2019).
8. Zahugi E.M.H., Shanta M.M., Prasad T.V. Design of multi-robot system for cleaning up marine oil spill. *International Journal of Advanced Media and Communication*. 2012. Vol. 2, № 4. P. 33-43. URL: https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/information_technology/DESIGN%20OF%20MULTI.pdf (Last accessed: 20.05.2019).
9. Zahugi E.M.H., Shanta M.M., Prasad T.V. Oil spill cleaning up using swarm of robots. *Advances in Computing and Information Technology. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2013. Vol. 178. P. 215-224. DOI: 10.1007/978-3-642-31600-5_22.
10. Using robots to clean oil spills. *Robotics tomorrow*: веб-сайт. URL: https://www.roboticstomorrow.com/article/2013/12/using-robots-to-clean-oil-spills (Last accessed: 14.05.2019)
11. Convolution neural networks for visual recognition: веб-сайт. URL: http://cs231n.github.io (Last accessed: 05.05.2019)

References

1. Solovjova, Zh., & Nyepyeina, G. (2011), Zabrudnennya svitovogo okeanu naftoproduktamy [The pollution oh the World Ocean oil products]. *Naukovi pratsi. Ekolohiya – Scientific works. Ecology*, *Vol. 150, 138,* 76-81. Retrieved from http://lib.chdu.edu.ua/pdf/naukpraci/ecology/2011/150-138-18.pdf [in Ukrainian].
2. Harahsheh, H. A. (2016). Oil spill detection and monitoring of Abu Dhabi coastal zone using Kompsat-5 SAR Imagery. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci*, *Vol. XLI-B8,* 1115-1121. Retrieved from https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLI-B8/1115/2016/isprs-archives-XLI-B8-1115-2016.pdf [in English].
3. Han, Y. & Clement, T.P. (2018). Development of a field testing protocol for identifying Deepwater Horizon oil spill residues trapped near Gulf of Mexico beaches. *PLoS ONE*, *Vol. 13(1)*. DOI: 10.1371/journal.pone.0190508 [in English].
4. Eljabri, Abdallh & Gallagher, Caroline. (2012). Developing Integrated Remote Sensing and GIS Procedures for Oil Spills Monitoring at Libyan Coast. *WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol. 44,* Retrieved from http://www.ipcbee.com/vol44/004-ICEBS2012-C10001.pdf [in English].

5. Dolgopolova, V.L., & Patrusheva, O.V. (2016). Sposobyi ochistki morskih akvatoriy ot neftyanyih zagryazneniy [Methods for cleaning offshore areas from oil pollution]. *Molodoy uchenyiy - Young scientist, №29(133),* 229-234. Retrieved from https://moluch.ru/archive/133/37456/ [in Russian].
6. Plehov, V.H., Dyachenko, V.V. & Dyachenko, I.L. (2012). Avtomatizatsiya protsessov biologicheskoy ochistki stochnyih vod predpriyatiy neftyanoy promyishlennosti [Automation of processes of biological wastewater treatment of oil industry enterprises]. *Vestnik PNIPU. Himicheskaya tehnologiya i biotehnologiya - Bulletin PNRPU. Chemical technology and biotechnology, №14,* 22-33. Retrieved from https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-protsessov-biologicheskoy-ochistki-stochnyh-vod-predpriyatiy-neftyanoy-promyshlennosti [in Russian].
7. Zatyagalova, V.V. (2014). Geoekologicheskiy monitoring zagryazneniy morya po dannyim distantsionnogo zondirovaniya [Geoecological monitoring of sea pollution from remote sensing data]. *Obrazovatelnyie resursyi i tehnologii - Educational resources and* technology, *№5(8),* 95-100. Retrieved from https://cyberleninka.ru/article/n/geoekologicheskiy-monitoring-zagryazneniy-morya-po-dannym-distantsionnogo-zondirovaniya [in Russian].
8. Zahugi E.M.H., Shanta M.M. & Prasad T.V. (2012). Design of multi-robot system for cleaning up marine oil spill. *International Journal of Advanced Media and Communication*, *Vol. 2, № 4,* 33-43. Retrieved from https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/information_technology/DESIGN%20OF%20MULTI.pdf [in English].
9. Zahugi,E.M.H., Shanta, M.M. & Prasad, T.V. (2013). Oil spill cleaning up using swarm of robots. *Advances in Computing and Information Technology. Advances in Intelligent Systems and Computing*, *Vol. 178*, 215-224. DOI: 10.1007/978-3-642-31600-5_22 [in English].
10. Using robots to clean oil spills. *Robotics tomorrow*. *roboticstomorrow.com*. Retrieved from https://www.roboticstomorrow.com/article/2013/12/using-robots-to-clean-oil-spills [in English].
11. Convolution neural networks for visual recognition. *cs231n.github.io.* Retrieved from http://cs231n.github.io [in English].

Olena Holyk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Roman Zhesan,** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mohammad Ismail,** postgraduate
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Rationale for the Development of Automated Computer-integrated Technology for the Identification and Monitoring of Oil Pollution

Large oil spills in seawater are not regular, but the damage to the marine ecosystem is significant. Petroleum companies and oil shipment vessels can not prevent oil spills in the future, but they must be prepared to respond quickly to damages. Such technologies are at an early stage of development.

The purpose of the article is to study modern automated technologies for monitoring, identification and purification of marine waters from oil pollution. The analysis of recent research has been performed and the need to develop a robot with artificial intelligence has been substantiated. A research methodology and stages of work are proposed. This robot should directly at place oil spill analyze the degree of pollution and clean the sea water. To develop a robot, it is suggested to use statistical methods (for processing data and identifying interactions); mathematical apparatus of fuzzy logic and neural networks; intelligent decision support systems; methods of simulation. Using the database and knowledge base, the robot will be able, depending on the type of pollution, to choose a method of cleaning sea water from oil pollution.

In order to develop a robot that should perform the functions of monitoring, identifying and purifying seawater from oil pollution in real time, it is necessary to have information on types of oil spills, their chemical composition and methods of purification. On the basis of the information obtained, create databases and knowledge that will enable the development of the intellectual system with the neural network. Since the impacts of oil pollution can grow rapidly, it is necessary that such works be located directly at the facility (near wells, oil refineries, oil pipelines, etc.), in particular, by sea transport. This can solve the problem of remote sensing of oil spills. In addition, when developing a robot, it is necessary to consider the possibility of analyzing meteorological information. Now is working is ongoing on the accumulation of oil pollution statistics.

artificial intelligence, oil pollutions, robot, neural network

Одержано (Received) 26.05.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 27.05.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

БУДІВНИЦТВО

УДК 624.014:621.873.874 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).228-235

В.А. Пашинський, проф., д-р техн. наук, **І.О. Скриннік**, доц., канд. техн. наук,
І.В. Харченко, доц., канд. екон. наук, **С.Л. Хачатурян,** доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: pva.kntu@gmail.com

Вагові характеристики та області раціонального використання сталевих балок у будівлях та конструкціях вантажопідйомних машин

За результатами експериментального проектування сталевих балок чотирьох типів виявлені та описані залежності їх маси від прольоту й діючого навантаження. Встановлено, що при малих навантаженнях і великих прольотах власна вага балок може перевищувати 20% корисного навантаження. Розроблені укрупнені розцінки на виготовлення та монтаж сталевих балок і колон різних типів. З урахуванням несучої здатності, металоємності та вартості надані рекомендації щодо раціонального використання балок різних типів.
сталеві балки, металоємність, вартість, області раціонального використання

В.А. Пашинский, проф., д-р техн. наук, **И.О. Скрынник,** доц., канд. техн. наук,
И.В. Харченко, доц., канд. екон. наук, **С.Л. Хачатурян,** доц., канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Весовые характеристики и области рационального использования стальных балок в зданиях и конструкциях грузоподъемных машин

По результатам экспериментального проектирования стальных балок четырех типов выявлены и описаны зависимости их массы от пролета и действующей нагрузки. Выявлено, что при малых нагрузках и больших пролетах собственный вес балок может превышать 20% полезной нагрузки. Разработаны укрупненные расценки на изготовление и монтаж стальных балок и колонн различных типов. С учетом несущей способности, металлоемкости и стоимости даны рекомендации относительно рационального использования балок различных типов.
стальные балки, металлоемкость, стоимость, области рационального использования

Постановка проблеми. На першому етапі проектування покрівель і перекрить виробничих, громадських і сільськогосподарських будівель, а також конструкцій вантажопідйомних машин (підвісних, мостових і козлових кранів тощо) часто виникає необхідність оцінити доцільність використання сталевих балок різних типів. Важливим інструментом такого вибору може бути попередня оцінка металоємності та вартості балок різних типів ще до їх початку реального проектування. Для цього потрібно встановити залежності показників металоємності та вартості від діючого навантаження, типу та прольоту балок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для орієнтовного попереднього оцінювання металоємності в літературі зазвичай рекомендується виконувати наближені розрахунки конструкцій. Одним з перших способів визначення витрат сталі без проектування конструкції є метод характеристик маси, описаний в [1]. Цей метод не набув поширення унаслідок його складності та трудомісткості, близької до виконання

© В.А. Пашинський, І.О. Скриннік, І.В. Харченко, С.Л. Хачатурян, 2019

наближених розрахунків. Використання досвіду проектування аналогічних конструкцій (наприклад, масу балки рекомендується приймати рівною 3…5% від навантаження на неї, а масу кроквяних ферм – у межах 20…40 кг/м^2 покрівлі) [2] часто призводить до значних похибок. У попередні роки магістрантами кафедри будівельних, дорожніх машин і будівництва ЦНТУ виконано ряд досліджень [3, 4, 5] та інших, у яких за результатами експериментального проектування отримані залежності витрат сталі на балкові конструкції від основних конструктивних факторів. Досвід показав, що такий підхід є досить перспективним, але для отримання практично корисних рекомендацій з попереднього оцінювання металоємності балкових конструкцій необхідно доповнити дослідження [3, 4, 5] аналізом інших типів балок, узагальнити й систематизувати отримані результати.

Постановка завдання. За результатами експериментального проектування отримати залежності для попереднього визначення металоємності сталевих балок різних типів та навантажень від їх ваги, а також окреслити області раціонального використання балок досліджених типів з урахуванням критеріїв металоємності та вартості.

Виклад основного матеріалу. Методика досліджень. Для подальшого аналізу використані результати експериментального проектування сталевих балок чотирьох типів, перелічених у таблиці 1. Експериментальне проектування виконувалося під керівництвом авторів статті в магістерських роботах [3, 4, 5], а також доповнювалося в даній роботі. Балки проектувалися для різних комбінацій прольоту та граничного розрахункового значення погонного навантаження, які були встановлені за несучою здатністю балок та областю їх можливого використання. Згідно з вказівками ДБН [6], балки виконувалися з широко вживаної напівспокійної маловуглецевої сталі С 245. Підбір перерізів здійснювався в середовищі Microsoft Excel згідно з вимогами норм проектування будівельних сталевих конструкцій [6].

Таблиця 1 – Характеристики запроектованих балок

Тип балок	L, м	Кількість	g, кг/м	p, %
Прокатні за сортаментом [7]	3…24	56 / 42	8…315	0,3…25,9
Перфоровані на основі сортамента [7]	6…30	35 / 24	13…336	0,7…22,3
Зварні за сортаментом [5]	3…36	70 / 61	6…545	0,3…35,9
Зварні індивідуального проектування	6…36	42 / 42	13…976	0,6…31,4

Джерело: розроблено авторами з використанням [5, 7].

Балки усіх типів проектувалися під навантаження в межах 5…150 кН/м. Різні межі зміни прольотів, наведені в таблиці 1, обумовлені обмеженнями сортаментів балок різних типів. У графі "Кількість" через дріб указана кількість можливих комбінацій прольоту й навантаження та фактична кількість підібраних перерізів. За винятком зварних балок індивідуального проектування, остання є дещо меншою внаслідок недостатньої несучої здатності профілів використаних сортаментів. Останні графи таблиці містять значення погонної маси g кг/м та відносної ваги балок p, %.

Прокатні балки та балки з перфорованою стінкою запроектовані з двотаврів балкового типу з паралельними гранями поличок за сортаментом [7]. Оскільки висота перфорованих балок приблизно в 1,4 рази більша від висоти вихідного прокатного двотавра, вони мають більшу жорсткість і можуть працювати при більших прольотах. Зварні балки запроектовані у двох варіантах. Балки на основі розробленого в [5] сортаменту прокатних двотаврів мають висоту до 1700 мм та відповідні обмеження за несучою здатністю. Перерізи балок індивідуального проектування компонуються

окремо для кожної комбінації прольоту й навантаження, а їх висота сягає 2640 мм. При обчисленні витрат сталі на зварні балки і балки з перфорованою стінкою враховувалися також поперечні ребра жорсткості, якщо їх встановлення вимагають умови норм [6] щодо забезпечення місцевої стійкості стінки.

Області можливого та раціонального використання балок різних типів із сталі С 245 орієнтовно встановлені за результатами проведеного експериментального проектування. На кожному з графіків рисунка 1 показані три зони можливих комбінацій прольоту й навантаження на балку, які відповідають таким критеріям підбору перерізу:

"міцність" – зона підбору перерізу з повним використанням міцності сталі;

"жорсткість" – зона підбору перерізу за вимогами другого граничного стану (жорсткості), коли переріз балки є недонапруженим;

"непридатні" – зона комбінацій прольоту й навантаження, при яких переріз балки з використаного сортамента підібрати неможливо; для зварних балок індивідуального проектування ця зона відсутня.

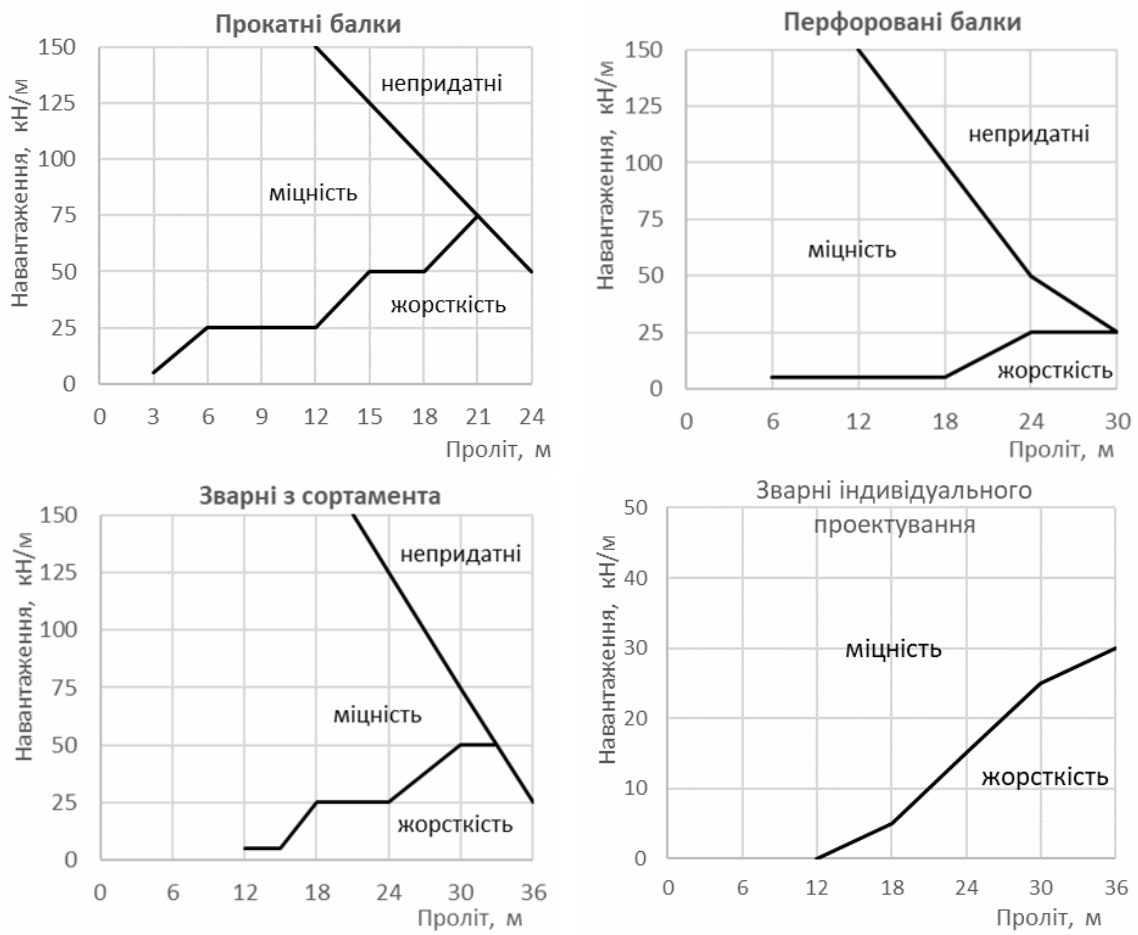


Рисунок 1 – Галузі можливого використання балок різних типів

Джерело: розроблено авторами

Графіки з рисунка 1 дозволяють при відомих значеннях прольоту й навантаження оцінити можливість та раціональність використання балок певного типу. Наприклад, при прольоті L = 18 м і граничному розрахунковому значенні навантаження q = 30 кН/м прокатна балка з двотавра балкового типу за сортаментом [7] буде підібрана за критерієм жорсткості, що робить її нераціональною. Балки інших типів

підбираються з повним використанням міцності сталі С 245. При тому ж прольоті та навантаженні q = 130 кН/м можна запроектувати тільки зварну балку за сортаментом [5] або зварну балку з індивідуальною компоновкою перерізу. Перерізи прокатної балки та балки з перфорованою стінкою для таких умов підібрати неможливо унаслідок обмеженості наявного сортаменту [7] прокатних двотаврів.

Вагові характеристики балок встановлені й проаналізовані за результатами експериментального проектування балок чотирьох типів, охарактеризованих в таблиці 1. Основною ваговою характеристикою балок є погонна маса. Аналіз результатів експериментального проектування показав, що залежність погонної маси балок усіх типів від прольоту L та погонного навантаження q на можна описати виразом:

$$g = \left(A \times L + B \times L^2\right) \times \sqrt{q} + C. \quad (1)$$

Відносна вага балки дорівнює відсотку власної ваги балки відносно граничного розрахункового значення діючого корисного навантаження. Її залежність від прольоту й навантаження може бути описана виразом

$$p = \frac{D \times L + E \times L^2}{\sqrt{q}} + F. \quad (2)$$

Коефіцієнти A, B, *C*, D, E, F залежностей (1) і (2) обчислені на основі методу найменших квадратів з використанням функції Microsoft Excel "Пошук рішення" і наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Коефіцієнти формул (1) і (2) для обчислення вагових характеристик балок

Тип балок	Формула (1)			Формула (2)		
	A	B	C	D	E	F
Прокатні за сортаментом [7]	1,150	0,046	–1,8	0,904	0,059	0,06
Перфоровані на основі сортамента [7]	1,267	0,016	–6,6	0,682	0,037	0,25
Зварні за сортаментом [5]	1,270	0,028	–10,5	0,650	0,052	0,08
Зварні індивідуального проектування	1,179	0,024	–7,1	0,646	0,039	0,24

Джерело: розроблено авторами з використанням [5, 7]

Для визначення повної маси балки того чи іншого типу необхідно результат обчислень за формулою (1) перемножити на проліт балки. Формула (2) дозволяє урахувати власну вагу балок при визначенні навантажень на них. Звертає на себе увагу той факт, що відносна вага балок усіх типів різко зростає при великих прольотах і малих навантаженнях. При навантаженнях 5…15 кН/м та прольотах понад 18 м відносна вага балок усіх типів перевищує 10%, а при подальшому збільшенні прольоту може досягнути 30% від діючого навантаження. Настільки великі частки власної ваги балок по відношенню до корисного навантаження не узгоджуються з відомими рекомендаціями і підкреслюють необхідність більш точного урахування власної ваги при проектуванні балкових конструкцій.

Укрупнені розцінки на виготовлення й монтаж балок і колон різних типів розроблені у формі аналітичних залежностей від маси конструкції та ціни використаного прокату. Для цього в середовищі програмного комплексу АВК складені

локальні кошториси на виготовлення й монтаж конструкцій масою від 0,2 т до 25 т. Заводська вартість балки чи колони включає вартість металу та допоміжних матеріалів, витрати на експлуатацію машин і механізмів, заробітну платню та загальнозаводські витрати. Вартість монтажу містить вартість допоміжних матеріалів, витрати на експлуатацію машин, заробітну платню та загальновиробничі витрати.

Аналіз розроблених кошторисів показав, що заводська вартість конструкцій практично пропорційна їх масі та ціні використаного прокату, а вартість монтажу залежить від виду конструкції (балка чи колона) та її маси. Залежності заводської вартості та вартості монтажу від маси балок і колон є лінійними, проходять близько до початку координат і досить точно описуються аналітичними виразами:

вартість виготовлення $C_З = C_П K_З G$; (3)

вартість монтажу $C_М = K_М G$; (4)

сумарна кошторисна вартість $C_К = G\left(C_П K_З + K_М\right)$, (5)

де $C_З$ – заводська вартість конструкції;
$C_М$ – вартість монтажу конструкції;
$C_К$ – повна кошторисна вартість конструкції;
$K_З$ – коефіцієнт для визначення заводської вартості;
$K_М$ – коефіцієнт для визначення вартості монтажу;
$C_П$ – ціна прокату, грн/т;
G – маса конструкції в тонах.

Значення коефіцієнтів у формулах (3), (4), (5) отримані шляхом апроксимації залежностей вартості від маси конструкцій за методом найменших квадратів:

- для конструкцій з прокатних двотаврів $K_З = 1{,}11$;
- для конструкцій із зварних двотаврів $K_З = 1{,}19$;
- для наскрізних конструкцій $K_З = 1{,}49$;
- для балок і ферм $K_М = 2515$;
- для колон $K_М = 2100$.

Конкретні робочі формули для визначення вартості конструкцій різних типів отримуються шляхом підстановки до формул (1)…(3) відповідних значень коефіцієнтів $K_З$ і $K_М$. Зокрема, повна кошторисна вартість прокатної балки дорівнює

$$C_{КПР} = G\left(1{,}11\, C_П + 2515\right), \quad (6)$$

а зварної $$C_{КЗВ} = G\left(1{,}19\, C_П + 2515\right). \quad (7)$$

Ринкову ціну прокату $C_П$, який використовується для виготовлення конструкції (лист, двотавр, кутник) можна встановити за сайтами торгівельних організацій, а масу конструкцій G – за результатами її проектування або за формулою (1) і таблицею 2.

Подання розцінок у вигляді аналітичних виразів (3)…(7) дає змогу автоматизувати визначення вартості конструкцій і таким чином проаналізувати значну кількість різних проектних варіантів з метою вибору оптимального рішення.

Рекомендації з вибору оптимального конструктивного рішення базуються на отриманих залежностях для визначення показників металоємності та вартості балок. Порівняння можливих конструктивних рішень слід здійснювати у такому порядку:

1) за графіками рисунка 1 оцінюється можливість використання різних типів балок при заданому значенні прольоту й навантаженні;

2) за формулою (1) та коефіцієнтами з таблиці 2 обчислюються значення погонної та повної маси балок обраних типів;

3) за формулами (6), (7) визначаються значення вартості балок обраних типів;

4) оптимальне конструктивне рішення обирається за найменшими показниками металоємності та вартості з урахуванням технологічних можливостей виробника конструкцій та архітектурних вимог.

У якості прикладу в таблиці 3 наведені значення металоємності та вартості балки прольотом 18 м під погонне навантаження 60 кН/м. Згідно з графіками рисунка 1, при таких параметрах перерізи балок усіх чотирьох типів можуть бути підібрані за умовою міцності. Погонна маса балок визначена за формулою (1) з коефіцієнтами з таблиці 2, а повна маса отримана множенням погонної маси на проліт. Вартість 1 т двотаврового та листового прокату для виготовлення балок встановлена за сайтами торгівельних організацій. Повна вартість прокатних балок обчислена за формулою (6), а балок усіх інших типів – за формулою (7).

Таблиця 3 – Вибір оптимального конструктивного рішення балки прольотом 18 м під навантаження 60 кН/м

Тип балок	Маса, т		Вартість, тис. грн	
	погонна	повна	1 т прокату	балки
Прокатні за сортаментом [7]	0,156	18,8	25,80	584,69
Перфоровані на основі сортамента [7]	0,129	15,5	25,80	514,26
Зварні за сортаментом [5]	0,139	16,7	19,50	428,33
Зварні індивідуального проектування	0,129	15,5	19,50	398,97

Джерело: розроблено авторами з використанням [5, 7]

З таблиці 3 видно, що найкращими за витратами сталі є балка з перфорованою стінкою та зварна балка індивідуального проектування, маса яких складає 15,5 т. Найдешевшим рішенням є зварна балка індивідуального проектування, вартість якої набагато менша від усіх інших варіантів за рахунок малої маси та низької ціни листового прокату. Отже, при заданих значеннях прольоту й навантаження раціональним за витратами сталі та вартості конструктивним рішенням є зварна балка індивідуального проектування. Аналогічним чином можна обирати доцільні типи балок для довільних комбінацій прольоту та діючого корисного навантаження і тим самим підвищувати ефективність використання балкових конструкцій.

Висновки. Здійснене розмежування областей раціонального використання балок різних типів, аналітично описані залежності вагових характеристик від прольоту й навантаження на балки, а також розроблені укрупнені розцінки на виготовлення та монтаж дозволяють обрати раціональне конструктивне рішення прокатної чи зварної балки при відомому прольоті та величині діючого корисного навантаження.

Подальші дослідження орієнтуються на порівняльний аналіз показників металоємності та вартості балок з гнучкою та з гофрованою стінкою, а також ферм різних типів. Нові результати розширять можливості вибору оптимальних конструктивних форм покриттів і перекрить та сприятимуть зростанню економічності сталевих конструкцій, що працюють на згин.

Список літератури

1. Лихтарников Я.М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. Москва: Стройиздат, 1979. 319 с.
2. Металлические конструкции. Учебник для студентов высших учебных заведений / Ю.И. Кудишин и др.; под редакцией Ю.И. Кудишина. 10-е издание. Москва: Издательский центр "Академия", 2007. 688 с.

3. Ірклієнко В.Ю. Вагові показники прокатних балок. *Досвід впровадження в навчальний процес сучасних комп'ютерних технологій:* зб. матеріалів V студ. наук.-прак. семінару. Кропивницький: ЦНТУ, 2018. С. 63-68.
4. Хорольська Н.О. Автоматизація розрахунків і вагові показники зварних двотаврових балок. *Досвід впровадження в навчальний процес сучасних комп'ютерних технологій:* зб. матеріалів V студ. наук.-практ. семінару. Кропивницький: ЦНТУ, 2018. С. 142-148.
5. Віняр П.С. Методика і результати розроблення сортаменту тонкостінних зварних двотаврів. *Наука-виробництву, 2019:* тези доп. студ. та магістр. на LIII наук. конф., квітень 2019 р. Кропивницький: ЦНТУ, 2019. С. 42-46.
6. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Київ: Мінрегіон України, 2014. 199 с.
7. ГОСТ 26020-83. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Сортамент. Москва, 1984. 14 с.

References

1. Likhtarnikov, Ya.M. (1979). *Variantnoe proektirovanie i optimizatsiya stalnyih konstruktsiy [Variant design and optimization of steel structures]*. Moscow: Stroyizdat [in Russian].
2. Kudishin Yu.I., Belenya E. I., Ignateva V.S. (2007). Metallicheskie konstruktsii [Metal constructions]. *Uchebnik dlya studentov vyisshih uchebnyih zavedeniy. – Textbook for university students, Vol. 10*. Moscow: Academia [in Russian].
3. Irkliienko V.Iu. (2018). Vahovi pokaznyky prokatnykh balok [Weight characteristics of rolled beams]. *Dosvid vprovadzhennia v navchalnyi protses suchasnykh kompiuternykh tekhnolohii. Studentskyi naukovo-praktychnyi seminar – Experience of introducing modern computer technologies into the educational process. Student Scientific and Practical Seminar, Vol. 5.* – Kropyvnytskyi: CUNTU, 63-68 [in Ukrainian].
4. Khorolska N.O. (2018). Avtomatyzatsiia rozrakhunkiv i vahovi pokaznyky zvarnykh dvotavrovykh balok [Automation of calculations and weight indexes of welded H-beams]. *Dosvid vprovadzhennia v navchalnyi protses suchasnykh kompiuternykh tekhnolohii. Studentskyi naukovo-praktychnyi seminar – Experience of introducing modern computer technologies into the educational process. Student Scientific and Practical Seminar, Vol. 5.* – Kropyvnytskyi: CUNTU, 142-148 [in Ukrainian].
5. Viniar P.S. (2019). Metodyka i rezultaty rozroblennia sortamentu tonkostinnykh zvarnykh dvotavriv [Methodology and results of the development of the assortment of thin-walled welded H-beams]. *Nauka-vyrobnytstvu, LIII naukova konferentsiia. – Science to production, LIII scientific conference* – Kropyvnytskyi: CUNTU [in Ukrainian].
6. DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia [Steel structures. Design standards]. K.: Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].
7. GOST 26020-83. Dvutavryi stalnyie goryachekatanyie s parallelnyimi granyami polok [Hot-rolled steel I-beam with parallel flange edges]. Moskow: IPK Publishing Standards [in Russian].

Victor Pashinskyi, Prof., DSc., **Ivan Skrynnik,** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Igor Kharchenko,** Assoc. Prof., PhD econ. sci, **Khachaturian Serhii,** Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Weight Characteristics and Areas of Rational Use of Steel Beams in Buildings and Structures of Load-lifting Machines

The purpose of this work is to obtain dependencies for the preliminary determination of specific quantity of metal and loads from their weight of steel beams of different types, as well as outline the area of rational use of beams of the investigated types, taking into account the criteria of specific quantity of metal and their cost.

Experimental design of steel beams of four types is performed: rolled I-beams, perforated steel beams, from the developed assortment of welded H-beams and welded H-beams of individual design. Beam spans varied from 3 m to 36 m, and the design values of the loads were set equal to 5...150 kN/m. The indicated limits are selected taking into account the possible use of beams in load-lifting machines design, roof designs of production and civil buildings, as well as restrictions of assortments of I-beams. For beams of four types the areas of rational use according to criteria of durability and rigidity are defined. By analytical equations detected and described the dependence on the mass of projected beams to span and load. It is shown that for small loads and large spans, the own weight of beams can exceed 20% of the payload. The enlarged prices for manufacturing and installation of steel beams and columns of various types are developed. The presentation of weight characteristics and prices in the form of dependencies of the main constructive factors allows to estimate the

specific quantity of metal and the cost of beams of different types before their designing. The recommendations are given for rational use of beams of different types, taking into account their load-bearing capacity, specific quantity of metal and cost.

As a result of the studies performed, a distinction has been made between the areas of rational use of beams of various types, the dependencies of the weight characteristics on the span and the load on the beams are made, the enlarged prices for fabrication and installation have been described. The obtained results allows to choose a rational constructive solution of rolling or welded beams with a known span and the value of the payload

steel beams, specific quantity of metal, cost, areas of rational use

Одержано (Received) 17.04.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 22.04.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

УДК 624.042.5 DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).235-243

В.О. Семко, проф., д-р техн. наук, **В.А. Пашинський,** проф., д-р техн. наук,
С.О Джирма, доц., канд. техн. наук, **М.В. Пашинський,** канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: pva.kntu@gmail.com

Температурний режим експлуатації будівель на території Кіровоградської області

Реалізована методика площинної апроксимації для визначення розрахункових параметрів температури повітря в заданій географічній точці. Дані довколишніх метеостанцій в радіусі 200…250 км описуються рівнянням площини, побудованим за методом найменших квадратів, з якого визначається величина розрахункового параметра. За даними ДСТУ "Будівельна кліматологія" отримані рівняння, які дозволяють обчислювати 25 розрахункових параметрів температури повітря в довільній точці Кіровоградської області.

температура повітря, розрахункові параметри, площинна апроксимація

В.О. Семко, проф., д-р техн. наук, **В.А. Пашинский,** проф., д-р техн. наук**, С.А. Джирма,** доц., канд. техн. наук, **М.В. Пашинский,** канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украин

Температурный режим эксплуатации зданий на территории Кировоградской области

Реализована методика плоскостной аппроксимации для определения расчетных параметров температуры воздуха в заданной географической точке. Данные близлежащих метеостанций в радиусе 200...250 км описываются уравнением плоскости, построенным по методу наименьших квадратов, из которого определяется величина расчетного параметра. По данным ДСТУ "Строительная климатология" получены уравнения, позволяющие вычислять 25 расчетных параметров температуры воздуха в произвольной точке Кировоградской области.

температура воздуха, расчетные параметры, плоскостная аппроксимация

Постановка проблеми. Температура атмосферного повітря враховується при виконанні теплотехнічних розрахунків огороджувальних конструкцій та проектуванні міської забудови. У ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 "Будівельна кліматологія" [1] наведені середні та розрахункові значення температури повітря, а також тривалості холодного й жаркого періодів для 57 міст України, у тому числі – для трьох міст Кіровоградської

© В.О. Семко, В.А. Пашинський, С.О Джирма, М.В. Пашинський, 2019

області: Гайворон, Знам'янка та Кропивницький. Кліматичні параметри в інших місцевостях слід визначати за даними найближчого з цих міст, але географічна близькість не гарантує близькість кліматичних умов. Тому визначення параметрів температури повітря за даними [1] часто є суб'єктивним рішенням проектувальника.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Опис територіальної мінливості кліматичних навантажень і впливів здійснюється одним із способів територіального районування, огляд яких виконано в роботі [2].

Табличний спосіб, реалізований в ДСТУ [1], передбачає встановлення необхідних розрахункових параметрів у формі таблиці з даними для метеостанцій опорної мережі. На жаль, дані окремих метеостанцій не завжди достовірно відображають кліматичний режим прилеглої території, а геометрична близькість не гарантує достатньої близькості кліматичних умов. Невизначеність вибору найближчої до району будівництва базової метеостанції може призвести до неточного визначення розрахункових параметрів.

Картографічний спосіб, який традиційно використовується в нормах навантажень на будівельні конструкції України [3] та більшості країн світу, зводиться до поділу території країни на декілька районів, для кожного з яких в запас надійності встановлюється певне районне значення кліматичного параметра. Цей спосіб забезпечує простоту й компактність подання результатів на картах, але може призвести до появи надлишкових запасів та невизначеності поблизу межі кліматичних районів.

Адміністративно-територіальне районування [4] зводиться до присвоєння єдиного значення розрахункового параметра усій території адміністративної області. Такий підхід гарантує безпомилкове й однозначне визначення навантажень з досить компактної таблиці за відомим місцем розташування будівельного об’єкта, але при значній мінливості розрахункового параметра може призводити до надмірних запасів.

Розрахунковий спосіб полягає в індивідуальному визначенні розрахункових параметрів навантажень і впливів в заданій географічній (проектній) точці за даними найближчих метеостанцій.

Порівняння відомих розрахункових способів виконане в роботі [5]. Встановлено, що визначення характеристичних значень навантажень за даними однієї метеостанції, розміщеної безпосередньо в проектній точці або поблизу неї дає значні випадкові похибки, обумовлені неточністю вимірювань та особливостями метеостанцій. Метод площинної інтерполяції, запропонований в [6] полягає в тому, що характеристичне значення навантаження в проектній точці визначається з рівняння площини, проведеної через характеристичні значення цього навантаження для трьох сусідніх метеостанцій, які утворюють інтерполяційний трикутник. Аналіз показав, що основним недоліком цього методу є суб'єктивний вибір інтерполяційного трикутника та значний розкид результатів, обчислених для тієї самої проектної точки за різними інтерполяційними трикутниками. Дисперсійний аналіз можна використовувати для прийняття рішення щодо можливості об'єднання статистичних характеристик вибірок річних максимумів навантажень чи їх характеристичних значень, обчислених за даними локальної мережі метеостанцій в околі проектної точки [5]. Для практичного використання в [5] рекомендовані методи, засновані на згладжуванні характеристичних значень навантаження з експоненціальною ваговою функцією, яка зменшує значимість метеостанцій по мірі віддалення від проектної точки.

У статті [7] запропоновано метод площинної апроксимації, при якому замість використання даних трьох суб'єктивно обраних метеостанцій [6] апроксимуюча площина проводиться методом найменших квадратів з урахуванням даних усіх метеостанцій, достатньо близьких до проектної точки. Такий підхід повинен істотно

підвищити достовірність результату за рахунок збільшення обсягу врахованих даних. Разом з тим, залишається невідомою доцільна кількість метеостанцій, які слід врахувати, їх можлива віддаленість від проектної точки, а також інші питання практичної реалізації методу площинної апроксимації [7].

Постановка завдання. Реалізувати методику визначення розрахункових параметрів температури повітря в заданій географічній точці України методом площинної апроксимації, обґрунтувати рекомендації щодо раціонального вибору локальної мережі метеостанцій, розробити спрощену інженерну методику визначення розрахункових параметрів температури повітря для території Кіровоградської області.

Виклад основного матеріалу. Розрахункові параметри температурних впливів атмосферного повітря на огороджувальні конструкції та будівлі в цілому, а також інші кліматичні фактори, необхідні для проектування будівель і міської забудови встановлені в ДСТУ [1]. Для 57 міст України в [1] наведено 25 розрахункових параметрів температури повітря, які перелічені в таблиці 1. Ця інформація використана нижче для реалізації запропонованої в [7] методики визначення параметрів температури повітря в заданій проектній точці.

За [7], тенденція територіальних змін кліматичного параметра Z описується площиною, побудованою методом найменших квадратів за даними метеостанцій, розміщених в околі проектної точки. Рівняння цієї площини можна записати у вигляді

$$Z = A + B \cdot X + C \cdot Y , \tag{1}$$

де X, Y – координати метеостанції чи проектної точки;

A, B, C – параметри, визначені за даними локальної мережі метеостанцій.

Координати метеостанцій та проектної точки X, Y можуть задаватися у вигляді прямокутних координат в кілометрах відносно обраного центра, або значеннями довготи й широти місцевості в градусах, опублікованими в метеорологічних довідниках, визначеними з карт Google Maps чи інших картографічних систем. Параметри A, B, C визначаються методом найменших квадратів за даними усіх метеостанцій з околу проектної точки, включених до локальної мережі.

Такий підхід дозволяє урахувати зміни кліматичних параметрів по території і разом з тим підвищує надійність результатів за рахунок осереднення даних обраної локальної мережі метеостанцій. Додаткова перевага запропонованого методу полягає в тому, що для порівняно невеликої території адміністративної області можна за даними метеостанцій обраного регіону один раз побудувати апроксимуючу площину, а потім користуватися її рівнянням виду (1) для визначення описаного кліматичного параметра в різних проектних точках цієї території.

Для виконання обчислень в середовищі Microsoft Excel розроблений розрахунковий бланк, який містить таблицю даних з ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [1], дозволяє формувати локальну мережу та обчислювати розрахункові параметри температури повітря в заданій проектній точці. Процес формування локальної мережі метеостанцій відображається на схематичній карті, приклад якої наведено на рисунку 1. Робота з бланком здійснюється в такому порядку:

1. Виконується налаштування формул розрахункового бланку на необхідний перелік кліматичних параметрів.

2. У відповідні комірки заносяться географічні координати проектної точки (місця будівництва) в градусах і радіус зони локальної мережі. При цьому в таблиці даних обчислюються відстані від проектної точки до кожної з 57 наявних метеостанцій.

3. При занесенні номерів метеостанцій, які потрібно включити до локальної мережі, в розрахункову частину бланка автоматично копіюються необхідні вихідні дані.

4. З використанням функції Microsoft Excel "Пошук рішення", яка мінімізує суми квадратів відхилень фактичних даних врахованих метеостанцій від апроксимуючої площини (1), обчислюються значення коефіцієнтів *A*, *B*, *C* рівнянь (1) для площин, що апроксимують відповідні кліматичні параметри. Значення розрахункових параметрів у проектній точці обчислюються за формулою (1).

5. Обчислюються відсотки відхилень апроксимуючої площини (1) від фактичних даних, а також мінімальні, максимальні та середні значення цих відхилень, які дозволяють оцінити точність результату. У випадку надмірно великих відхилень даних окремих метеостанцій слід виявити причини таких відмінностей від загальної тенденції територіальних змін дослідженого кліматичного параметра. При необхідності такі метеостанції слід видалити з локальної мережі.

Розроблений розрахунковий бланк можна перелаштувати на визначення інших кліматичних параметрів, зокрема характеристичних значень кліматичних навантажень. Для цього необхідно сформувати нову таблицю даних та відповідним чином змінити посилання у розрахункових формулах.

Остаточний результат визначення параметрів температури повітря в заданій проектній точці залежить від розміру локальної мережі метеостанцій. При малій кількості врахованих метеостанцій апроксимуюча площина розміщується дещо випадково, що погіршує точність результату. Збільшення кількості метеостанцій стабілізує апроксимуючу площину, але при занадто великому радіусі зони локальної мережі реальна тенденція зміни кліматичного параметра по території може істотно відхилятися від площини. Для визначення раціонального розміру локальної мережі метеостанцій виконані розрахунки для шести проектних точок, розміщених приблизно на однакових відстанях 140…170 км з півдня на північ України у містах Сімферополь, Чаплинка, Кривий Ріг, Глобине, Ромни, Новгород-Сіверський. Для кожної з цих точок обчислено по три параметри температури повітря (температури найхолоднішої доби, найтеплішої доби, тривалість опалювального періоду) при п'яти значеннях радіуса зони локальної мережі: 100, 150, 200, 250, 300 км. Значення параметрів температури повітря для проектних точок Сімферополь і Чаплинка обчислені без урахування високогірної метеостанції Ай-Петрі (1180 м над рівнем моря) та метеостанції Ялта, розміщеної на Південному березі Криму з субтропічним кліматом.

Аналіз отриманих результатів показав, що при малих радіусах зони локальної мережі метеостанцій спостерігаються випадкові коливання результатів обчислень. Результати стабілізуються при радіусах зони локальної мережі у 200…250 км. При цьому середні похибки апроксимації площиною (відхилення фактичних значень параметрів температури повітря від апроксимуючих площин) змінюються в межах 2…5%, а найбільші не перевищують 9%. Ці значення можна вважати також імовірними похибками визначення результуючих параметрів температури повітря з використанням методу площинної апроксимації. Проведений аналіз дозволяє рекомендувати використання в розрахунках локальної мережі метеостанцій, яка розміщується довкола проектної точки в зоні з радіусом 200…250 км.

Порівняно невелика територія Кіровоградської області цілком вписується в рекомендовані розміри локальної мережі метеостанцій. Це дозволяє описати зміни кліматичних параметрів рівняннями виду (1), придатними для усієї території області. Для обчислення коефіцієнтів рівнянь (1) обрана проектна точка в районі м. Кропивницький, яке розташоване приблизно в центрі території області. До локальної

мережі включено 14 метеостанцій, розміщених на території Кіровоградської та суміжних областей в радіусі до 210 км. Схема сформованої локальної мережі метеостанцій наведена на рисунку 1.

Результати обчислення коефіцієнтів апроксимуючої формули (1) для усіх 25 розрахункових параметрів температури повітря за даними локальної мережі з рисунка 1 наведені в таблиці 1. Для обчислення необхідного розрахункового параметра температури атмосферного повітря в довільній точці території Кіровоградської області необхідно отримати робочу формулу, підставивши до (1) відповідні значення коефіцієнтів *A*, *B*, *C*. Наприклад, середньорічна температура повітря дорівнює

$$t_p = 40,79 + 0,092 \cdot X - 0,728 \cdot Y, \tag{2}$$

а тривалість опалювального періоду з температурами нижчими за +8°С

$$T_{оп} = -64,03 - 0,621 \cdot X + 5,312 \cdot Y. \tag{3}$$

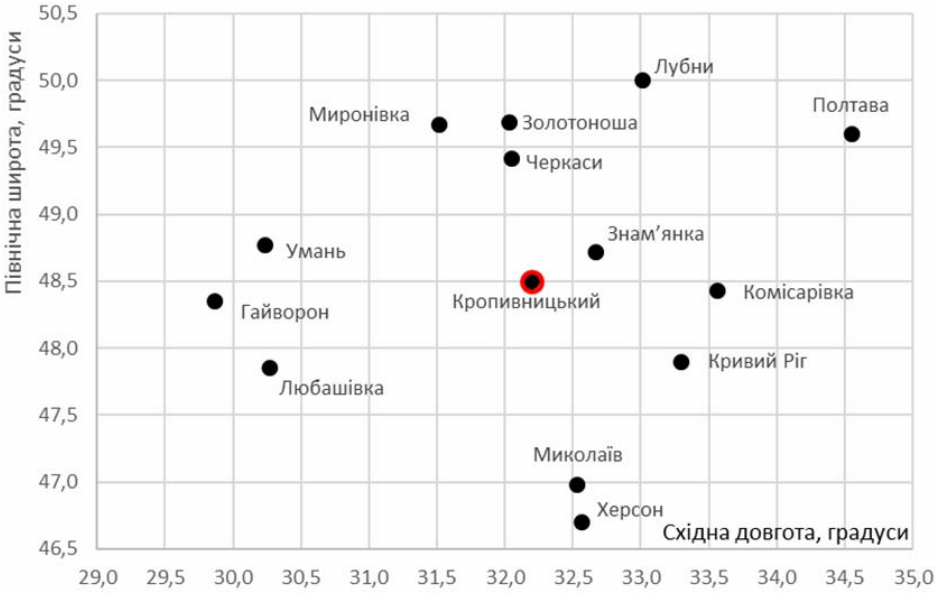


Рисунок 1 – Локальна мережа метеостанцій для визначення параметрів температури повітря на території Кіровоградської області

Джерело: розроблено авторами

Підставивши до отриманих робочих формул географічну довготу *X* та широту *Y* проектної точки у градусах (у вигляді десяткового дробу) та виконавши обчислення, отримуємо необхідні значення розрахункового параметра температури повітря і заданій проектній точці. Географічні координати можна встановити за картами Google Maps або іншим способом (наприклад – за завданням на проектування об'єкта). При цьому слід пам'ятати, що коефіцієнти з таблиці 1 придатні лише для території Кіровоградської області та найближчих до неї місцевостей.

У якості прикладу використання формули (1) з коефіцієнтами з таблиці 1 для території Кіровоградської області визначимо середньорічну температуру повітря й тривалість опалювального періоду у м. Бобринець. Згідно з картою Google Maps, місто Бобринець розташоване на $X = 32,16°$ східної довготи та $Y = 48,06°$ північної широти. Підставивши до (2) та (3) ці координати, отримуємо середньорічну температуру повітря

$$t_p = 40,79 + 0,092 \cdot 32,16 - 0,728 \cdot 48,06 = 8,76°C, \tag{4}$$

і тривалість опалювального періоду

$$T_{оп} = -64,03 - 0,621 \cdot 32,16 + 5,312 \cdot 48,06 = 171,3 \text{ доби} . \quad (5)$$

Найближчим містом, для якого наявні кліматичні дані з температури повітря в ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [1], є м. Кропивницький. У таблиці 2 ДСТУ [1] для м. Кропивницький вказана середньорічна температура повітря 8,1°С і тривалість опалювального періоду з температурою, меншою +8°С, рівна 175 діб. Отримані результати (4) і (5) цілком закономірно відрізняються від даних для м. Кропивницький, розташованого на 50 км північніше: середньорічна температура повітря у Бобринці отримана вищою на 0,7°С, а тривалість опалювального періоду – на 2 доби меншою, ніж у Кропивницькому.

Таблиця 1 – Коефіцієнти робочої формули (1) для визначення розрахункових параметрів температури повітря на території Кіровоградської області

№ п/п	Розрахункові параметри температури повітря	Коефіцієнти формули (1)		
		A	*B*	*C*
1	Середня температура січня	36,26	-0,035	-0,817
2	Середня температура лютого	42,34	-0,091	-0,884
3	Середня температура березня	37,04	-0,038	-0,712
4	Середня температура квітня	28,17	0,070	-0,437
5	Середня температура травня	25,84	0,168	-0,326
6	Середня температура червня	37,50	0,270	-0,564
7	Середня температура липня	47,57	0,357	-0,790
8	Середня температура серпня	51,15	0,333	-0,865
9	Середня температура вересня	51,14	0,207	-0,886
10	Середня температура жовтня	45,41	0,065	-0,804
11	Середня температура листопада	44,33	-0,033	-0,841
12	Середня температура грудня	40,61	-0,053	-0,846
13	Середня температура року	40,79	0,092	-0,728
14	Температура найхолоднішої доби забезпеченістю 0,98	17,05	0,170	-1,045
15	Температура найхолоднішої доби забезпеченістю 0,92	30,03	0,034	-1,159
16	Температура найхолоднішої п'ятиденки забезпечен. 0,98	25,08	0,282	-1,184
17	Температура найхолоднішої п'ятиденки забезпечен. 0,92	35,65	-0,017	-1,150
18	Температура найжаркішої доби забезпеченістю 0,95	47,96	0,312	-0,599
19	Температура найжаркішої п'ятиденки забезпеченістю 0,99	32,46	0,449	-0,463
20	Тривалість періоду з температурою менше +8°С	-64,03	-0,621	5,312
21	Середня температура періоду з температурою менше +8°С	28,41	-0,067	-0,541
22	Тривалість періоду з температурою менше +10°С	-41,54	-0,712	5,262
23	Середня температура періоду з температурою менше 10°С	30,18	-0,049	-0,572
24	Тривалість періоду з температурою понад +21°С	722,3	7,622	-19,24
25	Середня температура періоду з температурою понад +21°С	41,67	0,197	-0,557

Джерело: розроблено авторами

Імовірні похибки визначення середніх значень та розрахункових параметрів температури повітря за формулою (1) з коефіцієнтами з таблиці 1 оцінені за відхиленнями прогнозних значень (1) від фактичних даних трьох метеостанцій, які наведені в ДСТУ [1]: Кропивницький, Гайворон та Знам'янка. Порівняння прогнозних значень 25 параметрів температури з фактичними даними для цих міст показало, що прогнозні середні значення температури повітря відхиляються від фактичних даних не більше, ніж 0,6°С, а відхилення розрахункових значень не перевищують 1,8°С. Такі відхилення не призведуть до істотних похибок при виконанні теплотехнічних розрахунків, а тому їх можна вважати допустимими. Завищення тривалості холодних періодів у межах 3 діб створює запас при виконанні теплотехнічних розрахунків, а заниження тривалості спекотного періоду (параметр 24 з таблиці 1) до 8 діб може обумовити неточне оцінювання енерговитрат на кондиціювання повітря при проектуванні будівель.

Узагальнення результатів проведеного порівняльного аналізу дозволяє стверджувати, що робоча формула (1) з коефіцієнтами з таблиці 1 дає задовільні прогнозні значення розрахункових параметрів температури атмосферного повітря. Більш обережно слід відноситися до результатів визначення тривалості спекотного періоду, які у деяких випадках можуть занижуватися.

Висновки:

1. Для визначення розрахункових параметрів температури атмосферного повітря в заданій географічній (проектній) точці можна використовувати метод площинної апроксимації, суть якого полягає в обчисленні необхідного кліматичного параметра з рівняння площини, побудованої методом найменших квадратів за даними довколишніх метеостанцій.

2. Обчислення за методом площинної апроксимації реалізовані в середовищі Microsoft Excel у вигляді розрахункового бланка, який забезпечує автоматизоване формування локальної мережі метеостанцій в межах заданої відстані від проектної точки та обчислення необхідних кліматичних параметрів за таблицею даних з ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 "Будівельна кліматологія".

3. На прикладі шести проектних точок, рівномірно розміщених з півдня на північ України, встановлено, що при обчисленнях методом площинної апроксимації доцільно використовувати локальну мережу метеостанцій в радіусі 200…250 км довкола проектної точки. Така мережа забезпечує визначення основних розрахункових параметрів температури атмосферного повітря з похибками, що не перевищують 10%.

4. За даними локальної мережі з 14 метеостанцій, розміщених у радіусі до 200 км від географічного центра Кіровоградської області, визначені коефіцієнти апроксимуючих площин, які відображають територіальні зміни 25 розрахункових параметрів температури повітря і дозволяють визначати ці параметри для довільної проектної точки на території Кіровоградської області.

5. Визначені за розрахунковою формулою з отриманими коефіцієнтами середні та розрахункові значення температури повітря для трьох міст Кіровоградської області є досить близькими до наведених в ДСТУ "Будівельна кліматологія". Виявлені завищення тривалості холодних періодів створюють певний запас надійності при проектуванні, а заниження тривалості спекотного періоду в окремих випадках може обумовити неправильне прогнозування витрат на кондиціонування будівель.

Обґрунтована методика може бути використана для відображення територіальних змін інших кліматичних показників, а також характеристичних значень кліматичних навантажень на несучі будівельні конструкції в межах Кіровоградської та інших областей України. Більш точне визначення розрахункових параметрів

кліматичних навантажень і впливів обумовить уточнення розрахунків, а в деяких випадках – зниження матеріалоємності та вартості будівельних конструкцій.

Список літератури

1. ДСТУ-Н Б В.1.1–27:2010 Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. Київ, 2010. 101 с.
2. Пашинський В.А., Пашинський В.В., Пашинський М.В. Способи територіального районування кліматичних навантажень. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури.* 2016. Вип. 64. С. 103-109.
3. ДБН В.1.2-2:2006. Система надійності та безпеки в будівництві. Навантаження і впливи. Київ: Мінбуд України, 2006. 59 с.
4. Филимонихин Г.Б., Пашинский Н.В. Метод административно-территориального районирования климатических нагрузок на строительные конструкции. *Весник БРУ*. 2018. С. 121-128.
5. Пашинський М.В. Територіальне районування кліматичних навантажень і впливів на будівельні конструкції: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.23.01. Одеса, 2018. 24 с.
6. Кліматичне забезпечення будівництва та експлуатації електричних мереж. Типова інструкція. Київ: нормативний документ. Міністерство палива та енергетики України, 2008. 26 с.
7. Пашинський В.А., Карпушин С.О., Пашинський М.В. Методика визначення кліматичних навантажень в заданій географічній точці. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. Вип. 71. С. 68-72.

References

1. DSTU-N B V.1.1–27:2010. Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiinykh vplyviv, vid pozhezhi. Budivelna klimatolohiia [Protection from dangerous geological processes, harmful operational influences, fire. Construction Climatology.]. Kyiv: Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].
2. Pashynskyi V.A., Pashynskyi V.V., Pashynskyi M.V. (2016). *Sposoby terytorialnoho raionuvannia klimatychnykh navantazhen [Methods of territorial zoning of climatic loads]*. Odesa: ODABA [in Ukrainian].
3. DBN V.1.2-2:2006. Systema nadiinosti ta bezpeky v budivnytstvi. Navantazhennia i vplyvy. [System of reliability and safety in construction. Loads and impacts]. Kyiv: Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].
4. Filimonikhin G.B., Pashynskyi M.V. (2018). *Metod admynystratyvno-terrytoryalnoho raionyrovanyia klymatycheskykh nahruzok na stroytelnye konstruktsyy [The method of administrative-territorial zoning of climatic loads on building structures]*. Belarus: BRU [in Ukrainian].
5. Pashynskyi M.V. (2018) Terytorialne raionuvannia klimatychnykh navantazhen i vplyviv na budivelni konstruktsii [Territorial zoning of climatic loads and impacts on building constructions]. *PhD thesis*. Odesa.
6. Klimatychne zabezpechennia budivnytstva ta ekspluatatsii elektrychnykh merezh. Typova instruktsiia [Climate maintenance of construction and operation of electric networks. Typical instruction]. (2008). Kyiv: Ministry of Fuel and Energy of Ukraine [in Ukrainian].
7. Pashynskyi V.A., Karpushyn S.O., Pashynskyi M.V. (2018). *Metodyka vyznachennia klimatychnykh navantazhen v zadanii heohrafichnii tochtsi [Methodology for determination of climatic loads at a given geographical point]*. Odesa: ODABA [in Ukrainian].

Volodymyr Semko, Prof., DSc., **Victor Pashinskyi,** Prof., DSc.,
Stanislav Dzhyrma, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mykola Pashynskyi**, PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Temperature Mode of Operation of Buildings in the Territory of Kirovograd Region

The article implements a method for determining the calculated air temperature parameters in a given geographical point of Ukraine using the planar approximation method, gives recommendations for a rational choice of a local network of weather stations, and also developed a simplified engineering method for determining the design air temperature parameters in the Kirovograd region.

To determine the design parameters of climatic loads at a given design point, a simple and accurate plane interpolation method was chosen. The trends of territorial changes in air temperature parameters in the area of the design point are described by the planar equation constructed by the least squares method according to the data of nearby weather stations. In Microsoft Excel, 25 calculated parameters of air temperature (mean monthly and annual temperatures, temperatures of the coldest and warmest day and five days, mean temperatures

and durations of the cold and hot period) are calculated for an arbitrary design point in Ukraine according to DSTU-N B V.1.1-27: 2010 "Construction climatology" [ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 "Будівельна кліматологія"]. By the example of the six project points it is established that when determining the calculated parameters of the air temperature, the data of the local network of weather stations within the radius of 200 ... 250 km from the design point should be taken into account. According to a local network with 14 meteorological stations located in the territory of Kirovograd and nearby areas, equations were obtained for calculating 25 design air temperature parameters at an arbitrary point in Kirovograd region.

The performed studies have confirmed the possibility of using the plane approximation method to determine the design parameters of the air temperature in a given design point of Ukraine according to DSTU-N B V.1.1-27: 2010 "Construction climatology". The rational size of the local network of weather stations was substantiated and the analytical dependences were obtained for determination of the design air temperature parameters in the territory of the Kirovograd region.

air temperature, design parameters, planar approximation

Одержано (Received) 17.04.2019 *Прорецензовано (Reviewed) 29.04.2019*
Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019

ЗМІСТ

МАШИНІ І ЗАСОБИ МЕХАНІЗАЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ПЕРЕРОБНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Р.В. Кісільов, П.Г. Лузан, І.П. Сисоліна, О.Р. Лузан
Вдосконалення конструкції дозатора кормів грабельного типу 3

І.О. Пісарькова
Травмування зерна пшениці зерноочисною машиною ОВУ-25 та шляхи його зниження 11

О.В. Оришака, В.І. Гуцул, А.М. Артюхов
Теоретичне дослідження руху сипкого матеріалу в постачальному пристрої установок безперервної дії 17

С.Б. Вербицький, О.В. Батраченко, Н.В. Філімонова
Удосконалення математичної моделі подрібнення м’ясної сировини на роторному емульситаторі 25

ЗАСОБИ ТРАНСПОРТУ. ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС. ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЛОГІСТИКА

В.В. Аулін, Д.В. Голуб, Д.О. Великодній, В.О. Дьяченко
Розв’язання проблеми надійності технологічних процесів вантажних перевезень підприємствами агропромислового виробництва 36

О.В. Бевз, Ш.Р. Алієв, Г.Н. Алієва
Результати тестування гальмівного механізму автомобіля Ford Focus III 46

О.І. Субочев, Т.А. Завалій, М.Г. Погорєлов
Удосконалення забезпечення запасними частинами сервісних підприємств 58

О.В. Бевз, С.О. Магопець, О.О. Матвієнко
Дослідження характеристик гальмівного механізму автомобіля Hyundai Accent 68

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО, ТЕРМІЧНА ТА ФІЗИКО-ТЕХНІЧНА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ

В.М. Кропівний, М.В. Босий, О.В. Кузик, А.В. Кропівна
Термодинамічні процеси при кристалізації і формуванні ліквації у виливках з високоміцного чавуну 79

Г.В.Чумало, М.М. Студент, Б.М. Дацко, В.М. Гвоздецький, С.І. Маркович
Дослідження ефективності антикорозійних покриттів конструктивних елементів на основі цинку та алюмінію в хлоридно-сульфідних середовищах 86

В.М. Кропівний, Л.А. Молокост, О.В. Кузик, А.В. Кропівна
Порівняльна промислова оцінка графітових родовищ та руд України, характеристика збагачення руд..... 93

ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ В МАШИНАХ

В.В. Аулін, С.В. Лисенко, А.В. Гриньків, В.В. Яцун, І.О. Скриннік, А.Б. Гупка
Напружено-деформований стан поверхневого шару деталей при реалізації триботехнологій припрацювання і відновлення 103

М.С. Агєєв, С.А. Довжук, В.Я. Николайчук, Т.Е. Хрипко
Вплив конструктивних параметрів обладнання для електродугового напилення на фактори процесу напилення та властивості покриттів..... 114

ПРОЦЕСИ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ, ВЕРСТАТИ ТА ІНСТРУМЕНТИ

В.В. Свяцький, О.В. Скрипник, О.Ф. Сіса, С.В. Конончук
Комбіновані методи обробки глибоких отворів 123

ДВИГУНИ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ

С.В. Конончук, О.В. Скрипник, В.В. Свяцький
Принципи побудови математичної моделі газогенераторного процессу..... 131

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМЛЕКСИ

А. А. Азарян, А. А. Трачук, А. Н. Гриценко, Д. В. Швец
Разработка измерительного канала для оперативного контроля содержания железа магнитного во взрывных скважинах 138

ІННОВАЦІЙНІ ТА ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

В.І. Носуленко, В.М. Шмельов, А.А. Пащенко
Розмірна обробка електричною дугою як наступний етап розвитку електророзрядної обробки..... 146

В. М. Боков
Розмірна обробка тіл обертання електричною дугою з використанням дротового електрода-інструмента..... 154

П.Г. Плєшков, С.В. Серебренніков, К.Г. Петрова, І.В. Савеленко, О.І. Сіріков
Проблеми визначення ефективності та ранжування енергоощадних заходів на об'єктах бюджетної сфери 166

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Г.М. Дрєєва, О.А. Смірнов, О.М. Дрєєв
Метод генерування фрактальноподібної числової послідовності на основі скінченного автомату для моделювання трафіку у мережі..... 173

Т.В. Смірнова, Є.К. Солових, О.А. Смірнов, О.М. Дрєєв
Побудова хмарних інформаційних технологій оптимізації технологічного процесу відновлення та зміцнення поверхонь деталей 184

Д.В. Трушаков, Т.О. Глущенко, В.В. Нужний
До обґрунтування принципу побудови локальних комп'ютерних мереж..... 194

РОБОТОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ

І. І. Павленко, М.О. Годунко
Розрахунок не зрівноважено утримуваних деталей захватними пристроями роботів 202

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ У ПРОМИСЛОВОСТІ ТА СІЛЬСКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

В.А. Зозуля, С.І. Осадчий, М.М. Мельніченко
Аналіз характеристики точності відтворення еталонної траєкторії платформою Гауфа-Стюарта з системою управління для різних видів завдань 211

О. П. Голик, Р. В. Жесан, Ісмаіл Мухаммед
Обґрунтування автоматизації комп'ютерно-інтегрованої технології ідентифікації та моніторингу нафтових забруднень..... 220

БУДІВНИЦТВО

В.А. Пашинський, І.О. Скриннік, І.В. Харченко, С.Л. Хачатурян
Вагові характеристики та області раціонального використання сталевих балок у будівлях та конструкціях вантажопідйомних машин..... 228

В.О. Семко, В.А. Пашинський, С.О. Джирма, М.В. Пашинський
Температурний режим експлуатації будівель на території Кіровоградської області 235

CONTENT

MACHINERY AND MEANS OF AGRICULTURAL MANUFACTURING AND MANUFACTURING

Ruslan Kisilyov, Petro Luzan, Iryna Sysolina, Olena Luzan
Improvement of the Rake-type Feed Metering Unit 3

Iryna Pysarkova
Injury of Wheat Grain by Grain Cleaning Machines and Ways to Reduce it 11

Oleh Oryshaka, Vasily Gutsul, Anatoly Artiuhov
Theoretical Investigation of the Movement of Free-flowing Material in the Supply Device of Continuous Operation 17

Sergii Verbytskyi, Olexandr Batrachenko, Nadiya Filimonova
Upgrading the Mathematical Model of Raw Meat Comminuting Process in Flow Cutter 25

MEANS OF TRANSPORT. TECHNICAL SERVICE. TRANSPORT TECHNOLOGIES AND LOGISTICS

Viktor Aulin, Dmytro Holub, Denys Velykodniy, Viktoria Dyachenko
The Solution of the Problem of Reliability of Technological Processes of Cargo Transportation by Enterprises of Agroindustrial Production 36

Oleg Bevz, Shakir Aliyev, Gulnara Aliyev
The Study of the Reliability of the Brake Mechanism of the Car Ford Focus III 46

Olexandr Subochev, Mykhailo Pogorelov, Tymur Zavaliy
Improving the Supply of Spare Parts Service Companies 58

Oleg Bevz, Sergii Magopets, Oleksandr Matviienko
The Study of the Reliability of the Brake Mechanism of the Car Hyundai Accent 68

MATERIAL SCIENCE, THERMAL AND PHYSICAL AND TECHNICAL PROCESSING OF MATERIALS

Volodymyr Kropivnyy, Mykola Bosii, Olexandr Kuzyk, Olena Kropivnaya,
Thermodynamic Processes During Crystallization and Formation of Segregation in High-strength Cast Iron Castings 79

Halyna Chumalo, Bohdan Datsko, Mykhajlo Student, Volodymyr Hvozdetskii, Sergiy Marcovych
Investigation of the Effectiveness of Coatings on the Basis of Zinc and Aluminum in Chloride-sulfide Media 86

Volodymyr Kropivnyy, Ludmila Molokost, Olexandr Kuzyk, Alena Kropivnaya
Comparative Industrial Assessment of Graphite Deposits and Ores of Ukraine, Characteristics of Ore Concentration 93

RUBBER AND WARNING IN MACHINES

Viktor Aulin, Serhiy Lysenko, Andriy Grinkiv, Volodymyr Yatsun, ., Ivan Skrynnik, Andriy Gupka
Stress-strain State of the Surface Layer of Parts During the Implementation of Tribotechnical Running-in and Recovery Technologies 103

Maxym Ageev, Sergiy Dovzhuk, Volodymyr Nikolaychuk, Tetiana Khrypko
The Influence of Design Parameters for Electric arc Equipment on the Factors of Spray Process and Properties of Coatings 114

MECHANICAL PROCESSING PROCESSES, MACHINES AND TOOLS

Volodymyr Sviatskyi, Oleksandr Skrypnyk, Oleh Sisa, Serhii Kononchuk
Combined Deep Hole Processing Methods..... 123

ENGINES AND POWER PLANTS

Serhii Kononchuk, Oleksandr Skrypnyk, Volodymyr Sviatskyi
Principles of Construction of a Mathematical Model of the Gas Generator Process..... 131

ELECTRICAL COMPLEXES

Albert Azaryan, Annait Trachuk, Andrey Gritsenko, Dmitriy Shvets
Development of Measurement Channel for Operational Control of the Content of the Magnetic Iron in the Blast Holes 138

INNOVATIVE AND ENERGY SAVING TECHNOLOGIES

Victor Nosulenko, Vitaliy Shmelyov, Andrey Paschenko
Dimensional Electric Arc Processing as the Next Stage of Development of Electric Discharge Processing..... 146

Victor Bokov
Dimensional Treatment of Rotation Bodies With Electric Arc Using a Wire Electrode Tool 154

Petro Pleshkov,Sergiy Serebrennikov, Kateryna Petrova, Ivan Savelenko, Oleksandr Sirikov
Problems of Determining the Efficiency and Ranking of Energy-saving Measures at the Objects of the Budget Sphere 166

INFORMATION TECHNOLOGY

Hanna Drieieva, Oleksii Smirnov, Oleksandr Drieiev
The Method of Generating a Fractally Similar Numerical Sequence Based on a Finite Automaton for Modeling Traffic in a Network 173

Tetiana Smirnova, Yevhenii Solovykh, Oleksii Smirnov, Oleksandr Drieiev
Construction of Cloud information Technologies for Optimization of Technological Process of Restoration and Strengthening of Surfaces of Parts 184

Dmitro Trushakov, Taras Glushenko, Nuzhny Vitaliy
To substantiate the principle of building local computer networks 194

ROBOTICAL COMPLEXES

Ivan Pavlenko, Maxym Hodunko
Calculation of Unbalanced Parts Grippers by Robots..... 202

AUTOMATION OF INDUSTRIAL PROCESSES AND AGRICULTURE

Valerii Zozulia, Sergiy Osadchy, Mykola Melnichenko
Analysis of the Accuracy of the Reproduction of the Reference Trajectory by the Gough-Stewart Platform with the Control System for Various types of Tasks 211

Olena Holyk, Roman Zhesan, Mohammad Ismail
Rationale for the Development of Automated Computer-integrated Technology for the Identification and Monitoring of Oil Pollution 220

CONSTRUCTION

Victor Pashinskyi, Ivan Skrynnik, Igor Kharchenko, Khachaturian Serhii
Weight Characteristics and Areas of Rational Use of Steel Beams in Buildings and Structures of Load-lifting Machines..... 228

Volodymyr Semko, Victor Pashinskyi, Stanislav Dzhyrma, Mykola Pashynskyi
Temperature Mode of Operation of Buildings in the Territory of Kirovograd Region 235

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.
ТЕХНІЧНІ НАУКИ

Збірник наукових праць

В и п у с к 1(32)

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 04.06.2019р. Формат 60х84/8. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Офсетний друк. Умов. друк. арк. 31,25
Тираж 300 прим. Зам. № 0302