

Видається з 1996 року
Засновник і видавець
Сумський національний
аграрний університет

Реєстраційне свідоцтво
КВ № 23691-13531 Р від 21.11.2018 р.

Редакційна колегія серії

| | |
|---|--|
| Тарельник В.Б. , доктор технічних наук, професор, редактор, Сумський національний аграрний університет (Україна) | СЕРІЯ «Механізація та автоматизація виробничих процесів» ВИПУСК 2 (44), 2021 |
| Соларьов О.О. , кандидат технічних наук, доцент, заступник редактора, Сумський національний аграрний університет (Україна) | Донець С.Є., Литвиненко В.В., Прохоренко Є.М. Термографічний метод діагностики та оцінки ефективності роботи установок для променевого знезараження води 3 |
| Антошевський Б. , доктор технічних наук, професор, Келецький технічний університет (Польща) | Зубко В.М., Жигилій Д.О., Соколік С.П., Руденко В.А. Моделювання кочення жорсткого циліндра по поверхні ґрунту 8 |
| Кундера Чеслав , доктор технічних наук, професор, Келецький технічний університет (Польща) | Барабаш Г.І., Мікуліна М.О., Поливаний А.Д. Методичні та економічні підходи відносно визначення витрат палива транспортних засобів при перевезенні зерна від зернозбиральних комбайнів 13 |
| Кирик Г.В. , доктор технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет (Україна) | Коноплянченко Є.В. Високопродуктивний метод цементації сталевих деталей методом електроіскрового легування 17 |
| Лобода В.Б. , кандидат фізико-математичних наук, професор, заступник редактора, Сумський національний аграрний університет (Україна) | Саржанов О.А., Барабаш Г.І., Саржанов Б.О. Обґрунтування вибору посівних комплексів вітчизняного виробництва методом математичного моделювання (за інженерно-технічними критеріями) 21 |
| Коноплянченко Є.В. , кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет (Україна) | Горовий С.О., Головченко Г.С. Фізичні процеси, що визначають коефіцієнт корисної дії турбонасосного агрегата пластової рідини 26 |
| Довжик М.Я. , кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет (Україна) | Хурсенко С.М. Фізика в техніці: використання сил 30 |
| Хінек Рубік , кандидат технічних наук, Чеський університет наук про життя (Чехія) | Радіонов О.В., Тарельник Н.В., Думанчук М. Вплив організації технічного сервісу на екологічну безпеку системи «Людина-Машина-Довкілля» 35 |
| Девід Херак , кандидат технічних наук, Чеський університет наук про життя (Чехія) | Сировицький К.Г., Шуляк М.Л., Мельник В.І. Результати досліджень технічного стану гідравлічних розпилювачів для захисту рослин 41 |
| Сабадаш С.М. , кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет (Україна) | ZHANG Zhengchuan, LIU Guanjun, Konoplianchenko Ie.V., Tarelnyk V.B., Ge Zhiqin, DU Xin A Review of the Electro-spark Deposition Technology 45 |
| Думанчук М.Ю. , технічний редактор, Сумський національний аграрний університет (Україна) | Шелест М.С., Дацько О.М., Захарченко Е.А. Конструкція кліматичної камери з освітленням, адаптованим для вирощування сільськогосподарських культур 54 |
| | Барабаш Г.І., Мікуліна М.О., Поливаний А.Д. Порівняльна оцінка роботи транспортних засобів при збиранні пшениці по критерію витрат палива 59 |
| | Саржанов О.А., Барабаш Г.І., Саржанов Б.О. Обґрунтування вибору посівних комплексів вітчизняного виробництва методом математичного моделювання (за техніко-економічними критеріями) 63 |

| | |
|---|---|
| <p>Науковий журнал «Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «МЕХАНІЗАЦІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ» визнано фаховим виданням Категорії «Б» в галузі технічних наук 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія» (наказ МОН України від 24.09.2020 р. № 1188)</p> | <p>Ребрій А.М., Рибенко І.О., Павлов О.Г. Застосування систем автоматизованого проектування для підготовки фахівців галузевого машинобудування..... 67</p> |
| | <p>Роп'як Л.Я., Николайчук М.Я., Шовкопляс М.В., Витвицький В.С., Романів М.М. Автоматизована установка для очищення гальванічних відходів 70</p> |
| | <p>Любченко І.С., Роговський І.Л. Аналітичні положення впливу ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів 81</p> |

Науковий журнал «Вісник Сумського національного аграрного університету» індексується в Міжнародних наукометричних базах Index Copernicus, РИНЦ

Матеріали журналу знаходяться у вільному доступі на сайті <https://snau.edu.ua>

Усі статті проходять процедуру таємного рецензування. До публікації в журналі не допускаються матеріали, якщо є достатньо підстав вважати, що вони є плагіатом.

Відповідальність за точність наведених даних і цитат покладається на авторів. Матеріали друкуються українською та англійською мовами.

У разі цитування посилання на «Вісник Сумського національного аграрного університету» обов'язкове

Друкується згідно з рішенням вченої ради Сумського національного аграрного університету (Протокол № 13 від 28.06.2021 р.).

Адреса видавця та виготовлювача:
40021, м. Суми,
вул. Г. Кондратьєва, 160
Телефон: (0542)70-10-42
E-mail: visnyk.snau@gmail.com
<https://snau.edu.ua>

Тираж 300 пр.
Зам. №15

© Сумський національний аграрний університет, 2020

ЕЛЕКТРОННО-ПУЧКОВИЙ МЕТОД ФОРМУВАННЯ З'ЄДНАННЯ АЛЮМІНІЙ-МІДЬ

Донець Станіслав Євгенович,кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України
ORCID: 0000-0002-1258-1434,
e-mail: s.j.donets@gmail.com**Литвиненко Володимир Вікторович,**доктор технічних наук, старший науковий співробітник, директор,
Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України
ORCID: 0000-0003-4850-2555,
e-mail: vvlytyvnenko@ukr.net**Лонін Юрій Федорович,**доктор технічних наук, старший науковий співробітник, начальник відділу,
ORCID: 0000-0003-2601-5035
e-mail: lonin@kipt.kharkov.ua**Пономарьов Анатолій Григорович,**кандидат фізико-математичних наук, начальник лабораторії,
ORCID: 0000-0001-6914-6057,
e-mail: anapon@kipt.kharkov.ua

Запропоновано спосіб одержання з'єднання алюміній мідь, який полягає у одночасному опроміненні пластин алюмінію та міді імпульсом високопотужного електронного пучка. В результаті розпорошений пучком матеріал алюмінію осаджується на поверхню мідної підкладки, яка також активується електронним пучком. Покриття має ділянки більшого та меншого проникнення алюмінію в мідь. Зроблена чисельна оцінка розподілу температури та поля зміщень матеріалу мідної підкладки. Проведені металографічні дослідження, енергодисперсійний аналіз та фрактографічні дослідження. Зроблено висновок про доцільність розвинення такого підходу для практичних застосувань.

Ключові слова: алюміній, мідь, композит, електронний пучок, електронна мікроскопія.DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.1>**Вступ**

Проблема одержання з'єднань алюміній – мідь для електротехнічної галузі є достатньо актуальною, що зумовлює пошук шляхів синтезу відповідних конекторів, які були б найменш вразливими до процесів окислення. На теперішній час один з перспективних напрямів розвитку матеріалознавства полягає в одержанні сполучень різних металів, які в рівноважних умовах не піддаються з'єднанню або не є взаєморозчинними в твердому стані. Технологічна перспективність такого підходу полягає в досягненні комплексу потрібних експлуатаційних характеристик, завдяки наявності певних властивостей у кожного окремого металу. До таких сполучень належить система алюміній-мідь, оскільки обидва ці метали є хорошими електричними провідниками, але в певних умовах експлуатації було доречним поєднання їх характеристик. Так, наприклад, мідь є кращим провідником та більш стійким до дії вологості, але алюміній має більш високе значення міцності, що важливо, наприклад, в атенюаторах, де поверхня піддається ударним навантаженням внаслідок високої швидкості спрацьовування. Слід зазначити, що різноманітні варіанти роз'ємних з'єднань міді з алюмінієм мають той недолік, що поверхня алюмінію з часом окислюється і таким чином погіршується контакт.

Аналіз публікацій

Набувають розвитку підходи щодо одержання сполучення мідь – алюміній в твердотільному стані [1], формування

з'єднань засобами лазерного зварювання [2] зварювання шляхом тертя [3] та інші. В роботі [4] здійснювалось зварювання низькоенергетичним електронним пучком, та проводився аналіз будови інтерфейсного шару. Разом з тим подальші технологічні перспективи полягають у залученні інструментів переведення матеріалів, що сполучаються, в різконерівнований стан та активації її електронної підсистеми. До таких інструментів належать сильноточкові пучки електронів, і їх технологічні застосування останнім часом набувають поширення [5,6]. Так відомими є результати роботи [7], що полягають у збільшенні значень мікротвердості сплавів внаслідок опромінення сильноточковим пучком електронів а також надано результати нанесення захисних шарів алюмінію. Особливість такої технології нанесення полягає в тому, що під дією пучка відбуваються розплавлення матеріалу фольги, який наноситься та матеріалу підкладки, при цьому інтерфейсний шар утворюється переважно за рахунок гідродинамічного перемішування матеріалів, що забезпечує хорошу адгезію. До переваг подібного способу нанесення покриттів належить також можливість одержання досить великих товщин покриттів та одержання градієнтного інтерфейсного шару, який утворюється за рахунок вищезгаданого процесу перемішування. Таким чином, цю технологію доречно апробувати для одержання композиту алюміній – мідь.

Методика проведення експерименту

Досліджуючи можливості створення нових технологій

на основі сильно струмових релятивістських електронних пучків слід розуміти, що наявні установки не є поширеними і можливості експериментаторів мають вкладатися в технічні можливості прискорювача. Нами застосовувався прискорювач ТЕМП-А ННЦ Харківський фізико-технічний інститут НАН України, його параметри наступні: енергія електронів 350 кеВ, струм пучка 2 кА, тривалість фронту імпульсу 5 мкс.

Можливість зміни діаметру пучка є більш гнучкою: від 20 до 70 мм, форма пучка може бути як суцільною так і трубчастою в залежності від геометрії катоду. Разом з тим для описаних вище ефектів нанесення покриттів з застосуванням електронного пучка була властива схема, коли пучок спочатку приходив на матеріал фольги, втрачав частину енергії а потім потрапляв на матеріал підкладки. В роботах [6,8] описана методика нанесення покриттів з застосуванням імпульсних електронних пучків. Здійснювати одночасне опромінення обох матеріалів шляхом сканування не видається можливим з огляду на невелику тривалість імпульсу. Синхронне опромінення двома імпульсами також є задачею, яку важко реалізувати. Тому було запропоновано підхід, який полягав в розподілі поля електронного пучка протягом дії одного імпульсу на алюміній та мідь рис. 1.

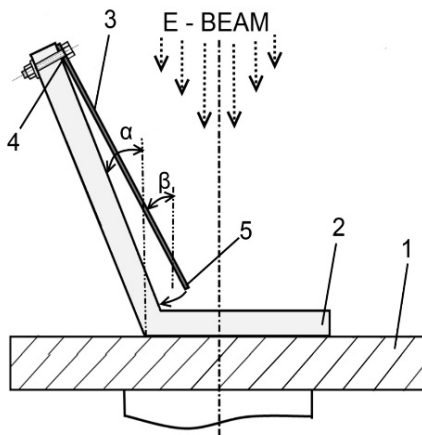


Рис.1. Схематичне зображення опромінюваної мішені: 1 – колектор, 2 – Al-пластина, 3 – Cu-зразок, 4 – пружне кріплення Cu-зразка до алюмінієвої пластини, 5 – вільний кінець Cu – зразка [6,8]

Зазвичай технологія нанесення покриття містить декілька основних складових: спосіб підготовки підкладки, на яку наноситься матеріал; спосіб активації (вилучення) та транспорту матеріалу, який наноситься; контроль та керування потоком матеріалу, активація матеріалу підкладки. Запропонований нами спосіб виконує всі попередньо означені задачі протягом дії одного імпульсу. Розподіл поля електронного пучка може регулюватися лише шляхом зміни кутів α та β на рис. 1. Слід враховувати, що при проходженні сильно струмового пучка під певним кутом до поверхні електропровідної пластини відбувається електродинамічна взаємодія зі струмом, що індукується в пластині. Особливістю взаємодії електронного пучка з поверхнею на відміну, наприклад, від лазерного випромінювання, є те, що область максимального поглинання енергії припадає на підповерхневі шари і плавлення матеріалу починається вглибині мішені. Внаслідок цього формується газоплазмовий факел [9, 10], який міс-

ить як крапельну фазу речовини, так і паро-плазмову. Відповідно в подальшому відбувається конденсація продуктів абляційного викиду як на власну поверхню – зворотня конденсація, так на суміжно розташовану поверхню. На формування взаємного сполучення двох матеріалів впливають наступні чинники: температура, до якої нагріваються матеріали внаслідок дії пучка, наявність механічних напружень внаслідок виникнення температурних градієнтів, розподіл матеріалу в полі газоплазмового факелу. Даний ефект широко застосовується для одержання покриттів також при взаємодії іонних пучків з поверхнею металів [11] та продуктів електроерозійного видалення [12].

Для оцінки індукованого температурного поля і поля механічних напружень в об'ємі твердого тіла зумовленого абляцією під дією сильно струмового релятивістського електронного пучка (СРЕП), було розв'язано термо-механічну задачу у рамках термоеластичності для однорідного тіла, що було верифіковано використовуючи експериментальні дані [13-15]. По-перше, було знехтувано можливими флуктуаціями струму пучка вздовж його перерізу. Для спрощення розрахунків, розглядаємо задачу у двовимірній координатній площині зразка $\{x, y\}$, де вісь x означає глибину зразка і вісь y означає ширину, чи вироджений просторовий розподіл електронного пучка по поверхні опромінення. Модельний зразок є однорідною пластиною $\{0..H_x \times 0..H_y\}$ в $\Omega \in R^2$, де ширина зразка є більшою за його товщину $H_y > H_x$. Пластина опромінюється електронним пучком перпендикулярно до його поверхні Γ_1 .

Класичне рівняння Фур'є поширення тепла в твердому тілі має нефізичну властивість поширення теплових хвиль в середовищі з довільною швидкістю. Таким чином, з огляду на високі швидкості нагрівання а також значення тиску, вважається необхідним введення в розгляд релаксаційного теплового рівняння значення часу τ_r , зумовленого скінченністю швидкості поширення температурного поля в металі (1):

$$\bar{q}(\bar{r}, t + \tau_r) = -k \nabla T(\bar{r}, t + \tau_r), \quad (1)$$

де k є коефіцієнтом теплопровідності. Тривалість імпульсу опромінення є значно більшою за час електрон-фононої релаксації $\tau_p \gg \tau_r$ ($\tau_r \leq 10^{-12}$ s). Також прийнято в моделі, що встановлена рівновага між електронною і йонною підсистемами. Далі, застосовано закон Максвела-Катанео (2), як варіація класичного рівняння Фур'є при $\tau_r > 0$:

$$\bar{q}(\bar{r}, t + \tau_r) = -k \nabla T(\bar{r}, t) - \tau_r \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} - k \tau_r \nabla_r \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2)$$

Для закону збереження (3), вводимо функцію потужності теплового джерела Q . Рівняння для температурного поля визначається гіперболічним диференціальним (4):

$$\frac{\partial T(\bar{r}, t)}{\partial t} = -\frac{\nabla \cdot \bar{q}}{\rho c} + \frac{Q}{\rho c}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \tau_r \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho c} \left\{ \nabla \cdot (k \nabla T) + \tau_r \nabla \cdot (k \nabla \frac{\partial T}{\partial t}) + Q + \tau_r \frac{\partial Q}{\partial t} \right\}, \quad (4)$$

де c - теплоємність, ρ – густина [13,14,15].

Розподіл частинок матеріалу алюмінію в полі газоплазмового факелу має цілком наочне візуальне відображення на

мідній підкладці рис. 3.

Зображення растрового електронного мікроскопа з різних ділянок поверхні наведені на рис. 4 Так периферійна частина покрита краплями алюмінію рис.4 а, тоді як розташована ближче до вісі газоплазмового факелу має характерний бронзо-

вий блиск рис.4 б, що свідчить про перемішування матеріалів. Область мідної підкладки, що розташована найближче до алюмінію, має ознаки наплавлення алюмінію рис.4 в. Свідченням більш глибокого проникнення алюмінію на різних ділянках є результати енергодисперсійного аналізу – рис.5.

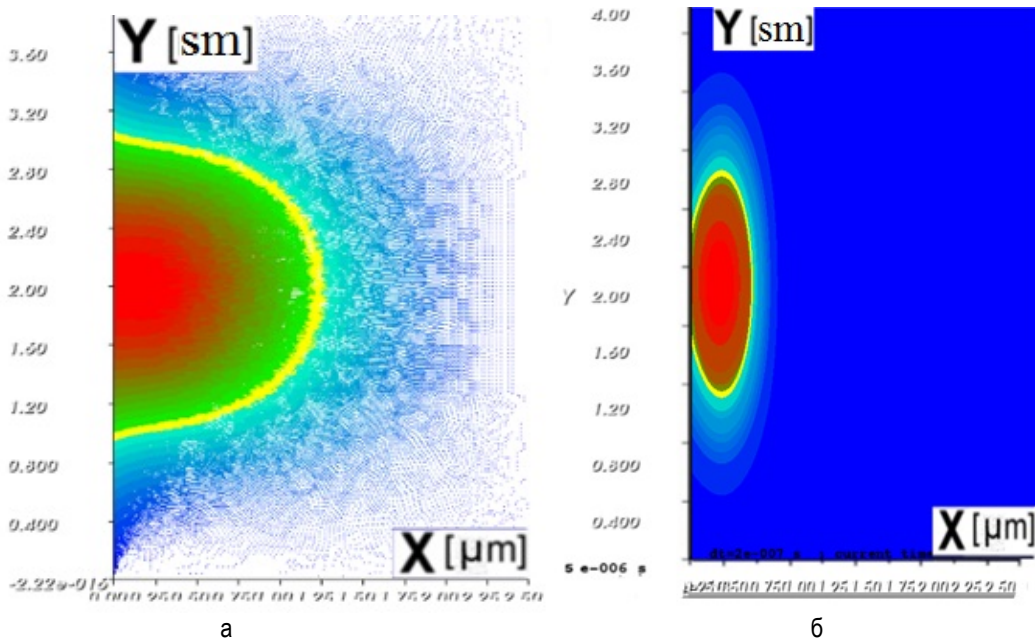


Рис.2. Просторовий розподіл у мідній пластині: а) поля зсувів; б) поля температур

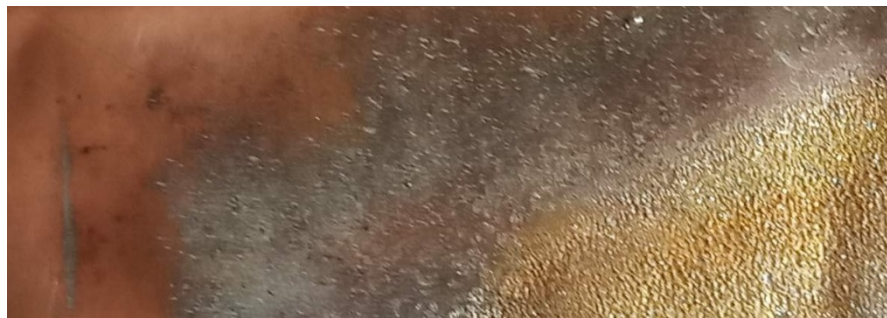


Рис. 3. Мідна пластина після конденсації абляційного потоку алюмінію

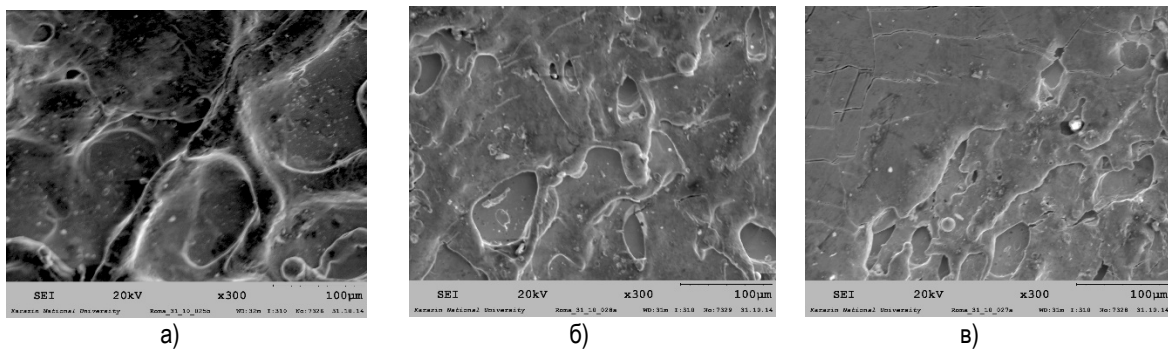


Рис.4. РЕМ зображення ділянок поверхні пластини.

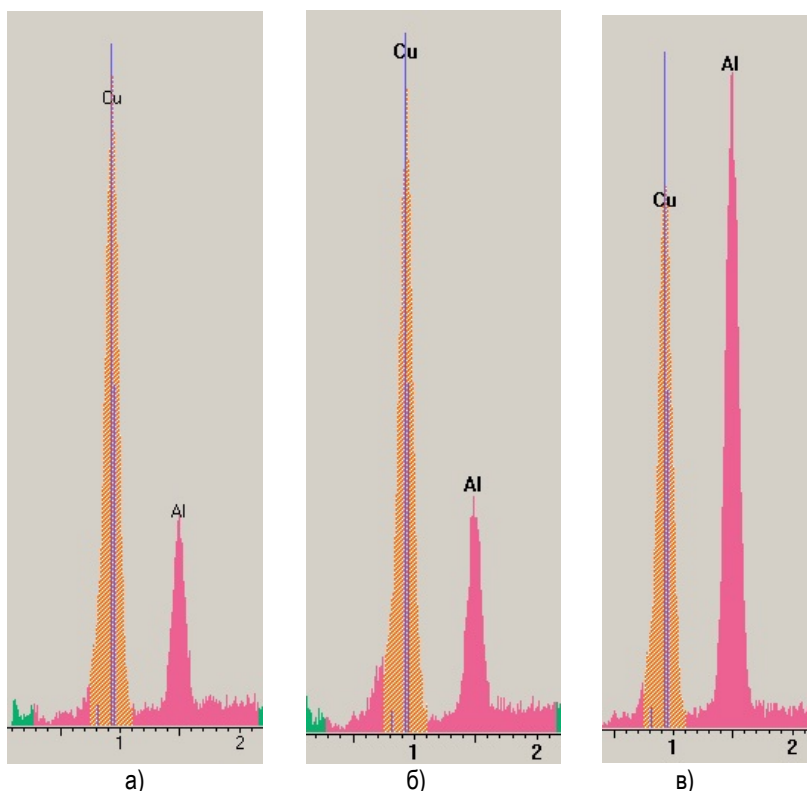


Рис.5. Результати енергодисперсійного аналізу різних ділянок (позначення а, б, в. відповідають ділянкам на рис.4)

Разом з тим, подібна нерівномірність покриття дає можливість зрозуміти, на яких ділянках сполука мідь-алюміній є більш суцільною. З огляду на вказану нерівномірність масопереносу алюмінію ми провели аналіз мікроструктури одержаного композиту. Як видно з рис. 6. сполучення є достатньо суцільним, при цьому на окремих ділянках спостерігається

взаємопроникнення рельєфів на інтерфейсній області, що особливо важливо, наприклад, для ударних навантажень.

Одержаний композит було апробовано на стійкість до деформації гину. З фрактограм рис. 7 видно, що відшарування проходить з руйнуванням інтерфейсного шару по тілу підкладинки, як менш міцного матеріалу.

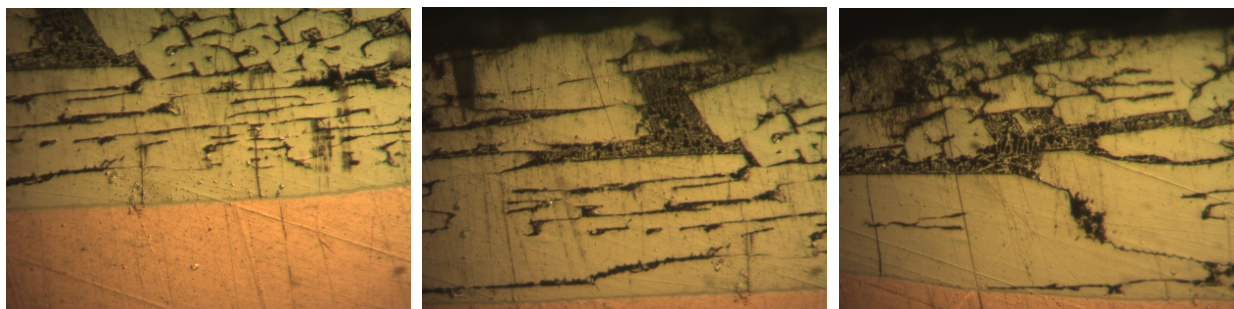


Рис. 6. Металографія ділянок шліфу інтерфейсу алюміній-мідь

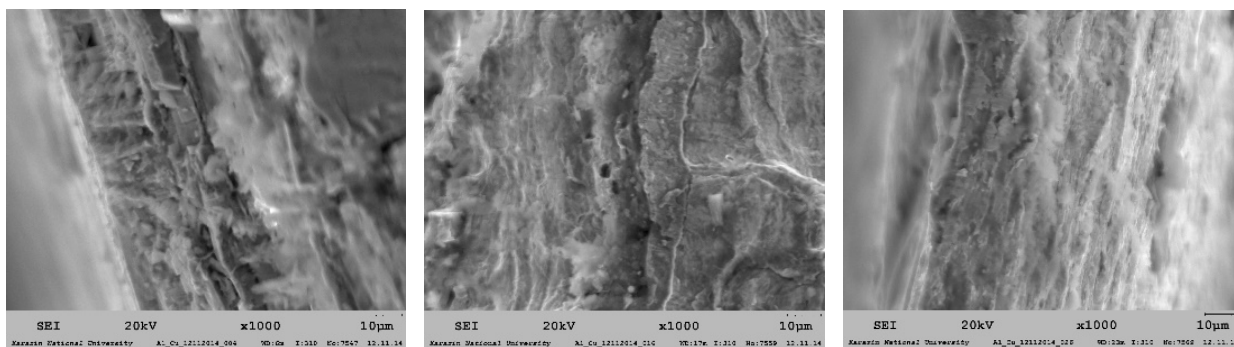


Рис. 7. Фрактограми зламу композиту алюміній-мідь.

Висновки

Сильнострумові релятивістські електронні пучки є перспективним інструментом для створення новітніх технологій одержання композитних матеріалів, шляхом з'єднання тих

металів, які в термодинамічно рівноважних умовах не змішуються. На прикладі пари алюміній мідь показано, що шляхом імпульсної електронно-пучкової обробки можна досягти суцільного сполучення цих матеріалів, яке екранує доступ волони, та запобігає коронуванню.

Список використаної літератури.

1. Bergmann, Jean & Petzoldt, Franziska & Schürer, René & Schneider, Stefan. (2013). Solid-state welding of aluminum to copper - Case studies. *Welding in the World*. 57. 10.1007/s40194-013-0049-z.
2. R.S. Chopde, S.P. Gadewar, M.P. Khond, M.J. Rathod / Study on Laser beam Welding of Copper and Aluminum joint // *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* e-ISSN: 2278-1684,p-ISSN: 2320-334X PP. 65-74 6th National Conference RDME 2017, 17th- 18th March 2017.
3. D.S. Chaudhari Joining of aluminum to copper by friction stir welding // *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE)* ISSN: 2349-2163 Volume 1 Issue 8 (September 2014).- p.18-21
4. C. Otten, U. Reisgen, M. Schmachtenberg Electron beam welding of aluminum to copper: mechanical properties and their relation to microstructure *Welding in the World* .-2016, Volume 60, Iss. 1, pp 21–31
5. A.G. Kobets et al. Melting effects of high-current relativistic electron beam on aluminum alloy 1933 // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2015, v. 51, N 5, p. 478–482.
6. S.Ye. Donets et al / Aluminum surface coating of copper using high-current electron beam // *Problems of atomic science and technology*.-No4(98). Ser. Plasma electr. & new meth. of Acc. Iss. 9-2015 p.302-305
7. A. Weisenburger, W. An, V. Engelko, A. Heinzl, A. Jianu, F. Lang, G. Mueller, F. Zimmermann. Intense Pulsed Electron Beams Application of Modified Materials // *Acta Physica Polonica A*. 2009, № 6, v. 115, p. 1053-1055.
8. S.Donets, V.Klepikov, O.Startsev, V.Uvarov, Yu.Lonin / Formation of Aluminum-Copper Composite Using High-Current Electron Beam Irradiation // *Proceedings of the 2019 IEEE 9th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties, NAP 2019 9075689*
9. V.F. Klepikov, V.V.Lytvynenko, Yu.F.Lonin, A.G.Ponomarev, O.G.Tolstolutskiy, V.V.Uvarov, V.T.Uvarov / The dynamics of the gas – plasma torch induced by the high current REB on solid state targets // *Problems of atomic science and technology*. Ser. Plasm. phys. № 1(59) .-is.15.-2009.- p.119-121
10. W. An, Ya. E. Krasik, R. Fetzer, B. Bazylev, G. Mueller, A. Weisenburger, V. Bernshtam / Characterization of high-current electron beam interaction with metal targets // *Journal of Applied Physics* 110, 093304 (2011); doi: 10.1063/1.3660764
11. Xiangdong Kang, Katsumi Masugata and Kiyoshi Yatsui Ablation Plasma Temperature Produced by Intense, Pulsed, Ion-Beam Evaporation // *Japanese Journal of applied physics* .-v.33.-p.2.-№ 78
12. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko, and M. Ya. Dovzhyk, Investigation of Regularities of the Processes of Formation of Surface Layers with Electroerosive Alloying. Part I, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 38, No. 12: 1611—1633 (2016) (in Russian)
13. V.F. Klepikov et al. Physical and mechanical properties of titanium alloy VT1-0 after high-current electron beam irradiation // *Problems of Atomic Science and Technology*. 2015, N 2, p. 39-42.
14. Zenker, R. Modern Thermal Electron Beam Processes—Research Results and Industrial Application. *Metallurgia Italiana*, 101, 2009 1-8.
15. A E Mayer, E N Borodin, V S Krasnikov, P N Mayer / Numerical modelling of physical processes and structural changes in metals under intensive irradiation with use of CRS code: dislocations, twinning, evaporation and stress waves // *Journal of Physics: Conference Series* 552 (2014) 012002

Donets S.Ye., Institute of Electrophysics and Radiation Technologies NAS of Ukraine

Lytvynenko V.V., Institute of Electrophysics and Radiation Technologies NAS of Ukraine

Lonin Yu.F., NSC Kharkiv Institute of Physics and Technology

Ponomarev A.G., NSC Kharkiv Institute of Physics and Technology

The electron beam method for formation of the aluminum-copper joints

A method for obtaining an aluminum-copper compound is proposed, which consists in the simultaneous irradiation of aluminum and copper plates with a pulse of a high-power electron beam. As a result, the aluminum material sprayed by the beam is deposited on the surface of the copper substrate, which is also activated by the electron beam. The coating has areas of greater and lesser penetration of aluminum into copper. A numerical estimate of the temperature distribution and displacement fields of the copper substrate material is made. Metallographic researches, energy dispersion analysis and fractographic researches are carried out. The conclusion about expediency of development of such approach for practical applications is made.

Key words: aluminum, copper, composite, electron beam, electron microscopy.

Дата надходження до редакції: 12.04.2021

МОДЕЛЮВАННЯ КОЧЕННЯ ЖОРСТКОГО ЦИЛІНДРА ПО ПОВЕРХНІ ҐРУНТУ

Зубко Владислав Миколайовичкандидат технічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-2426-2772
e-mail: zubkovladislav@ukr.net**Жигилій Дмитро Олексійович**кандидат технічних наук, доцент
Сумський державний університет
ORCID: 0000-0002-7063-7213
e-mail: zhigilyi.d@gmail.com**Соколік Сергій Петрович**старший викладач
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-4496-8681
e-mail: Sokolik1009@gmail.com**Руденко Віктор Аркадійович**кандидат технічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-7319-2451
e-mail: rudvik1942@ukr.net

Виявлення та видалення плужної підшви є важливою задачею. Сучасні безконтактні пристрої для виявлення плужної підшви не використовуються багатьма агропроблемниками через їх високу вартість, а розробка нового більш дешевого сканера дасть можливість невеликим господарствам досліджувати ущільнення ґрунту та вживати необхідних заходів для його розпушування. Особливістю пристрою, який ми розробляємо, є те, що його робочий орган (диск або сфера) проникає в ґрунт на невелику глибину. Метою даного дослідження є в рамках використаної моделі в'язкопружного шару отримати силові коефіцієнти впливу на циліндр, що забезпечують його рівномірне кочення при проникненні в неуцільнений в'язкопружний шар ґрунту. У цій роботі вирішується задача кочення абсолютно жорсткого циліндра по в'язкопружному шару неуцільненого ґрунту, зчепленому з недеформаційною напівплощиною, що імітує підшву плуга, за наявності зон зчеплення та ковзання в зоні контакту. При формулюванні задачі не враховується податливість циліндра і напівплощини, а для опису властивостей шару ґрунту використовується модель Кельвіна, яка має обмежену в'язкопружну повзучість.

Ключові слова: плужна підшва, в'язко-пружний шар, модель Кельвіна, відносна ковзання, тертя кочення.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.2>

Постановка проблеми. Плужна підшва — це ущільнений шар у ґрунті, що виникає внаслідок тиску площини робочих органів ґрунтообробних знарядь при роботі на однаковій глибині. Культури дуже чутливі до стану ґрунту, зокрема до його щільності. Ущільнення ґрунту знижує його водопоглинання, погіршує повітрообмін, порушує ріст кореневої системи рослин, збільшує навантаження на ґрунтообробні машини, збільшує витрату палива та знос робочих органів, скорочує термін служби знарядь. Тому виявлення та видалення підшви плуга є важливим завданням [1, 2].

Існує багато різних методів визначення глибини підшви плуга, починаючи від ручного вимірювання пенетрометрами і закінчуючи мобільними сканерами, які вимірюють безконтактно. Актуальним є питання зменшення собівартості виконання операцій визначення глибини залягання плужної підшви по всій площі поля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для вимірювання твердості ґрунтів використовують пенетрометри - прилади, призначені для введення в ґрунт металевих тіл (плунжерів) певної форми з мінімальним порушенням струк-

тури ґрунту. Пенетрометри бувають динамічними і статичними. У першому з них плунжер вводиться в ґрунт за допомогою удару або падіння тягаря (маси). Статичні пенетрометри вводять плунжер у ґрунт повільно й поступово, уникаючи динамічного ефекту [2-4].

Існує величезна кількість приладів для вимірювання твердості ґрунту. Найпоширенішими з них є твердоміри Горячкіна, Ревякіна, Висоцького та ін. Завдяки своїй простоті та надійності, твердомір Ревякіна отримав найбільшу популярність.

Велику кількість пенетрометрів (Кіріче, Кунце, Флореску-Целлінгера, Гетке та ін.) використовуються також у дослідницькій практиці країн Східної Європи. Їх відмінною рисою є використання не тільки плоских і клиноподібних плунжерів, а й багатьох інших форм. Це розширює можливості вивчення різних типів опорів ґрунтів. Ці пенетрометри доступні і прості у використанні. Але вони не дають можливості отримати точні дані про твердість ґрунту на великій площі. Щоб отримати більше даних, краще використовувати мобільні наземні сканери. Наприклад, SoilXplorer – безконтактний датчик для кар-

тографування та зміни глибини обробітку ґрунту за допомогою електромагнітних сигналів для вимірювання провідності ґрунту. За цією ознакою можна визначити зони типу ґрунту, відносної водності, а також площі ущільнення. За допомогою чотирьох приймальних котушок за один прохід «досліджуються» чотири різних шари від 0–25 см, 15–60 см, 55–95 см та 85–115 см. Його можна дуже легко інтегрувати в інші робочі процеси [4, 5].

Ми розробляємо більш дешеву технічну систему визначення глибини плужної підшви порівняно з існуючими сканерами ґрунту. Наша технічна система дозволить отримувати дані як під час виконання обробітку ґрунту, так і окремо. Ці дані можна буде використовувати для оптимального управління глибоким обробітком ґрунту.

Мета досліджень – в рамках використаної моделі в'язкопружного шару отримати силові коефіцієнти впливу на циліндр, що забезпечують його рівномірне кочення при проникненні в неуцільнений в'язкопружний шар ґрунту.

Результати досліджень. Розглянемо завдання в плоскій постановці для жорсткого циліндра і основи, що складається з в'язкопружного неуцільненого шару ґрунту товщиною h , зчепленого з жорсткою напівплощиною плужної підшви. Циліндр котиться в основі з постійною лінійною швидкістю V та відповідною кутовою швидкістю ω з проковзуванням. Лінія контакту циліндра та основи описується функцією

$f(x) = -\frac{x^2}{2 \cdot R}$, де R – радіус циліндра. Нехай (x', y') – нерухома система координат, пов'язана з основою, та (x, y) – рухома, пов'язана з циліндром, що котиться (рис. 1), так що

$$x' = x + V \cdot t; \quad (1)$$

$$y' = y. \quad (2)$$

Циліндр знаходиться під дією вертикальної сили P , що діє за нормаллю до поверхні ґрунтового в'язкопружного шару, і сили реакції P_1 , спрямованої їй протилежно, а також тангенціальної сили T і сили опору T_1 , що діє в протилежному напрямку.

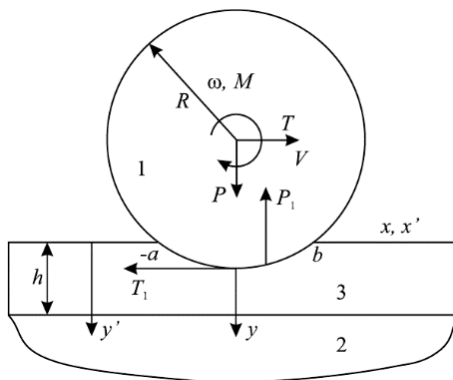


Рис. 1. Схема контакту циліндра (1) і в'язкопружного ґрунтового шару (3), зчепленого з жорсткою основою плужної підшви (2): a, b – координати меж області контакту; M – рушійний момент

Для опису нормальної та тангенціальної податливості неуцільненого ґрунтового шару використовується модель Кельвіна, яка є послідовним з'єднанням пружини та елемента Фойгта, володіючи обмеженою повзучістю [6]:

$$g + T_\varepsilon \cdot \frac{\partial g}{\partial t} = \frac{h}{E_L} \cdot \left(p + T_\sigma \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \right); \quad (3)$$

$$u + T_\varepsilon \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{h}{E_L} \cdot \left(p + T_\sigma \cdot \frac{\partial \tau}{\partial t} \right); \quad (4)$$

де u і u – нормальне та тангенціальне переміщення в'язкопружного ґрунтового шару; T_ε, T_σ – часи післядії та релаксації (у прийнятій моделі часи післядії та релаксації у різних напрямках вважаються однаковими); E_L – тривалий модуль пружності; $p(x)$ – нормальне напруження; $\tau(x)$ – тангенціальна напруга на площі контакту

У рухомій системі координат співвідношення (3) і (4) набудуть вигляду:

$$g + T_\varepsilon \cdot V \cdot \frac{\partial g}{\partial x} = \frac{h}{E_L} \cdot \left(p + T_\sigma \cdot V \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right); \quad (5)$$

$$u + T_\varepsilon \cdot V \cdot \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{h}{E_L} \cdot \left(p + T_\sigma \cdot V \cdot \frac{\partial \tau}{\partial x} \right); \quad (6)$$

В умовах тертя кочення площа контакту циліндра та основи $x \in (-a; b)$ розбивається на зони зчеплення Ω_A і проковзування Ω_S [6]. У підобласті ковзання абсолютне значення тангенційної напруги пов'язане з нормальною напругою за законом Кулона – Амонта, а тангенційна напруга спрямована протилежно швидкостям проковзування:

$$|\tau(x)| = \mu \cdot p(x), \quad x \in \Omega_S \quad (7)$$

У разі повного ковзання рівність (7) виконується по всій області контакту циліндра та основи. У підобласті зчеплення Ω_A рівні швидкості контактуючих точок циліндра та в'язкопружного шару. Для тангенціальних зсувів точок циліндра виконується співвідношення.

$$\frac{du_1}{dx} = \Delta, \quad y = 0, \quad x \in \Omega_S; \quad (8)$$

$$\Delta = \frac{V - \omega \cdot R}{V}, \quad (9)$$

де Δ – величина відносного проковзування.

В зоні зчеплення Ω_A має місце нерівність:

$$|\tau(x)| \leq \mu \cdot p(x), \quad x \in \Omega_A \quad (10)$$

Для всіх точок області контакту виконується співвідношення для нормальних переміщень:

$$g = d - \frac{x^2}{2 \cdot R}, \quad x \in (-a; b), \quad (11)$$

де d – глибина занурення циліндра у ґрунт.

Співвідношення (5)–(9) використовуються для розрахунку розподілу контактних нормальних та дотичних напруг в області контакту циліндра з в'язкопружним ґрунтовым шаром, що лежить на жорсткій напівплощині плужної підшви.

У прийнятій моделі в'язкопружного ґрунтового шару нормальні та тангенціальні контактні напруги не залежать одне від одного, тому проведемо розрахунок розподілу кон-

тактної нормальної напруги на площі контакту окремо. Вважається, що циліндр здійснює усталений рівноперемінний рух, тобто $V=\text{const}$, $a=\text{const}$, $b=\text{const}$ і $d=\text{const}$. Глибина заля-

гання плужної підшви вважається постійною $h=\text{const}$, інакше слід говорити про середню по полю глибину h . Зі співвідношень (4), (6) та (9) отримуємо:

$$d - \frac{x^2}{2 \cdot R} + T_\varepsilon \cdot V \cdot \frac{\partial \left(d - \frac{x^2}{2 \cdot R} \right)}{\partial x} = \frac{h}{E_L} \cdot \left(p + T_\sigma \cdot V \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right), \quad x \in (-a; b); \quad (12)$$

$$d - \frac{x^2}{2 \cdot R} + T_\varepsilon \cdot V \cdot \left(\frac{\partial d}{\partial x} - \frac{2 \cdot x}{2 \cdot R} \right) = \frac{h}{E_L} \cdot \left(p + T_\sigma \cdot V \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right);$$

$$\frac{E_L}{h} \cdot \left[-\frac{x^2}{2 \cdot R} - T_\varepsilon \cdot V \cdot \frac{x}{R} + d \right] = p + T_\sigma \cdot V \cdot \frac{\partial p}{\partial x};$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{T_\sigma \cdot V} \cdot p + \frac{E_L}{T_\sigma \cdot V} \cdot \left[\frac{x^2}{2 \cdot R} + T_\varepsilon \cdot V \cdot \frac{x}{R} - d \right] \cdot \frac{1}{h} = 0;$$

$$p(x) = \alpha(x) \cdot \beta(x); \quad \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \alpha(x)}{\partial x} \cdot \beta(x) + \alpha(x) \cdot \frac{\partial \beta(x)}{\partial x};$$

$$\frac{\partial \alpha(x)}{\partial x} \cdot \beta(x) + \alpha(x) \cdot \frac{\partial \beta(x)}{\partial x} + \frac{1}{T_\sigma \cdot V} \cdot \alpha(x) \cdot \beta(x) + \frac{E_L}{T_\sigma \cdot V} \cdot \left[\frac{x^2}{2 \cdot R} + T_\varepsilon \cdot V \cdot \frac{x}{R} - d \right] \cdot \frac{1}{h} = 0;$$

$$\alpha(x) \cdot \left(\frac{\partial \beta(x)}{\partial x} + \frac{1}{T_\sigma \cdot V} \cdot \beta(x) \right) + \left[\frac{\partial \alpha(x)}{\partial x} \cdot \beta(x) + \frac{E_L}{T_\sigma \cdot V} \cdot \left[\frac{x^2}{2 \cdot R} + T_\varepsilon \cdot V \cdot \frac{x}{R} - d \right] \cdot \frac{1}{h} \right] = 0;$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \beta(x)}{\partial x} + \frac{1}{T_\sigma \cdot V} \cdot \beta(x) = 0; \\ \frac{\partial \alpha(x)}{\partial x} \cdot \beta(x) + \frac{E_L}{T_\sigma \cdot V} \cdot \left[\frac{x^2}{2 \cdot R} + T_\varepsilon \cdot V \cdot \frac{x}{R} - d \right] \cdot \frac{1}{h} = 0; \end{cases}$$

$$\frac{\partial \beta(x)}{\partial x} = -\frac{1}{T_\sigma \cdot V} \cdot \beta(x);$$

$$\int \frac{d\beta(x)}{\beta(x)} = -\int \frac{1}{T_\sigma \cdot V} \cdot dx;$$

$$\ln|\beta(x)| + \ln|C_1| = -\frac{1}{T_\sigma \cdot V} \cdot x;$$

$$\beta(x) = e^{-\frac{1}{T_\sigma \cdot V} \cdot x};$$

$$\begin{cases} \beta(x) = e^{-\frac{1}{T_\sigma \cdot V} \cdot x}; \\ \frac{\partial \alpha(x)}{\partial x} \cdot e^{-\frac{1}{T_\sigma \cdot V} \cdot x} + \frac{E_L}{T_\sigma \cdot V} \cdot \left[\frac{x^2}{2 \cdot R} + T_\varepsilon \cdot V \cdot \frac{x}{R} - d \right] \cdot \frac{1}{h} = 0; \end{cases}$$

$$\frac{\partial \alpha(x)}{\partial x} \cdot e^{-\frac{1}{T_\sigma \cdot V} \cdot x} = -\frac{E_L}{T_\sigma \cdot V} \cdot \left[\frac{x^2}{2 \cdot R} + T_\varepsilon \cdot V \cdot \frac{x}{R} - d \right] \cdot \frac{1}{h};$$

$$\int d\alpha(x) = -\frac{E_L}{T_\sigma \cdot V} \cdot \frac{1}{h} \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot R} \cdot \int x^2 \cdot e^{\frac{1}{T_\sigma \cdot V} \cdot x} \cdot dx + \frac{T_\varepsilon \cdot V}{R} \cdot \int x \cdot e^{\frac{1}{T_\sigma \cdot V} \cdot x} \cdot dx - d \cdot \int e^{\frac{1}{T_\sigma \cdot V} \cdot x} \cdot dx \right];$$

$$\alpha(x) = -\frac{E_L}{T_\sigma \cdot V} \cdot \frac{1}{h} \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot R} \cdot \left(e^{\frac{1}{T_\sigma \cdot V} \cdot x} \cdot (T_\sigma \cdot V \cdot x^2 - 2 \cdot T_\sigma^2 \cdot V^2 \cdot x + 2 \cdot T_\sigma^3 \cdot V^3) \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{T_\varepsilon \cdot V}{R} \cdot \left(e^{\frac{1}{T_\sigma \cdot V} \cdot x} \cdot (T_\sigma \cdot V \cdot x - T_\sigma^2 \cdot V^2) \right) - d \cdot T_\sigma \cdot V \cdot e^{\frac{1}{T_\sigma \cdot V} \cdot x} \right] + C;$$

$$\alpha(x) = -\frac{E_L}{T_\sigma \cdot V} \cdot \frac{1}{h} \cdot e^{\frac{1}{T_\sigma \cdot V} x} \cdot T_\sigma \cdot V \cdot \left[\left((x^2 - 2 \cdot T_\sigma \cdot V \cdot x + 2 \cdot T_\sigma^2 \cdot V^2) \right) + (2 \cdot (x - T_\sigma \cdot V)) - 2 \cdot d \right] + C;$$

$$\alpha(x) = -\frac{E_L}{T_\sigma \cdot V} \cdot \frac{1}{h} \cdot e^{\frac{1}{T_\sigma \cdot V} x} \cdot T_\sigma \cdot V \cdot \left[x^2 - 2 \cdot T_\sigma \cdot V \cdot x + 2 \cdot T_\sigma^2 \cdot V^2 + 2 \cdot x - 2 \cdot T_\sigma \cdot V - 2 \cdot d \right] + C;$$

$$\alpha(x) = -\frac{E_L}{2 \cdot R} \cdot \frac{1}{h} \cdot e^{\frac{1}{T_\sigma \cdot V} x} \cdot \left[x^2 - 2 \cdot (T_\sigma \cdot V - 1) \cdot x + 2 \cdot (T_\sigma \cdot V - 1) \cdot T_\sigma \cdot V - 2 \cdot d \right] + C;$$

$$\alpha(x) = -\frac{E_L}{2 \cdot R} \cdot \frac{1}{h} \cdot e^{\frac{1}{T_\sigma \cdot V} x} \cdot \left[x^2 - 2 \cdot (T_\sigma \cdot V - 1) \cdot (x - T_\sigma \cdot V) - 2 \cdot d \right] + C;$$

$$p(x) = \alpha(x) \cdot \beta(x) = -e^{-\frac{1}{T_\sigma \cdot V} x} \cdot \frac{E_L}{2 \cdot R} \cdot \frac{1}{h} \cdot e^{\frac{1}{T_\sigma \cdot V} x} \cdot \left[x^2 - 2 \cdot (T_\sigma \cdot V - 1) \cdot (x - T_\sigma \cdot V) - 2 \cdot d \right] - C \cdot e^{-\frac{1}{T_\sigma \cdot V} x};$$

$$p(x) = -\frac{E_L}{2 \cdot R} \cdot \frac{1}{h} \cdot \left[x^2 - 2 \cdot (T_\sigma \cdot V - 1) \cdot (x - T_\sigma \cdot V) - 2 \cdot d \right] + C \cdot e^{-\frac{1}{T_\sigma \cdot V} x}.$$

У свою чергу розподіл поверхню контакту нормальних напруг інтегрально утворює силу P , що вдавлює циліндр у неущільнений ґрунтовий шар, отже мають місце рівняння рівноваги – сума проєкцій усіх сил на вертикальну вісь:

$$P + \int_{-a}^b \left[-\frac{E_L}{2 \cdot R} \cdot \frac{1}{h} \cdot \left[x^2 - 2 \cdot (T_\sigma \cdot V - 1) \cdot (x - T_\sigma \cdot V) - 2 \cdot d \right] + C \cdot e^{-\frac{1}{T_\sigma \cdot V} x} \right] \cdot dx = 0;$$

$$P = \left\{ \frac{E_L}{2 \cdot R} \cdot \frac{1}{h} \cdot \left[\frac{x^3}{3} - 2 \cdot (T_\sigma \cdot V - 1) \cdot \left(\frac{x^2}{2} - T_\sigma \cdot V \cdot x \right) - 2 \cdot d \cdot x \right] + C \cdot T_\sigma \cdot V \cdot e^{-\frac{1}{T_\sigma \cdot V} x} \right\}_{-a}^b;$$

$$P = \frac{E_L}{2 \cdot R} \cdot \frac{1}{h} \cdot \left[\frac{b^3 + a^3}{3} - 2 \cdot (T_\sigma \cdot V - 1) \cdot \left(\frac{b^2 - a^2}{2} - T_\sigma \cdot V \cdot (b + a) \right) - 2 \cdot d \cdot (b + a) \right] + C \cdot T_\sigma \cdot V \cdot \left(e^{-\frac{1}{T_\sigma \cdot V} b} - e^{-\frac{1}{T_\sigma \cdot V} a} \right).$$

Константа інтегрування визначається для конкретного ґрунту за передпиковим значенням P при досягненні d глибини залягання плужної підшви h . Припускаємо також, що для нев'язких ґрунтів допустимо для практичних розрахунків вважати $a \approx b$.

Висновки. Розглянуто 2D-контактну задачу для жорсткого циліндра, що котиться на тонкому в'язкопружному

шарі, поєднаному з жорсткою напівплощиною. Для опису в'язкопружних властивостей шару ґрунту використовується модель Кельвіна. Представлено метод розрахунку нормального та напружень зсуву у зоні контакту. Досліджено розподіл контактних напружень та залежність коефіцієнта зчеплення від відносного ковзання для різних значень коефіцієнта тертя ковзання та параметрів в'язкості шару.

Список використаної літератури.

1. Гаврилов С. Проблема плужної підшви у ґрунті та шляхи її вирішення [Електронний ресурс] / С. Гаврилов // Пропозиція. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://propozitsiya.com/ua/problema-pluzhnoyi-pidoshvi-u-grunti-ta-shlyahi-yiyivirishennya>.
2. Бойко І. Майстер по «підшви» [Електронний ресурс] / І. Бойко // AgroONE №60. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.agroone.info/publication/majster-po-pidoshvi/>.
3. Дергун Р. Інтегрований обробіток [Електронний ресурс] / Р. Дергун // The Ukrainian Farmer. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://agrotimes.ua/article/integrovanuj-obrobitok/>.
4. Переуцільнення ґрунту. Причини, наслідки та рішення. [Електронний ресурс] // АМАКО Україна. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://amaco.com.ua/pereuplotnenie-pochvy-prichiny-posledstviya-i-resheniya/>.
5. Бромот І. Ущільнення ґрунту. Все, що треба знати [Електронний ресурс] / І. Бромот // Traktorist.ua. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://traktorist.ua/articles/873-uschilnennya-gruntu-vse-scho-treba-znati>.
6. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. – 480 с.

Zubko V.M., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Zhyhylii D.O., Sumy State University (Ukraine)

Sokolik S.P., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Rudenko V.A., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Modeling the rolling of a rigid cylinder on the soil surface

Detection and removal of the plow sole is an important task. Modern contactless scanners are not available for most farms due to the high price, and our device will allow small farms to investigate soil compaction and take the necessary measures to loosen it. The peculiarity of the device we are developing is that its working body (disk or sphere) penetrates into the soil to a small depth. The aim of this study is, within the framework of the used model of the viscoelastic layer, to obtain the force factors of the impact on the cylinder, ensuring its uniform rolling when penetrating into the uncompacted viscoelastic soil layer. This work solves the problem

of rolling an absolutely rigid cylinder on a viscoelastic layer of uncompacted soil, interlocked with a non-deformable half-plane that simulates a plow sole, in the presence of adhesion and slippage zones in the contact area. When formulating the problem, the compliance of the cylinder and half-plane is not taken into account, and to describe the properties of the soil layer, the Kelvin model is used, which has a limited viscoelastic creep.

Key words: *plow sole, viscoelastic layer, Kelvin model, relative slip, rolling friction.*

Дата надходження до редакції: 13.04.2021

МЕТОДИЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ ПІДХОДИ ВІДНОСНО ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТ ПАЛИВА ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ ЗЕРНА ВІД ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ КОМБАЙНІВ

Барабаш Григорій Іванович

кандидат технічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-1075-479X
e-mail: grinya45@ukr.net

Мікуліна Марина Олександрівна

кандидат економічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-6918-5192
e-mail: marinamikulina1@ukr.net

Поливаний Антон Дмитрович

студент
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-8363-7186
e-mail: polivanui1@gmail.com

В запропонованій статті наведені методичні та економічні підходи стосовно визначення основних техніко-експлуатаційних показників вантажних автомобілів при транспортуванні зерна від комбайна при збиранні озимої пшениці, що дає можливість визначити в подальшому безпосередньо ефективність їх використання в виробничих умовах.

Ключові слова: автомобіль, комбайн, збирання, швидкість руху, продуктивність, витрати палива.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.3>

Постановка проблеми. Проблема полягає в тому що при відсутності в господарстві нормативів на показники використання автотранспорту при перевезенні зерна від комбайна ці показники можна визначити аналітичним шляхом і використати їх для оплати праці виконавців та списання палива.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Із підручників та інших літературних джерел по машиновикористанню у рослинництві відомо, як визначаються показники використання автомобільного транспорту при відомих їх технічних характеристиках та умовах їх використання при збиранні різних зернових культур. Однак, аналітичних досліджень стосовно того як насправді визначаються зазначені показники в конкретних умовах нами виявлено не було.

Формулювання цілей статті та мета досліджень. Надати методичні та економічні підходи по визначенню основних техніко-експлуатаційних показників і, зокрема продуктивність та витрати палива вантажних автомобілів при транспортуванні зерна від зернозбиральних комбайнів при збиранні пшениці, що дасть можливість більш правильно організувати їх роботу в виробничих умовах, а також цей матеріал може бути корисним при вивченні транспортних процесів в АПК.

Розглянемо це на конкретному прикладі.

Вихідні дані:

Зернозбиральний комбайн ПАЛЕССЕ GS 12.(рис.1)

Ширина захвата жатки – хедера $B_k = 8$ м.

Вантажний автомобіль КамАЗ – 45143-11 (рис.2)

Розміри поля: площа поля $F=200$ га; довжина $L = 2000$ м; ширина $B=1000$ м.

Рівень врожайності зерна, $У_з, = 75$ ц/га = 7,5 т/га

Загальна відстань перевезень – $l_n = 4$ км. В т.ч.

- виробничою територією – 0,5 км;

- по трасі – 2,5 км;

- по полю.- 1 км. (половина довжини поля).

Техніко-експлуатаційні показники використання комбайна наведені в таблиці 1, які визначені за відомими формулами [1,2,3,4].

Таблиця 1. Показники використання комбайна

| № п/п | Показники | Одиниці виміру | Значення показників |
|-------|--|----------------|---------------------|
| 1 | Продуктивність за 1 год. основного часу | т/год. | 21,8 |
| 2 | Робоча швидкість | км/год | 3,8 |
| 4 | Продуктивність за одну годину змінного часу | т/год. | 20,3 |
| 5 | Продуктивність за зміну | т | 142 |
| 6 | Тривалість збирання | | 74 |
| 7 | Кількість змін | год. | 10 |
| 8 | Необхідна кількість комбайнів для збирання пшениці на полі | | 1 |



Рис.1. Зернозбиральний комбайн ПАЛЕССЕ GS 12



Рис. 2. Вантажний автомобіль КамАЗ – 45143-11

Для забезпечення ритмічності виконання перевезень зерна від комбайнів слід обґрунтовано визначити потребу в транспортних засобах з урахуванням їх виду й обсягу вантажів. Нами був вибраний автомобіль КамАЗ – 45143-11 через те, що його кузов вміщає в себе згідно паспортної характеристики зерно з двох бункерів комбайна. Це дозволяє повністю використати вантажопідйомність автомобіля-самоскида, покращивши тим самим рівень його використання і забезпечити ритмічність роботи збирального комплексу.

Послідовність розрахунків.

1. Тривалість заповнення бункера зерном, t_b , год.

$$t_b = m_b / \omega_o \quad (1)$$

де m_b – маса зерна в бункере, т. $m_b = 5,3$ т;
 ω_o – продуктивність комбайна за 1 год. основного часу,
 $\omega_o = 21,8$ т/год.
 Тоді $t_b = 0,24$ год.

1. Тривалість циклу вантажного автомобіля, $t_{ц}$, год. :

$$t_{ц} = t_n + t_b + t_{рз} + t_{бв} + t_{оз} \quad (2)$$

де t_n – тривалість навантаження кузова автомобіля, год.;
 t_b – тривалість їздки автомобіля з вантажем, год.;
 $t_{рз}$ – тривалість зважування та розвантаження, год.;
 $t_{бв}$ – тривалість їздки автомобіля без вантажу, год.;
 $t_{оз}$ – тривалість очікування чергового завантаження, год.

Тривалість вивантажування бункера, коли комбайн зупиняється, очікує транспортний засіб (1хв.) і вивантажує зерно (2 хв.), то $t_n = 3$ хв. = 0,05 год.

Тоді $t_n = 6$ хв. = 0,1 год.

Тривалість їздки з вантажем t_b складається із тривалості їзди по полю l_n ($l_n = 1$ км – половина довжини поля), дорозі з асфальтовим покриттям $l_{ан}$, ($l_{ан} = 2,5$ км), господарською територією l_e ($l_e = 0,5$ км), год.:

Швидкість руху автомобіля з вантажем: по полю – 20 км/год., по асфальтовій дорозі – 60 км/год., по території поселень – 5 км/год.

$$t_b = l_n / V_n + l_{ан} / V_{ан} + l_e / V_e \quad (3)$$

Тоді $t_b = 0,10$ год.

Спостереження в виробничих умовах свідчать, що на зважування транспортного засобу та вивантаження зерна з кузова триває близько 5 хв.

Тоді приймемо $t_{рз} = 0,08$ год.

Тривалість їздки без вантажу, $t_{бв}$, год.:

$$t_{бв} = l_n / V_n + l_{ан} / V_{ан} + l_e / V_e \quad (4)$$

Швидкість руху автомобіля без вантажу: по полю – 30

км/год., по асфальтовій дорозі – 70 км/год., по виробничій території – 5 км/год.

Тоді $t_{бв} = 0,08$ год.

Очікування чергового завантаження кузова автомобіля дорівнює тривалості заповнення бункера зерном t_b .

Тоді $t_{оз} = 0,24$ год.,

Тоді загальна тривалість циклу буде дорівнювати $t_{ц} = 0,6$ год.

2. Тривалість рейсу транспортного засобу, t_p , складається із тривалості їздки транспортних засобів з вантажем, тривалості розвантажування і зважування, тривалості їздки транспортних засобів без вантажу, год:

$$t_p = t_b + t_{рз} + t_{бв} \quad (5)$$

Тоді $t_p = 0,26$ год. = 16 хв.

Підрахунки показують, що тривалість рейсу автомобіля-самоскида та тривалість заповнення бункера комбайна зерном практично співпадають. Тобто, для обслуговування зернозбирального комбайна марки ПАПЕССЕ GS 12 достатньо мати один автомобіль марки КамАЗ – 45143-11. Ті декілька хвилин (близько двох хвилин), протягом яких комбайн буде очікувати транспорт, потрібні комбайнеру для огляду комбайна або перевірки якості обмолоту.

3. Шлях заповнення бункера зерном, l_b , год.

$$l_b = V_p \cdot t_b \quad (6)$$

Після підрахунків $l_b = 0,91$ км = 910 м, що приблизно дорівнює половині довжини поля.

Показники l_b , t_b потрібні водію автомобіля для орієнтури в просторі і в часі по відношенню до комбайна.

4. Продуктивність транспортного засобу $\omega_{ц}$, т/год.

$$\omega_{ц} = 2 m_b / t_{ц} \quad (7)$$

При тривалості циклу $t_{ц} = 0,6$ год, $\omega_{ц} = 17,7$ т/год.

5. Кількість рейсів за зміну n_p :

$$n_p = T_{зм} / t_{ц} \quad (8)$$

При тривалості зміни, $T_{зм} = 7$ год. кількість рейсів $n_p = 12$.

Потужність двигуна автомобіля при виконанні транспортних процесів витрачається на: привід механізмів трансмісії, переключення автомобіля, подолання опору повітря, подолання сил інерції, подолання підйому,

6. Втрати потужності в трансмісії, кВт:

$$N_{mp} = N_{ен} \cdot (1 - \eta_{mp}) \quad (9)$$

де $N_{ен}$ – номінальна ефективна потужність двигуна, кВт.
 $N_{ен} = 176$ кВт.

η_{mp} – ККД трансмісії: $\eta_{mp} = 0,95$. Тоді $N_{ен} = 8,8$ кВт.

7. Втрати потужності на переключення автомобіля, кВт

$$N_f = \frac{G_a \cdot f \cdot V_p}{3,6} \quad (10)$$

де G_a – вага автомобіля, кН;

f – коефіцієнт опору переключенню

Вага автомобіля без вантажу $G_a = 87,4$ кН; вага зерна одного бункера $G_{з1} = 52$ кН; вага зерна двох бункерів $G_{з2} = 104$ кН; вага автомобіля із зерном одного бункера

$G_a=87,4+52=139,4$ кН; вага автомобіля із зерном двох бункерів $G_a = 87,4+104=191,4$ кН;

При русі автомобіля по полю $f=0,07$; при русі по асфальтовій дорозі $f=0,02$.

8. Втрати потужності на подолання опору повітря, кВт

$$N_w = \frac{c \cdot F_a \cdot V_p^2 \cdot 10^{-3}}{168,5}, \quad (11)$$

де c – коефіцієнт обтічності, щільності, в'язкості повітря, кг·год.²/м⁴. $c=0,7 \dots 0,8$ кг·год.²/м⁴.

F_a – площа лобової поверхні, м². Визначити на основі габаритних розмірів - ширини і висоти – це приблизно 6 м².

При швидкості руху агрегату $V_p \leq 20$ км/год або лобовій поверхні $F_a \leq 10$ м² $N_w \approx 0$.

9. Втрати потужності на подолання підйому, кВт

$$N_\alpha = \frac{G_a \cdot i \cdot V_p}{360}, \quad (12)$$

де G_a – вага агрегату, кН;

i – схил місцевості, %.

10. Баланс потужності двигуна автомобіля, N_e , (кВт):

$$N_e = N_{mp} + N_f, \quad (13)$$

11. Коефіцієнт завантаженості двигуна по потужності,

η_N :

$$\eta_N = \frac{N_e}{N_{ен}}. \quad (14)$$

Оптимальна величина завантаження дизельних двигунів $\eta_N=0,70 \dots 0,85$.

Визначені показники наведені в таблиці 2.

Таблиця 2. Показники використання автомобілів

| № п/п | Елементи часу зміни | N_e кВт | η_N | G_p кг/год | l км | t год. | G кг |
|-------|---|--------------|----------|-----------------|-----------|-------------|-----------|
| 1 | Холостий рух автомобіля: | | | | | | |
| | -по виробничій території | 11,2 | 0,06 | 2,5 | 6 | 1,2 | 3,0 |
| | -по трасі | 42,8 | 0,24 | 10,0 | 30 | 0,48 | 4,8 |
| | -по полю | 63,9 | 0,34 | 14,1 | 12 | 0,36 | 5,1 |
| | Разом | | | | 48 | 2,04 | 12,9 |
| 2 | Напіпорожній рух по полю | 90,4 | 0,51 | 21,2 | 11 | 0,37 | 4,1 |
| 3 | Рух завантаженого автомобіля: | | | | | | |
| | -по полю | 120,8 | 0,69 | 28,6 | 12 | 0,60 | 17,2 |
| | -по трасі | 72,6 | 0,41 | 17,0 | 30 | 0,48 | 8,2 |
| | -по виробничій території | 14,2 | 0,08 | 3,3 | 6 | 1,2 | 4,0 |
| | Разом | | | | 48 | 2,28 | 29,4 |
| 4 | Вивантаження зерна із кузова автомобіля | - | | 8,3 | - | 0,96 | 10,0 |
| 5 | Всього за фактичну тривалість зміни | | | | 59 | | 56,4 |

Висновки.

1. Наведені в таблицях 2 свідчать про те, що завантаженість двигуна найбільша (69%) при русі автомобіля – самоскида по полю з повністю завантаженим кузовом. Однак і в цій ситуації цей показник далекий від нормативного.
2. При русі автомобіля без вантажу (холостий пробіг) ви-

трата палива на 100 км дорівнюють 15,8 кг. Повністю завантажений автомобіля витрачає на 100 км пробігу 27,1 кг., що вписується в діапазон нормативних витрат палива в літній сезон.

3. Витрата дизельного палива на 1т перевезеного зерна пшениці складають 120г

Список використаної літератури.

1. Mikulina M., Polyvaniy A. INTERNATIONAL ASPECTS OF CONTROLLING OF TRANSPORT AND LOGISTICS COMPLEXES // The 2 nd International scientific and practical conference "Modern directions of scientific research development" (August 4-6, 2021) BoScience Publisher, Chicago, USA. 2021. 448 p. С. 59-64
2. Поливаний А.Д., Мікуліна М.О. Логістична концепція транспортних підприємств// Матеріали Всеукраїнської студентської наукової конференції (11- 15 листопада 2019 р.).– Суми, 2019. С.270
3. Мікуліна М. О. Барабаш Г.І., Поливаний А.Д. Вплив схем розвантаження комбайна на показники використання транспортного засобу [Електронний ресурс]. The 5th International scientific and practical conference «Science and education: problems, prospects and innovations», (February 4-6, 2021). – Kyoto : CPN Publishing Group, 2021. – P. 691-699.
4. Мікуліна М.О. Оцінка тракторів з різним типом рушіїв [Електронний ресурс]. Збірник тез доповідей по матеріалах XXI Міжнародної наукової конференції „Сучасні проблеми землеробської механіки”. Харків: ХНТУСГ, 2020. 370 с.. С.130 – 131

Barabash G.I., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Mikulina M.O., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Polyvaniy A.D., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Methodological and economic approaches regarding the determination of fuel consumption of vehicles when transporting grain from grain harvesters

The proposed article presents methodological and economic approaches to determine the main technical and operational indicators of trucks for transporting grain from the combine when harvesting winter wheat, which makes it possible to determine directly the effectiveness of their use in production conditions.

Formulation of the problem. The problem is that in the absence of standards in the economy for indicators of the use of vehicles in the transportation of grain from the combine, these indicators can be determined analytically and used to pay performers and write off fuel.

The problem is that in the absence of standards in the economy for indicators of the use of vehicles in the transportation of grain from the combine, these indicators can be determined analytically and used to pay performers and write off fuel.

Analysis of recent research and publications. From textbooks and other literature sources on machine use in crop production, it is known how to determine the indicators of the use of road transport with their known technical characteristics and conditions of their use in the harvesting of various cereals. However, we have not found any analytical studies on how these indicators are actually determined in specific conditions.

Formulation of the goals of the article and the purpose of research. Provide methodological and economic approaches to determine the main technical and operational indicators, and in particular the productivity and fuel consumption of trucks when transporting grain from combine harvesters when harvesting wheat, which will allow them to better organize their work in production conditions, and this material can be useful in the study of transport processes in agriculture.

Tables 2 show that the engine load is greatest (69%) when moving the car - a dump truck on the field with a fully loaded body. However, in this situation, this figure is far from the norm.

When driving a car without a load (idling) fuel consumption per 100 km is equal to 15.8 kg. A fully loaded car consumes 27.1 kg per 100 km, which fits into the range of standard fuel consumption in the summer season.

Consumption of diesel fuel per 1 ton of transported wheat grain is 120 g

Key words: car, combine, harvesting, speed, productivity, fuel consumption.

Дата надходження до редакції: 28.04.2021

ВИСОКОПРОДУКТИВНИЙ МЕТОД ЦЕМЕНТАЦІЇ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ

Коноплянченко Євген Владиславович

кандидат технічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет

ORCID: 0000-0003-4814-1796

email: yevhen.konoplianchenko@snau.edu.ua

В статті представлений новий спосіб цементації сталевих деталей електроіскровим легуванням (ЕІЛ), який дозволяє підвищити продуктивність процесу цементації та зносостійкість її поверхневого шару. Спосіб відрізняється тим, що в якості матеріалу аноду застосовують порошок графіту, а катодом є деталь з низьковуглецевої або середньовуглецевої легованої сталі. Легування порошком графіту проводять з продуктивністю 0,028-0,056 хв/см², при варіюванні енергії розряду в діапазоні 0,6-4,3 Дж. При використанні в якості матеріалу катоду сталі 12Х18Н10Т формується поверхневий шар підвищеної твердості товщиною від 4-5 до 100-150 мкм, а при легуванні сталі 40Х з продуктивністю 0,044 хв./см² та енергією розряду 2,8 Дж поверхневий шар підвищеної твердості має товщину більше 0,15 мм. Шорсткість поверхні (Ra) при цьому відповідає 0,6-0,7 мкм.

Ключові слова: електроіскрове легування; продуктивність; порошок графіту; сталь; товщина шару; шорсткість.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.4>

Вступ

На протязі свого терміну служби механічне обладнання зазнає шкідливих наслідків процесу зношування, що в більшості випадків означає втрату матеріалу деталей до стадії, коли вони більше не можуть ефективно виконувати призначені їм функції. Цей процес відбувається з різною швидкістю, залежно від технологічного призначення обладнання, навантажень, експлуатаційних особливостей, матеріалу деталей та впливу навколишнього середовища. З метою підвищення зносостійкості вузлів тертя велика увага приділяється як матеріалу контактуючих поверхонь, так і способам їх формування. Протягом останніх десятиліть інженерія поверхонь стала ключовою технологією передових застосувань, пропонує нові підходи до формування поверхонь деталей з особливими фізичними, хімічними або механічними властивостями. Розроблені нові методи обробки поверхні, які успішно застосовуються в промисловості для підвищення зносостійкості деталей машин. Задачею сьогодення є створення нових високопродуктивних методів модифікації поверхні, на базі енергоефективних та ресурсозберігаючих технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для надання поверхневого шару сталі високої твердості та зносостійкості, для підвищення границі контактної витривалості та границі витривалості при згинанні та крученні традиційно використовують спосіб цементації, який викону-

ють методом хіміко-термічної обробки (ХТО), полягає у дифузійному насиченні поверхневого шару сталі вуглецем при нагріванні у відповідному середовищі - карбюризаторі. Як правило, цементацію здійснюють при температурах, в межах 930-950°С, коли є стійким аустеніт, що розчиняє вуглець у великій кількості. Кінцевих властивостей цементовані вироби набувають у результаті гартування та низького відпуску, що здійснюються після цементації. Зазвичай, цементації піддають низьковуглецеві (0,1-0,18%), частіше леговані сталі. Цементації піддають великогабаритні деталі зі сталей з підвищеним вмістом вуглецю (0,203%). Вибір таких сталей необхідний для того, щоб серцевина виробу, яка не насичується вуглецем при цементації, зберігала високу в'язкість після гартування [1]. Процес гартування виробів супроводжується утворенням в них значної залишкової напруги у результаті нерівномірного розподілення температури по перерізу та неоднакової зміни об'єму різних зон. Через сумісну дію температурної та структурної напруги у цементованому шарі виникають напруги стиснення, а у серцевині - напруги розтягнення. Залишкові напруги спричинюють деформації виробів, іноді досить значні [2]. Крім того, суттєвим недоліком способу є необхідність захисту окремих ділянок деталі, які не підлягають зміцненню, спеціальними покриттями, обмазками та ін., висока трудомісткість, собівартість, велика тривалість процесу та екологічна безпека (рис.1).



Рис. 1. Процес традиційної цементації методом хіміко-термічної обробки [3].

Останнім часом всесвітнього поширення набув спосіб електроіскрового легування (ЕІЛ), металевих поверхонь, суттю якого є процес перенесення матеріалу на оброблювану поверхню іскровим електричним розрядом. Спосіб має низку специфічних особливостей:

- можливе дифузійне збагачення поверхні катода (деталі) складеними елементами анода (легувального електрода) без зміни розміру деталі;
- відсутність об'ємного нагрівання деталі;
- проста технологія ЕІЛ металевих поверхонь, а необхідна апаратура є малогабаритною та транспортабельною [4].

Однією із специфічних особливостей ЕЕЛ є те, що процес легування може відбуватися без перенесення матеріалу анода на поверхню катода, без приросту матеріалу, тобто відбувається дифузійне насичення поверхні деталі складовими елементами (елементом) анода, наприклад, при ЕЕЛ графітовим електродом [5]. Метод ЕЕЛ графітовим електродом заснований на процесі дифузії (насичення поверхневого шару деталі вуглецем) і має певну схожість з різновидом хіміко-термічної обробки – цементацією.

Робота [6] ілюструє спосіб цементації сталевих деталей шляхом електроерозійного легування графітовим електродом-анодом (ЦЕІЛ) вказаних деталей - катодів, який відрізняється тим, що в якості матеріалу катода використовують низьковуглецеві леговані сталі аустенітного класу, причому легування здійснюють з продуктивністю 1,0-5,0 хв./см² і з формуванням поверхневих шарів товщиною від 4-5 до 320-350 мкм. Крім цього спосіб відрізняється тим, що електроерозійне легування здійснюють з варіюванням розряду у діапазоні 0,036-6,8 Дж. Однак, вищенаведений спосіб має суттєві недоліки:

1. Дуже низька продуктивність, яка складає 1,0-5,0 хв./см².
2. Висока шорсткість поверхні, $R_a = 0,9-14,0$ мкм, відповідно при енергії розряду $W_p = 0,036-6,8$ Дж.
3. Необхідність додаткової обробки поверхні для зниження шорсткості і підвищення зносостійкості деталей.

В [7] метою роботи було підвищення якості поверхневих шарів сталевих деталей (зниження шорсткості, підвищення товщини цементованого шару, мікротвердості і суцільності), шляхом вдосконалення способу цементації методом ЕІЛ, за рахунок спільного застосування при легуванні компактного графітового електрода-інструменту і порошку графіту.

Для досліджень використовували дві серії зразків зі сталі 20 і 40Х.

У першій серії зразки обробляли за традиційною технологією – на одному режимі і з однаковою продуктивністю при ЦЕІЛ компакним електродом-інструментом.

У другій серії зразки обробляли поетапно: на першому етапі здійснюється ЦЕІЛ поверхні зразка, відповідно до обраної енергії розряду і з продуктивністю 1 хв./см²; на другому етапі сформовану на першому етапі поверхню деталі наносили, ретельно втираючи, порошок графіту у вигляді суспензії, виготовленої у співвідношенні ~80% порошку графіту і 20% вазеліну; на третьому етапі, не чекаючи висихання, проводили ЦЕІЛ, обробленої на другому етапі поверхні, причому на тому ж режимі і з такою ж продуктивністю, як і на першому етапі.

Слід відмітити, що при традиційному способі, при використанні будь-якого режиму, на самому початку процесу ЦЕІЛ на оброблюваній поверхні зразка (деталі) підвищується

шорсткість і при цьому кожний наступний розряд проходить через найбільш виступаючу частину поверхні, а поверхня між виступами не піддається легуванню вуглецем. Звідси невисока суцільність, глибина дифузії вуглецю і зони підвищеної твердості.

Інша картина в пропонованому у [7, 8] способі. На другому етапі западини між виступами шорсткостей заповнюються порошком графіту і вже на третьому етапі процес ЕІЛ протікає не тільки по виступах шорсткостей, а й по поверхні порошку графіту, що збільшує суцільність легованого шару до 100%. Крім того, повторна ЦЕІЛ на третьому етапі пропонованої технології призводить до насичення сталі вуглецем, збільшення глибини дифузії вуглецю порівняно з традиційною ЦЕІЛ, і в умовах прискореного охолодження після ЦЕІЛ «білий» шар має більш високу мікротвердість (9932 МПа), що зберігається на відстані до 50-70 мкм від поверхні.

Як показали останні дослідження в області технології формування електроіскрових покриттів, впровадження високотехнологічних роботизованих комплексів (рис. 2) вирішило проблему точності позиціонування, суцільності покриття, відтворення просторової форми поверхні, але питання шорсткості поверхні та продуктивності процесу ЕІЛ залишилися не вирішеними.

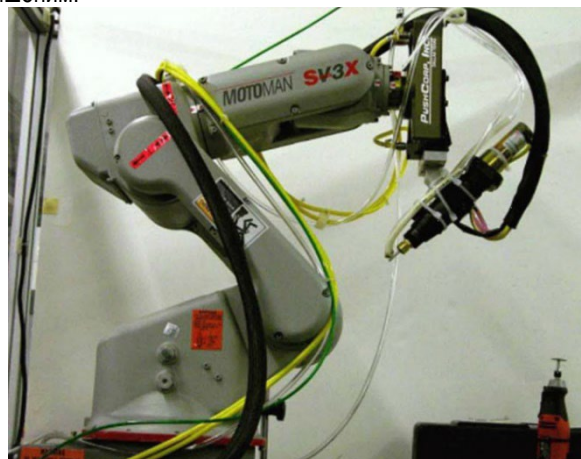


Рис. 2. Робот Motoman SV3X з блоком силового керування PushCorp, оснащений ЕІЛ модулем [11]

В [10] автором запропоновано, спосіб ЦЕІЛ для обробки поверхонь виробів, який на відміну від традиційної хіміко-термічної обробки, є способом фінішної обробки. При цьому способі характеристики зміцненого шару (ступінь цементації і глибина) поліпшуються при веденні процесу.

Таким чином, **метою роботи** було створення способу цементації сталевих деталей електроіскровим легуванням, який би дозволив знизити шорсткість поверхневого шару деталі, підвищити його зносостійкість, та значно пришвидшити продуктивність процесу.

Методи досліджень

Метод ЕІЛ був реалізований на установці моделі «Елітрон 52-А». Енергія розряду варіювалася у діапазоні 0,6-6,8 Дж. В якості катода використовували зразки розміром 10×10×10 мм зі сталі 12Х18Н10Т та сталі 40Х. В якості анода використовувався порошок графіту. Шорсткість вимірювали профілографом-профілометром моделі 201 заводу «Калібр». Металографічні і дюрOMETричні дослідження отриманих покриттів проводили за стандартними методиками з використан-

ням оптичного мікроскопа «Неофот-2» і приладу ПМТ-3, відповідно.

Поставлену задачу вирішували тим, що при цементації сталевих деталей ЕІЛ графітовим електродом, в якості матеріалу катода використовували низьковуглецеві леговані сталі аустенітного класу, а легування здійснювали порошком графіту з продуктивністю 0,028-0,056 хв/см² і з формуванням поверхневих шарів товщиною від 4-5 до 100-150 мкм.

Зразок зі сталі 12Х18Н10Т і сталі 40Х, розміром 10х10х10 мм, розташовували в центрі циліндричної металевої ємкості діаметром 60 мм і висотою 50 мм на висоті 10 мм до днища (рис. 3) і використовували в якості катода (-). В ємність, яка була приєднана до вібратору (рис. 4) установки електроіскрового легування моделі «Елітрон-52А» засипали порошок графіту і вона виступала в якості анода (+).



Рис. 3. Розташування зразка в металевій ємності.

Результати досліджень

Результати досліджень поверхневих шарів, сформованих в результаті ЦЕІЛ, хромонікелевої нержавіючої сталі аустенітного класу марки 12Х18Н10Т та сталі 40Х наведені в таблиці.

При включенні установки поступово збільшували ре-

жим (енергію розряду), починаючи з 0,01 Дж. Частинки графіту, в відмінності від компактного електроду-інструменту з графіту, не забезпечують гарантованого проходження електричного імпульсу між катодом і анодом. При цьому завдяки дії вібратору розташування часток порошку графіту постійно змінюється. При плавному збільшенні енергії розряду настає такий момент, що ланцюг для проходження електричного струму нарешті замикається і відбувається пробій проміжку між електродами (анодом і катодом), який з'являється як би каталізатором початку процесу ЦЕІЛ. Підвищення температури в зоні «пробою» іскри, початок горіння, поява газу усе це стимулює хаотичне замикання і розмикання ланцюжка між електродами тобто короткочасний процес ЦЕІЛ який постійно стимулюється дією вібратору. Процес повністю припиняється, коли вигорає весь порошок графіту. При цьому значна його частина залишається на поверхні зразка.

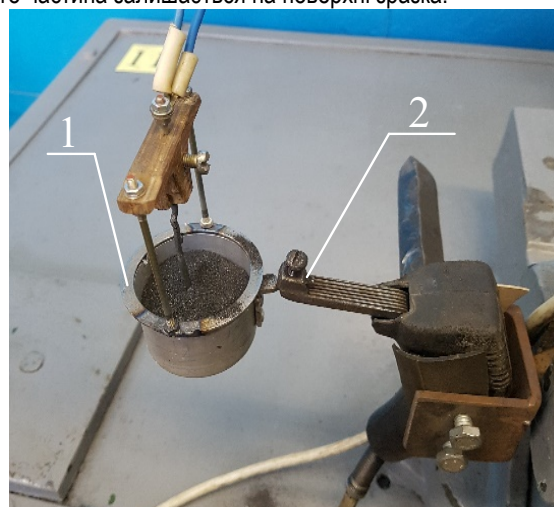


Рис. 4. Новий спосіб ЦЕІЛ:

1 - ємність з порошком графіту; 2 - вібратор

В нашому випадку при енергії розряду $W_p=0,6$ Дж відбувся «пробій» електродного проміжку між анодом і катодом, який був заповнений порошком графіту. Процес ЦЕІЛ протікав ~20 с.

Таблиця – Залежність параметрів якості сталевих поверхонь при традиційному і пропонованому способі цементації методом ЕІЛ

| Марка сталі | Енергія розряду, (W_p), Дж | Продуктивність, см ² /хв | Глибина шару, мкм | Мікротвердість на поверхні, HV | Шорсткість, Ra, мкм |
|---|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|---------------------|
| Традиційний спосіб цементації ЕІЛ (патент № 82948)[6] | | | | | |
| 12Х18Н10Т | 0,6 | 1 | 30 | 950 | 0,8-0,9 |
| | 1,4 | | 71 | 900 | 1,0-1,8 |
| | 2,8 | | 96 | 840 | 5,1-6,7 |
| | 3,4 | | 101 | 870 | 8,3-9,0 |
| | 6,8 | | 115 | 900 | 11,0-14,2 |
| Пропонований спосіб цементації ЕІЛ | | | | | |
| 12Х18Н10Т | 0,6 | 0,056 | 20 | 750 | 0,5-0,6 |
| | 1,4 | 0,51 | 40 | 730 | 0,5-0,6 |
| | 2,8 | 0,044 | 60 | 750 | 0,6-0,7 |
| | 3,4 | 0,040 | 70 | 700 | 0,7-0,8 |
| | 4,3 | 0,032 | 90 | 710 | 0,8-0,9 |
| | 6,8 | 0,028 | 80 | 670 | 0,9-1,2 |
| 40Х | 2,8 | 0,044 | 150 | 960 | 0,6-0,7 |

По мірі зростання енергії розряду зменшувався час протікання процесу ЦЕІЛ і при $W_p = 6,8$ Дж складав вже 10с. Враховуючи всю площу поверхні зразка, яка складає 6 см^2 продуктивність процесу ЦЕІЛ склала $0,028 \text{ хв./см}^2$ (див таблицю).

Висновки:

1. Запропонований новий спосіб ЦЕІЛ, який значно з $1,0-5,0 \text{ хв./см}^2$ до $0,028 - 0,056 \text{ хв./см}^2$ збільшує продуктивність процесу і з $0,9-14,0$ до $0,5-1,1 \text{ мкм}$, зменшує шорсткість

(Ra) сформованого поверхневого шару. При цьому товщина сформованих шарів може досягати $0,15 \text{ мм}$, мікротвердість HV до 960 при суцільності 100%.

2. Вибір граничних значень енергії імпульсів для легування вуглецем обумовлено природою взаємодії з твердими металами, що деформуються. Нижня границя енергії обмежується ефективністю способу. Збільшення енергії імпульсу вище верхньої границі при ЕІЛ порошком графіту не сприяє підвищенню якості поверхневого шару деталі.

Список використаної літератури.

1. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение. - М.: Машиностроение, 1990. - 528 с.
2. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность). - М.: «Издательство МСХА», 2001. - 616 с.
3. <https://industrialmetallurgy.com/what-is-carburizing-and-its-types/>
4. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревутский В.М. / Кишинев: Штинца, 1985. - 196с.
5. Тарельник В.Б., Белоус А.В. Технология упрочнения поверхностей деталей машин методом электроэрозивной цементации // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2008. - №4. – С. 27-31.
6. Патент України на винахід № 82948, 23С 8/00. Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням/В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник, А.В. Белоус / Опубл. 25.03.2008, бюл. № 10.
7. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, G. V. Kirik, Ye. V. Konoplianchenko, N. V. Tarel'nyk, and M. O. Mikulina, Cementation of Steel Details by Electrospark Alloying, Metallofiz. Noveishie Tekhnol., 42, No. 5: 655–667 (2020) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.42.05.0655.
8. V. Tarel'nyk, O. Gaponova, V. Martsynkovskyy, Ie. Konoplianchenko, V. Melnyk, V. Vlasovets, A. Sarzhanov, N. Tarel'nyk, DuXin, Yu. Semirnenko, S. Semirnenko, T. Voloshko, O. Semernya, "Energy Dispersive X-Ray Microanalysis of Part Surface Layer Carburized by Electric Spark Alloying," 2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP), Sumy, Ukraine, 2020, pp. 01TFC13-1-01TFC13-9. (Added to IEEE Xplore: 06 January 2021) <https://doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309618>.
9. W. Wood, B. Adam, J. Kadali, R. Talla, and T. Langston, "Heat-Affected Zone Formation in Electrospark-Deposition Additive Manufacturing on Ultrahigh-Strength Steel," Materials Performance and Characterization 6, no. 3 (2017): 376-393. <https://doi.org/10.1520/MPC20160038>
10. Shevchenko, O.I. Ultrasound effect on electrospark cementation process (2020) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 966 (1), art. no. 012071. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012071>
11. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.15.1.019>

Konoplianchenko Ie. V., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

High-performance method of cementation of steel parts by electro spark alloying method

The article presents a new method of cementing steel parts by electrospark alloying (EIL), which allows to increase the productivity of the cementation process and the wear resistance of its surface layer. The method differs in that graphite powder is used as the anode material, and the cathode is a part made of low-carbon or medium-carbon alloy steel. Alloying with graphite powder is carried out with a capacity of $0.028-0.056 \text{ min/cm}^2$, with variations in discharge energy in the range of $0.6-4.3 \text{ J}$. When used as a cathode material steel 12X18H10T formed a surface layer of high hardness with a thickness of $4-5$ to $100-150 \text{ }\mu\text{m}$, and when alloying 40X steel with a capacity of $0.044 \text{ minutes/cm}^2$ and a discharge energy of 2.8 J , the surface layer of high hardness has a thickness of more than 0.15 mm . The surface roughness (Ra) corresponds to $0.6-0.7 \text{ }\mu\text{m}$.

Key words: electrospark alloying; productivity; graphite powder; steel; layer thickness; roughness.

Дата надходження до редакції: 29.04.2021

**ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПОСІВНИХ КОМПЛЕКСІВ ВІТЧИЗНЯНОГО ВИРОБНИЦТВА
МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ (за інженерно-технічними критеріями)**

Саржанов Олександр Анатолійович

кандидат технічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-3973-0185
e-mail: alexsar@i.ua

Барабаш Григорій Іванович

кандидат технічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-1075-479X
e-mail: grinya45@ukr.net

Саржанов Богдан Олександрович

асистент
Сумський національний аграрний університет
ORCID ID: 0000-0001-9796-9499
e-mail: arhimag0@gmail.com

Традиційно техніко-експлуатаційні показники використання машинних агрегатів в рослинництві визначаються, виходячи з того, що за довідковими даними по питомому опору робочих органів машин які експлуатуються в певних ґрунтово-кліматичних умовах, та відомими тяговими зусиллями тракторів вибирають необхідну передачу, завантажуючи таким чином двигун трактора до оптимального значення, але в межах певного діапазону агротехнічно допустимих швидкостей [1,2,4]. Але на даний момент ситуація помінялась. Інформація що до згаданих показників відсутня через те, що офіційно лабораторно-польові дослідження або не проводяться або інформація про це відсутня.

В запропонованій статті наведені методичні підходи по визначенню основних техніко-експлуатаційних показників використання нових посівних комплексів вітчизняного виробництва, по яких ще відсутня в літературних джерелах інформація що до ефективності їх роботи в певних виробничих умовах; наведені конкретні значення режимів роботи, продуктивності, витратах палива цих машин.

Ключові слова: сімба, посівні комплекси, методика, потужність, швидкість руху, продуктивність, витрата палива, рівень використання.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.5>

Постановка проблеми.

Технологічні процеси по обробі ґрунту та сівби є основними складовими частинами зональних науково обґрунтованих систем землеробства. Особливо важливе значення це набуває в сучасних умовах, коли істотно ускладнилось ресурсне забезпечення аграрних підприємств [3].

Щоб вийти з такого положення пропонується дещо інший шлях: довіритись виробникам машин, які стверджують, що для ефективного використання сільськогосподарської машини потрібен трактор певної потужності, як це наприклад: для використання посівного комплексу Сіріус – 10 необхідно мати трактор з потужністю двигуна 300 к.с. (220 кВт). Найбільше для цієї ролі підходить трактор Беларусь МТЗ – 3022 ДЦ-1. Потужність його двигуна – 222 кВт. Умовно його можна віднести до 5 класу тяги. Він може агрегатувати посівний комплекс в діапазоні швидкостей 8 – 10 км/год., при якій забезпечується найбільш якісна робота посівного комплексу. Але для визначення показників використання машини потрібно знати конкретну передачу, на якій забезпечується робоча швидкість в межах зазначеного діапазону.

Маючи це на увазі можна аналітичним шляхом визначити питомий та загальний опір робочих органів посівного комплексу, а в подальшому і завантаженість двигуна.

Аналіз результатів останніх досліджень. Аналітичні дослідження стосовно оцінки ефективності роботи посівних комплексів і їх порівняльної оцінки в умовах Лісостепу Сумської області не проводились.

Формулювання цілей статті та мета досліджень. Вони полягають в тому, щоб надати методичні підходи по визначенню техніко-експлуатаційних та енергетичних показників використання посівних комплексів, що дасть можливість в подальшому обґрунтувати вибір одного із альтернативних агрегатів по необхідних критеріях.

Обґрунтування робочої швидкості

Загальний опір посівного комплексу в складі машинного агрегату, R_M (кН):

$$R_M = k \cdot B_K + G_M \left(f + \frac{i}{100} \right), \quad (1)$$

де k – фактичний питомий опір робочих органів, кН/м;

B_K – конструкційна ширина захвату, м;

G_M – експлуатаційна вага посівного комплексу, кН;

f – коефіцієнт опору коченню;

i – схил місцевості в умовах використання, %.

Фактичний питомий опір робочих органів k залежить від швидкості руху машинного агрегату V_p :

$$k = k_0 \left[1 + \frac{\Delta k}{100} (V_p - V_0) \right]. \quad (2)$$

де k_0 – початковий питомий опір робочих органів при швидкості руху агрегата до $V_0 = 5$ км/год. ;

Δk – темп приростання питомого опору при збільшенні швидкості руху агрегата на 1 км/год, % ($\Delta k = 1 \dots 3$).

У посівних комплексах початковий питомий опір слід розглядати як суму питомих опорів різних робочих органів, що входять до складу комплексу. (таблиця 1).

Таблиця 1. Питомий опір робочих органів

| Технологічні операції | Питомий опір, кН/м |
|---|--------------------|
| Луцнення дисковими знаряддями | 2,0 |
| Борони дискові | |
| - дискування парів і зябу | 1,4...1,6 |
| - луцнення стерні | 3...6 |
| Суцільна культивация парові при глибині обробітку | |
| - 6...8 см | 1,2...2,6 |
| - 10...12 см | 1,6...3,0 |
| Дискові сошники сівалки | 1,0...1,8 |
| Коткування кільчато - шпоровими котками | 0,5...1,0 |

Конструкційна ширина захвата посівного комплексу наведена в його технічній характеристиці.

Вага комплексу G_m (кН) визначається за формулою:

$$G_m = \frac{(m_m + m_d + m_n) \cdot g}{1000}, \quad (3)$$

де m_m – конструкційна маса комплексу, кг;

m_d – маса добрив у бункері, кг;

m_n – маса насіння у бункері, кг;

g – прискорення вільного падіння, м/с². $g=9,81$ м/с².

Конструкційна маса комплексу наведена в його технічній характеристиці.

Маса зерна та добрив визначається за формулою:

$$m = V_b \cdot \gamma, \quad (4)$$

де V_b – об'єм бункера, м³;

γ_n – об'ємна маса матеріалу (насіння, добрив), кг/м³.

Розміри бункерів наведені в технічній характеристиці.

Питома об'ємна маса, кг/м³:

| | |
|--------------------------|-----------------------|
| -пшениця _____ 850; | -жито _____ 800; |
| -ячмінь _____ 750; | -овес _____ 550; |
| -просо _____ 900; | -гречка _____ 700; |
| -горох _____ 900; | -кукурудза _____ 900; |
| -соняшник _____ 400; | -сечовина _____ 1140; |
| -суперфосфат _____ 1000. | |

$$V_p = V_T \left(1 - \frac{\delta}{100} \right), \quad (5)$$

де V_T – теоретична швидкість руху агрегата на вибраній передачі, км/год.

δ – буксування рушіїв трактора: гусеничного 2...5%; колісного: 4×4 – 10...12%; 4×2 – 14...16%.

Передача трактора вибирається з такого розрахунку, щоб робоча швидкість вписувалась в діапазон швидкості, наведений в технічній характеристиці комплексу (здебільшого $V_p = 10 \dots 12$ км/год).

Втрати потужності двигуна трактора (енергетичного засобу) на виконання технологічного процесу, N_e , (кВт):

$$N_e = N_{mp} + N_f + N_\delta + N_\alpha + N_M + N_{ВВП}, \quad (6)$$

де N_{mp} – втрата потужності в трансмісії, кВт;

N_f – втрата потужності на перекочування трактора, кВт;

N_δ – втрата потужності на буксування рушіїв трактора, кВт;

N_α – втрата потужності на подолання підйому, кВт;

N_M – втрата потужності на подолання опору робочої машини, кВт;

$N_{ВВП}$ – втрата потужності на привід робочих органів машини від валу відбору потужності (ВВП), кВт.

Втрата потужності в трансмісії, кВт:

$$N_{mp} = N_{en} \cdot (1 - \eta_{mp}), \quad (7)$$

де N_{en} – номінальна ефективна потужність двигуна трактора, кВт (наводиться в технічній характеристиці трактора, прийнятого до розрахунків);

η_{mp} – ККД трансмісії трактора:

Для колісного трактора $\eta_{mp} = 0,89 \dots 0,92$.

Втрата потужності на перекочування трактора, кВт

$$N_f = \frac{G_{mp} \cdot f \cdot V_p}{3,6}, \quad (8)$$

де G_{mp} – вага трактора, кН;

$$G_{mp} = \frac{m_{mp} \cdot g}{1000}, \quad (9)$$

де m_{mp} – маса трактора, кг (наводиться в технічній характеристиці трактора).

Втрата потужності на буксування рушіїв трактора, кВт

$$N_\delta = \frac{R_M \cdot (V_T - V_p)}{3,6}, \quad (10)$$

Втрата потужності на подолання підйому трактора, кВт

$$N_\alpha = \frac{G_{mp} \cdot i \cdot V_p}{360}, \quad (11)$$

Втрата потужності на подолання опору посівного комплексу, кВт

$$N_M = \frac{R_M \cdot V_p}{3,6}, \quad (12)$$

Втрата потужності на привід робочих органів машин від ВВП, кВт

Потужність $N_{ВВП}$, яка витрачається на привід активних робочих органів машин в дію:

$$N_{ВВП} = N_{пит} \times V_k \quad (13)$$

де $N_{\text{пит}}$ – питома потужність приводу ВВП, кВт/м.
 $N_{\text{пит}}=1,5...1,8$ кВт/м.

Коефіцієнт завантаження двигуна по потужності при виконанні технологічного процесу, ζ_p :

$$\zeta_p = N_e / N_{\text{ен}} \quad (14)$$

Оптимальна величина завантаження дизельних двигунів в залежності від енергомічткості процесу знаходиться в межах $\zeta_p = 0,70...0,85$.

Визначення техніко-експлуатаційних показників використан ня посівних комплексів.

Продуктивність за 1 год. змінного часу, $\omega_{\text{зм}}$, га/год.:

$$\omega_{\text{зм}} = 0,1 \cdot B_p \cdot V_p \cdot \tau, \quad (15)$$

де τ – коефіцієнт використання часу зміни:

Робоча ширина захвату B_p для посівних комплексів $B_p=B_k$.

$$\tau = \frac{T_p}{T_{\text{зм}}}, \quad (16)$$

де T_p – час чистої (основної) роботи за зміну, год.;

$T_{\text{зм}}$ – тривалість зміни, год. При виконанні сівби $T_{\text{зм}}=7$ год.

Кількість циклів за зміну, $n_{\text{ц}}$:

$$n_{\text{ц}} = \frac{T_{\text{зм}} - \sum T_{\text{нц}}}{t_{\text{ц}}}, \quad (17)$$

де $\sum T_{\text{нц}}=0,42$ год. – сума позациклових простоїв за зміну, що включає підготовчо – заключний час, час на виконання технічного і технологічного обслуговування агрегатів, час на власні потреби (задається нормативно);

$t_{\text{ц}}$ – тривалість циклу, год.;

Тривалість циклу дорівнює:

$$t_{\text{ц}} = t_p + t_x + t_{\text{оч}} + t_{\text{зав}}, \quad (18)$$

де t_p – тривалість чистої роботи за один цикл, год.;

t_x – тривалість холостого повороту, год.;

$t_{\text{оч}}$ – тривалість очікування, год.;

$t_{\text{зав}}$ – тривалість завантаження насінням та добривами, год.

$$t_p = \frac{L_p}{V_p} \quad (19)$$

де L_p – довжина поля, км.

$$t_x = \frac{L_x}{V_x}, \quad (20)$$

де L_x – довжина холостого повороту, км.

V_x – швидкість руху на поворотах, км/год. $V_x=5...7$ км/год.

Чистий час роботи агрегату за зміну, T_p (год.):

$$T_p = t_p \cdot n_{\text{ц}}, \quad (21)$$

Час поворотів за зміну, T_x (год.):

$$T_x = t_x \cdot n_{\text{ц}}, \quad (22)$$

$$L_x = 7,8B_k, \quad (23)$$

Тривалість очікування дорівнює тривалості під'їзду та від'їзду завантажувача і можна прийняти $t_{\text{оч}}=3...4$ хв. = $=0,05...0,07$ год.

Час завантаження (розвантаження) технологічних місткостей за зміну, $t_{\text{зав}}$, год.:

$$T_{\text{зав}} = t_{\text{зав}} \cdot n_{\text{ц}}, \quad (24)$$

Тривалість одного завантаження залежить від місткості бункера посівного комплексу та продуктивності завантажувача:

$$t_{\text{зав}} = V_6 / w_3. \quad (25)$$

де V_6 – об'єм бункера, м³;

w_3 – продуктивність завантажувача, м³/год.

Значення V_6 , w_3 наведені в технічній характеристиці відповідних машин.

Продуктивність завантажувача: для ЗС – 30 $w_3 = 30$ т/год. (8,3 кг/с.)

Змінна продуктивність МА,

$$W_{\text{зм}} = \omega_{\text{зм}} \cdot T_{\text{зм}}. \quad (26)$$

Витрата палива на одиницю площі, $G_{\text{за}}$ (кг/га):

$$G_{\text{за}} = \frac{G_p T_p + G_X T_X + G_{\text{неп}} T_{\text{неп}}}{\omega_{\text{зм}} \cdot T_{\text{зм}}}, \quad (27)$$

де $G_p, G_X, G_{\text{неп}}$ – годинна витрата палива, відповідно,

при виконанні технологічного процесу, на поворотах, переїздах, кг/год.;

$T_p, T_X, T_{\text{неп}}$ – тривалість, відповідно, чистого часу

зміни, поворотів, год.

$$G_p = \frac{g \cdot N_{\text{ен}} \cdot \xi_p}{1000}, \quad (28)$$

$$G_x = \frac{0,4 \cdot g \cdot N_{\text{ен}}}{1000}, \quad (29)$$

$$G_{\text{неп}} = \frac{0,3 \cdot g \cdot N_{\text{ен}}}{1000}, \quad (30)$$

$$T_{\text{неп}} = \frac{L}{V_{\text{неп}}}, \quad (31)$$

де L – довжина (ширина) поля, км.

$V_{\text{неп}}$ – швидкість руху на переїздах, км/год.

Необхідна кількість агрегатів.

Кількість сівальних агрегатів $n_{\text{агр}}$, необхідних для своєчасного виконання технологічних операцій, можна визначити за формулою:

$$n_{АГР} = \frac{F}{D_P \cdot W_{зм} \cdot T_{зм} \cdot k_{зм}} \quad (32)$$

де F – обсяги посівних робіт, га;
 D_P – кількість робочих днів (агрострок);
 $k_{зм}$ – коефіцієнт змінності (кількість змін за робочий день).

**Результати математичного моделювання/
Вихідні дані**

Культура - озима пшениця.

Технологічна операція – сівба з одночасним внесенням добрив.

Розміри поля: площа $F = 200$ га; довжина $L = 2000$ м; ширина $B = 1000$ м.

Схил місцевості $i = 4\%$.

Норма висіву насіння $Q_H = 200$ кг/га;

Доза внесення добрив $Q_D = 85$ кг/га.

Питомий опір $k_O = 2,5$ кН/м.

Об'ємна маса: насіння $\gamma_H = 800$ кг/м³; добрива $\gamma_D = 1000$ кг/м³.

Варіанти: Посівні комплекси:

I МТЗ -3022 ДЦ + Алкор – 7,5

II МТЗ -3022 ДЦ+ Алкор - 10

Загальний вигляд посівних комплексів наведений на рис.1; 2.

Порядок та результати розрахунків показників роботи посівних комплексів наведений в таблиці 2.



Рис.1. Загальний вигляд посівного комплексу Алкор 7,5



Рис.2. Загальний вигляд посівного комплексу Алкор 10

Таблиця 2. Показники використання посівних комплексів

| Показники | Один. ви- міру | Варіанти | |
|---|----------------------------|---------------------------|----------------------|
| | | МТЗ-3022 ДЦ + Алкор – 7,5 | МТЗ-3022ДЦ+ Алкор-10 |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1. Діапазон оптимальних швидкостей машинного агрегату при сівбі зернових | км/год. | 9-11 | |
| 2. Прийнятна робоча швидкість по передачах, V_p | км/год. | 9,2 | 9,2 |
| 3. Загальний опір посівного комплексу на вибраній передачі, R_m : | кН | 41,8 | 48,9 |
| 4. Потужність, що витрачається на подолання опору комплексу при виконанні технологічного процесу, N_m | кВт | 106,8 | 124,9 |
| 5. Коефіцієнт завантаженості двигуна при сівбі, ζ_p | | 0,75 | 0,84 |
| 6. Продуктивність за 1 год. основного часу, ω_o | га/год. | 6,7 | 9,0 |
| 7. Коефіцієнт використання часу зміни, | | 0,69 | 0,66 |
| 8. Продуктивність за 1 год. змінного часу, $\omega_{зм}$: | га/год. | 4,6 | 5,9 |
| 9. Змінна продуктивність, $W_{зм}$: – тривалість зміни | га год. | 32,2 7 | 41,3 7 |
| 10. Необхідна кількість посівних комплексів, n_a | штук | 1,0(1) | 0,81(1) |
| 19. Гектарна витрата палива, $G_{га}$ | кг/га | 8,2 | 7,2 |
| 20. Питомі затрати енергії, $З_e$: | $\frac{кВт \cdot год}{га}$ | 36,3 | 31,7 |
| 21. Рівень використання агрегатів | | 0,52 | 0,55 |

Висновок

З точки зору техніко-експлуатаційних показників більш раціональним посівним агрегатом можна вважати агрегат в складі Беларусь 3022-ДЦ + Алкор - 10. У нього вища

продуктивність (5,9 га/год. проти 4,6 га/год.), погектарна витрата менша на 2 кг/га палива, завантаженість двигуна цього ближче до нормативного.

Список використаної літератури.

1. Методика розробки операційної технології механізованих польових робіт / Г. І. Барабаш, В. М. Зубко, О. Г. Барабаш, Т. В. Хворост. – Суми: ТОВ "Друкарський дім "Папірус", 2016. – 130 с.
2. Експлуатація машинно-тракторного парку / Діденко М.К. 5-е вид., перероб. і доп..- К.: Вища школа. Головне видавництво, 1983.- 447 арк.
3. Оптимізація комплексів машин і структури машинного парку та планування технічного сервісу / [Мельник І.І., Гречко-сій В.Д., Марченко В.В., Михайлович Я.М., Мельник В.І., Надточій О.В.]; за ред. І. І. Мельника. – Київ: Видавничий центр НАУ, 2004. – 85 с.
4. Орманджи К.С., Барабаш Г.И. и другие. Правила производства механизированных работ в полеводстве. М., Россельхозиздат, 1983

Sarzhanov O.A., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Barabash G.I., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Sarzhanov B.O., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Justification of the choice of seed complexes of domestic production by the method of mathematical modeling (according to engineering and technical criteria)

Traditionally, technical and operational indicators of the use of machine units in crop production are determined based on the fact that according to reference data on the resistivity of the working bodies of machines operated in certain soil and climatic conditions, and known traction forces of tractors choose the required gear optimal value, but within a certain range of agronomically acceptable speeds [1,2,4]. But at the moment the situation has changed. There is no information on these indicators due to the fact that official laboratory field studies are either not conducted or there is no information about it.

The proposed article presents methodological approaches to determine the main technical and operational indicators of the use of new sowing complexes of domestic production, for which there is still no information in the literature on the effectiveness of their work in certain production conditions; specific values of operating modes, productivity, fuel consumption of these machines are given.

Key words: sowing, sowing complexes, technique, power, speed, productivity, fuel consumption, level of use.

Дата надходження до редакції: 30.04.2021

ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ КОЕФІЦІЄНТ КОРИСНОЇ ДІЇ ТУРБОНАСОСНОГО АГРЕГАТА ПЛАСТОВОЇ РІДИНИ

Горовий Сергій Олександрович

кандидат технічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-4136-5965
e-mail: gorovyj64@gmail.com ,
sergiy.gorovoy@snaeu.edu.ua

Головченко Галина Степанівна

старший викладач
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-3662-6163
e-mail: golgalstep@gmail.com

Потужні енергетичні машини з внутрішнім гідроприводом у вигляді багатоступінчатої турбіни та насосної частини з розвинутою системою автоматичного розвантаження вісьової сили – це турбонасосні агрегати пластової рідини. При цьому економічна доцільність їх використання потребує досягнення високого коефіцієнта корисної дії (к.к.д.), головна складова якого створюється максимально можливим зовнішнім об'ємним к.к.д. за рахунок проектування статично стійкої системи вісьового автоматичного розвантаження з мінімально можливими витоками робочої рідини. Транспортування рідини до місця споживання супроводжується втратами енергії рідини, які зумовлені як внутрішніми, так і зовнішніми чинниками цього процесу. Значну частину цих втрат складають зовнішні механічні втрати. Ці втрати пропорційні третьому ступеню частоти обертання ротора ТНА. Реальні значення частот обертання сягають десяти тисяч обертів на хвилину, тому зовнішні механічні втрати можуть сягати десятків кіловат. Свій енергетичний внесок в значення загального к.к.д. дає як насосна, так і турбінна частини агрегата. Розрахунок загального к.к.д. турбонасосного агрегата доцільно вести методом послідовних наближень з виконанням необхідної умови балансу потужностей турбінної та насосної частин з урахуванням зовнішніх втрат енергії.

Ключові слова: турбонасосний агрегат, відцентровий насос, ротор насоса, шпаринне ущільнення, виток рідини, тиск рідини, напор рідини, гідродинамічні сили.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnaeu.2021.2.6>

Постановка проблеми у загальному вигляді. Турбонасосні агрегати (ТНА) з гідравлічним приводом досить широко застосовуються в різних технологічних процесах, а саме там, де потрібні малі діаметральні габарити та можливість саморегулювання. При цьому в кожному випадку враховуються свої специфічні вимоги до конструктивних параметрів ТНА та на використання деяких матеріалів для робочих органів проточної частини агрегатів, незмінним залишається лише загальний фізичний підхід, коли обертальний момент, створюваний турбінним блоком ТНА, є приводним для насосної частини, яка виконує корисну роботу відповідну до місця застосування установки. Економічна доцільність використання ТНА потребує досягнення ним значного коефіцієнта корисної дії (к.к.д.).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. ТНА пластової рідини мають свої специфічні властивості, виходячи з умов експлуатації в гідравлічній мережі системи підтримання пластового тиску [1].

По перше, ці агрегати виконуються обмеженого зовнішнього діаметру, виходячи з внутрішніх розмірів обсадних труб водогазопровідної свердловини. По друге, вони повинні створювати значні гідравлічні напори для підняття рідини на поверхню та транспортування по мережі труб до накопичувального резервуара. Вказані особливості потребують створення багатоступінчатих ТНА з потужною системою гідравлічного автоматичного розвантаження значної вісьової сили в середині агрегата. Транспортування рідини до місця споживання су-

проводжується втратами енергії рідини, які зумовлені як внутрішніми, так і зовнішніми чинниками цього процесу. Значну частину цих втрат складають зовнішні механічні втрати. Методики визначення цих втрат докладно викладені в роботах [2, 3, 4]. Слід лише зауважити, що ці втрати пропорційні третьому ступеню частоти обертання ротора ТНА, отже, враховуючи вельми значні частоти обертання, а це п'ять – десять тисяч обертів на хвилину, можуть сягати десятків кіловат.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Турбонасосні агрегати (ТНА) пластової рідини з гідравлічним приводом внаслідок особливостей їх робочого процесу проектується як багатоступінчаті гідравлічні машини (до десяти насосних ступенів та до десяти – дванадцяти турбінних ступенів) з потужною системою автоматичного розвантаження значної (до десятків тисяч ньютонів) вісьової сили в середині самого агрегата. При цьому економічна доцільність їх використання потребує досягнення високого к.к.д., головна складова якого створюється максимально можливим зовнішнім об'ємним к.к.д. за рахунок проектування статично стійкої системи вісьового автоматичного розвантаження з мінімально можливими витоками робочої рідини. Розрахунок загального к.к.д. ТНА доцільно вести методом послідовних наближень з виконанням необхідної умови балансу потужностей турбінної та насосної частин з урахуванням зовнішніх втрат енергії.

Виклад основного матеріалу дослідження. Якщо умовно розділити всі витрати енергії в ТНА на внутрішні та

зовнішні, то загальний к.к.д. можна отримати у вигляді формули:

$$\eta_{ТНА} = \eta_{ТНА}^{внутр.} \cdot \eta_{ТНА}^{зовн.} \quad (1)$$

До внутрішніх втрат енергії потрібно віднести всі гідравлічні витрати в окремій ділянці насоса чи турбіни, при цьому к.к.д. однієї ділянці при умові використання швидкісного напору в наступній.

Зовнішні витрати енергії поділяються на гідравлічні, об'ємні та механічні.

Зовнішні гідравлічні - це втрати енергії (тиску) в підводі та у відводі насосної частини ТНА, підводі та у відводі турбінної частини, а також так звані втрати з вихідною швидкістю з останньої ділянці турбіни. Ці види витрат дуже залежать від геометричної конфігурації проточної частини ТНА, тому їх обчислюють для конкретної конфігурації агрегату. При значних тисках багатоступінчатих ТНА відносна доля цих втрат незначна, тому можна ними нехтувати.

Зовнішні об'ємні витрати враховують витоки рідини в насосній та турбінній частинах ТНА в місця з меншим тиском. Для агрегатів пластової рідини в насосній частині ці втрати практично відсутні, а в турбінній частині вони дуже суттєві, бо це є виток рідини через пристрій вісьового розвантаження; цей виток може сягати 10...20 % від загального витоку крізь гідравлічний тракт турбіни.

Зовнішні механічні втрати - це втрати потужності на тертя в підшипникових опорах та втрати на дискове тертя всіх внутрішніх частин ТНА, які обертаються в рідині, окрім робочих колес.

Оскільки головний внесок в склад витрат енергії в ТНА вносять зовнішні об'ємні витрати, які зумовлені витоком крізь дроселі пристрою авторозвантаження, котрий, в свою чергу, є наслідком дії невірноваженої вісьової сили, потрібно більш детально розглянути процес визначення вісьової сили.

Для ТНА пластової рідини обмеження за діаметральними габаритами не дають можливості застосувати в якості

автоматичного розвантажувального пристрою традиційну гідравлічну п'яту. В той же час величина вісьового зусилля, що діє на ротор ТНА в робочому діапазоні витоків-тисків, може сягати десятків тисяч ньютонів (тонн сили). Тому для ефективного розвантаження вісьової сили використовується „обернена” гідроп'ята, в якій циліндричний дросель виконаний на більшому діаметрі, ніж торцевий дросель пристрою авторозвантаження.

В насосній частині ТНА ця сила може бути досить точно визначена за методикою роботи [3]. Вісьова сила (Тн) має напрям в бік входу рідини в насосний агрегат.

В турбінній частині вісьова сила за напрямом співпадає з насосною; величина її може бути обчислена виходячи з припущення, що рідина перед робочим колесом вісьової турбіни рухається за законом: $\varrho_u \cdot r = const$, тобто зі сталим моментом тангенціальної складової швидкості, а також зі сталою складовою швидкості $\varrho_z = const$, якою зумовлюється загальний виток робочої рідини крізь турбіну. Нехтуючи статичним розподілом тисків, маємо:

$$\frac{P}{\rho q} + \frac{\varrho^2}{2q} = \frac{P_c}{\rho q} + \frac{\varrho_0^2}{2q}, \quad (2)$$

де: P та ϱ - тиск та швидкість на довільному радіусі;

P_c та ϱ_c - тиск та швидкість на середньому радіусі турбінної ступені.

Враховуючи з трикутника швидкостей, що: $\varrho^2 = \varrho_z^2 + \varrho_u^2$ та $\varrho_z = const$, отримуємо вираз для тиску:

$$P = P_c + \frac{\rho}{2} \cdot \varrho_c^2 \cdot \left(1 - \frac{r_c^2}{r^2}\right), \quad (3)$$

Складова вісьової сили, що діє на тильний бік лопатевої решітки турбінного колеса обчислюється за формулою:

$$T_{T1} = \int_{r_k}^{r_n} P \cdot 2\pi r \cdot dr = \pi \cdot (r_n^2 - r_k^2) \cdot \left(P_c + \frac{\rho \varrho_c^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{2r_c^2 \cdot \ln\left(\frac{r_n}{r_k}\right)}{r_n^2 - r_k^2}\right) \right), \quad (4)$$

де r_k - радіус кореня лопатки турбоколеса;

r_n - радіус периферії турбоколеса.

Складова вісьової сили, яка діє на безлопатеий тильний бік турбінного колеса, може бути визначена з припущення, що рідина після ущільнення в зазорі між нерухомою частиною та ступицею колеса обертається за законом твердого тіла з кутовою швидкістю $u_p = \frac{u}{2}$.

В цьому випадку маємо параболічний закон розподілу тиску по радіусу [3].

$$P_D = P_k - \frac{\rho \cdot u^2}{8} \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{r_k}\right)^2\right], \quad (5)$$

де „ k ” - індекс змінного радіуса.

Вісьова сила, зумовлена тиском P_D (дисковим тиском), обчислюється за формулою:

$$T_{T2} = \int_{r_{cm}}^{r_k} P_D \cdot 2\pi r \cdot dr = \pi \cdot (r_k^2 - r_{cm}^2) \cdot \left(P_k + \frac{\rho u^2}{8} \cdot \left(1 - \frac{r_k^2 - r_{cm}^2}{2r_k^2}\right) \right) \quad (6)$$

де P_k - обчислюється за формулою (3).

Вісьова сили від дії тиску на ступицю колеса турбіни обчислюється таким чином:

$$T_{T3} = P_{cm} \cdot \pi \cdot (r_{cm}^2 - r_{вала}^2), \quad (7)$$

де P_{cm} - перепад тиску на колесі турбіни;

$r_{\text{вала}}$ - радіус вала турбіни.

Загальна вісьова сила турбінної частини ТНА дорівнює:

$$T_T = (T_{T1} + T_{T2} + T_{T3}) \cdot Z, \quad (8)$$

де Z – кількість ступенів турбіни (коліс).

Загальна вісьова сила ТНА в цілому:

$$T = T_H + T_T \quad (9)$$

Ця вісьова сила врівноважується „оберненою” гідравлічною п'ятою за рахунок різниці тисків на торцеві кільцеві поверхні до - та після - циліндричного дроселя гідравлічної п'яти, а також на кільцеву поверхню змінного торцевого дроселя та в просторі за цим дроселем. Оскільки величина витоку крізь торцевий дросель зумовлює зовнішні об'ємні втрати, потрібно провести статичний розрахунок системи вісьового розвантажування ротора ТНА.

Статичний розрахунок зводиться до визначення статичної характеристики „оберненої” гідравлічної п'яти - залежності безрозмірного торцевого зазору u від величини вісьової сили T . Ця залежність знаходиться з умови вісьової врівноваженості ротора ТНА:

$$T = F, \quad (10)$$

$$F = F_1 P_1 - (0,5 F_3 + F_4) P_3 - (F_2 + 0,5 \cdot F_3) P_2, \quad (11)$$

де F – сумарна сила, яка діє на торцеві кільцеві поверхні „оберненої” гідравлічної п'яти;

F_1 - кільцева площа на вході в гідравлічну п'яту (між валом ТНА та зовнішнім діаметром гідравлічної п'яти);

F_2 - кільцева площа за циліндричним дроселем до торцевого дроселя;

F_3 - кільцева площа торцевого дроселя;

F_4 - кільцева площа за торцевим дроселем (між валом ТНА та нижнім діаметром гідроп'яти);

P_1, P_2, P_3 - тиски перед п'ятою, між дроселями п'яти та за п'ятою торцевого дроселя.

Методика побудови статичної характеристики прямої гідравлічної п'яти докладно викладена в роботі [3]. Принципова різниця для „оберненої” гідравлічної п'яти відсутня, лише потрібно враховувати, що напрям течії рідини в „оберненій” гідравлічній п'яті відбувається в торцевому дроселі від периферії до центру. Безрозмірний торцевий зазор u (відношення робочого зазору X до базової величини X_δ) може бути отриманий як складна функція декількох параметрів: вісьової сили, тисків до - та після п'яти, кільцевих площ п'яти та гідравлічних провідностей дроселів п'яти.

Рівняння балансу витоків крізь дроселі п'яти має вигляд:

$$q_1 \cdot (P_1 - P_2)^{0,5} = q_2 \cdot (P_2 - P_3)^{0,5}, \quad (12)$$

де q_1 та q_2 - провідності циліндричного та торцевого дроселів п'яти, які є параметрами геометричних розмірів дроселів та безрозмірного торцевого зазору.

Звідси отримуємо вираз для тиску P_2 між дроселями:

$$P_2 = \frac{q_1^2 \cdot P_1 + q_2^2 \cdot P_3}{q_1^2 + q_2^2} \quad (13)$$

Маючи вираз для провідності q_2 через базову провідність $q_{2\delta}$, а саме:

$$q_2 = q_{2\delta} \cdot u^{3/2}, \quad (14)$$

та вводячи коефіцієнт провідності:

$$\alpha_{21} = \frac{q_{2\delta}^2}{q_1^2}, \quad (15)$$

приводимо рівняння (13) до вигляду:

$$P_2 = \frac{P_1 + \alpha_{21} \cdot u^3 \cdot P_3}{1 + \alpha_{21} \cdot u^3} \quad (16)$$

Маємо співвідношення площ „оберненої” п'яти:

$$F_1 - F_2 - 0,5 F_3 = 0,5 F_3 + F_4 = F_m \quad (17)$$

Повертаємося до формули (13), з урахуванням виразів (16) та (17), отримуємо вираз:

$$F = (P_1 - P_3) \cdot \frac{(F_m + F_1 \cdot \alpha_{21} \cdot u^3)}{(1 + \alpha_{21} \cdot u^3)} \quad (18)$$

Після підстановки формули (18) в формулу (10) отримуємо вираз для безрозмірного зазору u як функції вісьової сили T :

$$u = \left[\frac{1}{\alpha_{12}} \cdot \frac{(T - F_m \cdot (P_1 - P_3))}{(F_1 \cdot (P_1 - P_3) - T)} \right]^{1/3} \quad (19)$$

Робочий діапазон системи автоматичного розвантаження зумовлюється вимогою: $u > 0$.

З формули (19) очевидно витікає висновок, що ця умова виконується, коли:

$$F_m \cdot (P_1 - P_3) < T < F_1 \cdot (P_1 - P_3) \quad (20)$$

Гідростатична жорсткість системи автоматичного розвантаження знаходиться таким чином:

$$\chi = \frac{\partial F}{\partial u} = 3 \cdot (P_1 - P_3) \cdot \alpha_{21} \cdot u^2 \cdot \frac{(F_1 - F_m)}{(1 + \alpha_{21} \cdot u^3)^2} > 0 \quad (21)$$

Додатне значення виразу (21) є свідченням статичної стійкості системи автоматичного розвантаження.

Різниця тисків ($P_1 - P_3$) для ТНА пластової рідини може бути обчислена як тиск, котрий спрацьовується на турбіні:

$$(P_1 - P_3) = \rho \cdot q \cdot H_m.$$

Зовнішній виток крізь „обернену” гідравлічну п'яту пропорційний квадратному кореню з перепаду тисків на гідравлічній п'яті:

$$g_m \sim \sqrt{(P_1 - P_3)}, \text{ або: } g_m \sim \sqrt{\rho q H_m}. \quad (22)$$

З урахуванням формули (16) маємо:

$$\varepsilon_m = q_1 \cdot \left(\frac{\alpha_{21} \cdot u^3 \cdot \rho q H_m}{1 + \alpha_{21} \cdot u^3} \right) \quad (23)$$

Тоді зовнішній об'ємний коефіцієнт корисної дії дорівнює:

$$\eta_{ТНА}^{зовн.} = 1 - \frac{\varepsilon_m}{Q_m}, \quad (24)$$

де Q_m - загальний виток рідини крізь турбіну.

Висновки з даного дослідження. Загальний коефіцієнт корисної дії ТНА може бути отриманий розрахунковим шляхом, як функція зовнішнього об'ємного коефіцієнта корисної дії. Розрахунок зовнішнього об'ємного коефіцієнта корисної дії базується на визначенні величини вісьової сили та зумовленим наявністю цієї сили виток рідини в системі автоматичного розвантаження. Система автоматичного розвантаження вісьових сил відповідає конструктивній схемі „оберненої” гідравлічної п'яти. Розрахунок загального коефіцієнта корисної дії доцільно вести шляхом послідовних наближень з використанням відомих характеристик робочих ступенів насосної та турбінної частин ТНА.

Список використаної літератури.

1. Євтушенко А.А. Сквжинная гидродинамическая установка для пластовых вод /М.И. Кравцов, И.Б. Твердохлеб - Труды 8-ой Международной научно-технической конференции. «Насосы - 96» - Т.1- Сумы: ИПП „Мрія” ЛТД, 1996. - с. 77 - 86.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. / Г. Шлихтинг - М.: ИИЛ, 1969.- 744 с.
3. Марцинковский В.А. Насосы атомных электростанций. / В.А. Марцинковский, П.Н. Ворона - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 256 с.
4. Марцинковский В. А. Вибрации роторов центробежных машин. В 2-ух книгах. / В.А. Марцинковский - Книга 1. Гидродинамика дросселирующих каналов. - Сумы: Изд-во СумДУ , 2002. - 337 с.

Gorovoy S.A., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Golovchenko G.S., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Physical processes determining the efficiency of the turbospass unit of layer liquid

Powerful energy machines with an internal hydraulic drive in the form of a multistage turbine and a pumping section with a developed system of automatic axial force unloading are turbo-pumping units of formation fluid. At the same time, the economic feasibility of their operation requires the achievement of a high efficiency factor (efficiency), the main component of which is created by the maximum possible external volumetric efficiency by designing a statically stable axial automatic unloading system with the lowest possible flow rate of the working fluid. The transportation of liquid to the place of consumption is accompanied by losses of energy of the liquid, which are caused by both internal and external factors of this process. External mechanical losses account for a significant part of these losses. These losses are proportional to the third power of the TNA rotor speed. Real values of rotation frequencies reach ten thousand revolutions per minute, therefore external mechanical losses can reach tens of kilowatts. Its energy contribution to the value of the overall efficiency gives both the pumping and turbine parts of the unit. Calculation of the overall efficiency It is advisable to carry out TNA by the method of successive approximations with the fulfillment of the necessary condition for the balance of the capacities of the turbine and pumping parts, taking into account external energy losses.

Keywords: turbo-pump unit, centrifugal pump, pump rotor, throat seal, fluid flow, fluid pressure, fluid pressure, hydrodynamic forces.

Дата надходження до редакції: 05.05.2021

Хурсенко Світлана Миколаївна

кандидат фізико-математичних наук, доцент

Сумський національний аграрний університет

ORCID: 0000-0001-6307-2042

e-mail: svitlana.khursenko@snau.edu.ua

У статті розглянуті основні фізичні засади прояву сил в різних сферах життя. Зроблено акцент на взаємодії фізики і техніки, наведені приклади прояву сил в техніці, побуті і житті. Стаття може знадобитися студентам фізичних та інженерних спеціальностей у вивченні додаткового матеріалу з фізики, і буде цікава широкому колу читачів, які цікавляться фізикою і технікою.

Ключові слова: сила, складання і розкладання сил, пара сил, рівнодійна сил, прості механізми.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.7>

Постановка проблеми. Сила є одним з фундаментальних понять механіки. Поняття сили виникло з життя, хоча між побутовим і фізичним поняттями сили є і схожість і відмінність. Слово «сила» в українській мові є багатозначним і нерідко використовується (сама чи в поєднаннях, в науці і повсякденних ситуаціях) в сенсах, відмінних від фізичного трактування терміна. Кажуть про силачів, про сильний удар по м'ячу на футбольному полі, про надзвичайну силу китів, про силу волі, про м'язову силу тощо. У найбільш звичному повсякденному вживанні сила – механічний вплив на що-небудь, без конкретизації. У фізиці сила – векторна величина, що є мірою впливу на дане тіло з боку інших тіл або полів. У механіці поняття сили є більш обмеженим, ніж у фізиці в цілому, де поряд з механічними поняттями сили широко використовуються й інші, наприклад сила струму, електричної сила, сила звуку, сила світла та ін. В механіці сила є кількісною мірою взаємодії тіл, причиною деформацій тіл і прискорень, що їм надаються.

Аналіз публікацій по темі дослідження. Суперечки навколо визначення сили не закінчений досі. Це обумовлено труднощами об'єднання в одному визначенні сил, різних за своєю природою і характером прояву. Загальноприйняте визначення сили відсутнє; в сучасних підручниках фізики сила зазвичай розглядається як причина прискорення [1-3]. Кінець ХХ століття охарактеризувався суперечками про те, чи потрібне взагалі в науці поняття сили і чи існують сили в принципі – чи це лише термін, введений для зручності. Одні науковці [4] аргументували, що сили по суті визначають причинно-наслідкові зв'язки і тому не можуть бути відкинуті. Натомість інші автори [5] заперечували це, оскільки в Стандартній моделі й інших фізичних теоріях сила трактується лише як обмін моментом імпульсу, поняття сили тому зводиться до більш простої «взаємодії» між частинками. Ця взаємодія описується в термінах обміну додатковими частинками (фотонами, глюонами, бозонами і, можливо, гравітонами). До того ж у роботі [6] зазначається, що принцип еквівалентності Ейнштейна по суті знищує поняття сили, в загальній теорії відносності зовнішні сили (F з рівняння $F = ma$) відсутні.

Мета даної роботи, таким чином, полягає в узгодженні між поняттям сили, що вивчається студентами в курсі загальної фізики, та сучасною технікою, що має сприяти кращому розумінню наукових ідей, що лежать в основі і принципів роботи технічних пристроїв.

Виклад основного змісту дослідження. Сила – фізична величина, що характеризує взаємодію тіл, в результаті

якої вони або змінюють напрямок руху, або величину швидкості, або деформуються [7]. На практиці найчастіше спостерігається прояв всіх трьох сутностей. У техніці сили є рушійними, які здійснюють роботу. Джерелом сили, як правило, є деякий технічний пристрій – двигун. Для здійснення роботи цю силу необхідно перетворювати, змінювати її напрямок, розкладати на складові або складати з іншими силами. Додавання і розкладання сил проводиться за правилом паралелограма сил, згідно з яким рівнодійна двох сил, що діють на тіло під кутом одна до одної, зображується діагоналлю паралелограма, побудованого на векторах, що зображують сили. І навпаки, щоб розкласти силу за двома напрямками, треба через кінець вектора сили провести лінії, паралельні цим напрямкам.

Наприклад, при розкладанні сили в 1 Н за двома напрямками, розташованим під однаковими кутами α до напрямку сили (рис. 1), замість однієї сили отримаємо дві.

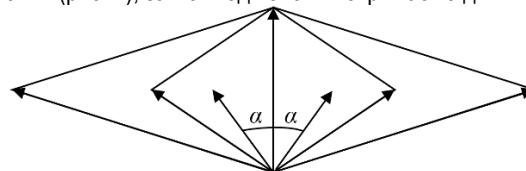


Рис. 1. Приклад розкладання сили в 1 Н на більші за величиною сили

Як видно з рисунка, при збільшенні кута α сила в 1 Н перетворюється на дві все більші й більші сили. У граничному випадку ($\alpha = 90^\circ$) сила в 1 Н розкладається на дві нескінченно великі сили. Таким чином, з однієї сили в 1 Н можна зробити дві сили по 10 Н, по 100 Н, і взагалі дві будь-які за величиною сили; для цього необхідно лише відповідним чином вибрати кут α . Іншими словами, теоретично з будь-якої як завгодно малої за величиною сили можна зробити дві як завгодно великі сили.

Чи так це насправді, допоможе розібратися наступний приклад [8]. Розглянемо світлофор масою 15 кг підвішений в точці B до середини троса ABC (довжина троса 20 м), прикріпленого кінцями до стовпів у точках A і C , які знаходяться на одній горизонталі (рис. 2). Відхилення точки підвісу світлофора від горизонталі BK становить 0,1 м. Нехтуючи вагою троса визначимо його натяг. Оскільки під дією ваги світлофора \vec{P} трос розтягується, можна побудувати паралелограм сил. Легко здогадатися, що заштриховані трикутники на рис. 2 подібні. З подібності трикутників випливає, що натяг

троса $T = 750$ Н, що в 50 разів більше ваги самого світлофора. Зрозуміло, що, чим меншим буде провис BK , тим більшим буде натяг троса. Отже жоден трос, дріт, мотузку не можна натягнути строго горизонтально – завжди буде деякий провис. Навіть якщо на тросі нічого не висить, він має власну вагу, яку можна вважати прикладеною посередині. Для того, щоб трос зайняв строго горизонтальне положення, потрібно докласти нескінченно великі сили. Навіть якщо такі сили були доступні, жоден трос не витримував би нескінченно великого натягу – він розірвався би перш, ніж став горизонтальним.

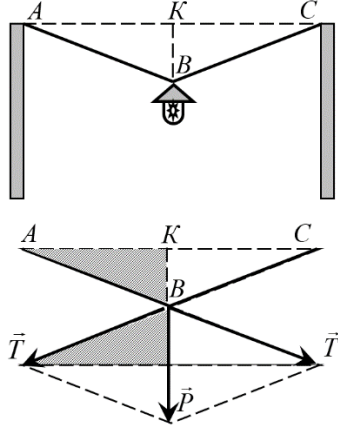


Рис. 2. Сила натягу троса \vec{T} набагато більша ваги світлофора \vec{P}

Неможливість натягнути дріт строго горизонтально – шкідливе явище. Наприклад, при будівництві високовольтної лінії для передачі електроенергії на великі відстані економічно і енергозатратно вигідніше поставити якомога менше опор. Однак, при збільшенні відстані між опорами збільшується провис проводів, при цьому зростає ймовірність їх схлестування під дією вітру, що може привести до аварії. Або ж, наприклад, використовуючи паралелограм сил можна одразу побачити, що нижню частину стріли підйомного крана треба кріпити на упор, а верхню – на виривання (рис. 3).

У разі, коли на тіло діють дві паралельні (рис. 4, а) або антипаралельні (рис. 4, б) сили \vec{P} і \vec{Q} , рівнодійна сила \vec{R} дорівнює їх сумі (у разі двох паралельних сил) або різниці (коли сили антипаралельні), а точка прикладання рівнодійної ділить відстань між лініями дії сил \vec{P} і \vec{Q} у відношенні $P:a = Q:b = R:l$ ($l = a + b$). При зменшенні сили \vec{P} (або, навпаки, збільшенні сили \vec{Q}) рівнодійна зменшується, оскільки $\vec{R} = \vec{P} - \vec{Q}$, а точка її прикладання відсувається все далі і далі від сил \vec{P} і \vec{Q} . Дотримуючись математичної логіки, у граничному випадку ($\vec{P} = \vec{Q}$) значення рівнодійної сили наближається до нуля, а точка її прикладання зміщується у нескінченність.

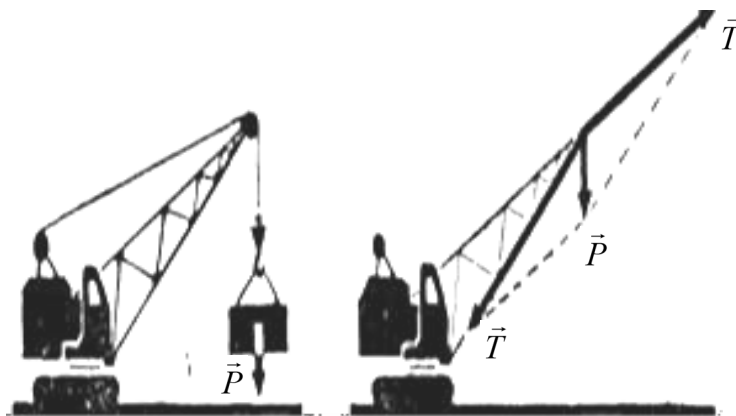


Рис. 3. Визначення діючих на стрілу підйомного крана сил

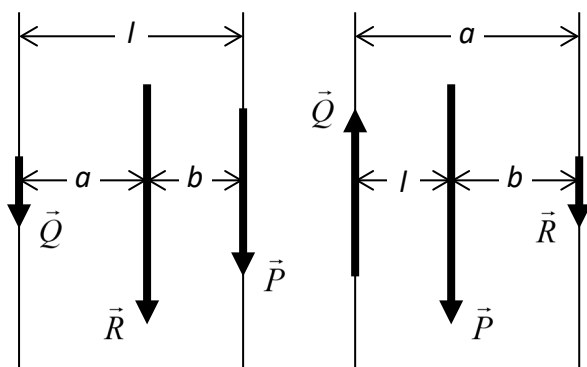


Рис. 4. Паралельні і антипаралельні сили

Фізично це означає, що коли на тіло діють дві рівні антипаралельні сили, прикладені до різних точок тіла (такі сили

називаються парою), тіло обертається. Наприклад, закручуючи гайку, угвинчуючи або вигвинчуючи шуруп, ми докладаємо пару сил (рис. 5). У випадку двох нерівних антипаралельних сил, їх можна звести до однієї – рівнодійної сили, під дією якої тіло буде переміщатися, рухатися. Як тільки сили \vec{P} і \vec{Q} вирівнюються, рівнодійна зникає, утворюється пара сил, яка буде обертати тіло. Таким чином, граничний перехід від двох антипаралельних сил до пари сил – це перехід від переміщення до обертання, від одного виду механічного руху до іншого.

Дія пари сил на тіло вимірюється моментом \vec{M} , який визначається добутком однієї з сил \vec{P} , що утворюють пару, на плече l (відстань між лініями дії сил): $M = P \cdot l$. Пара сил обертає тіло (плоску однорідну фігуру) навколо його центра ваги, для визначення розташування якого зазвичай підвішують фігуру послідовно за дві різні точки і проводять через точки підвісу вертикальні лінії: їх перетин співпадає з центром ваги.

Якщо плоска фігура може бути представлена як сума або різниця найпростіших геометричних фігур, – трикутників, прямокутників тощо, – центр ваги такої фігури можна легко обчислити математично за допомогою так званого методу площ.

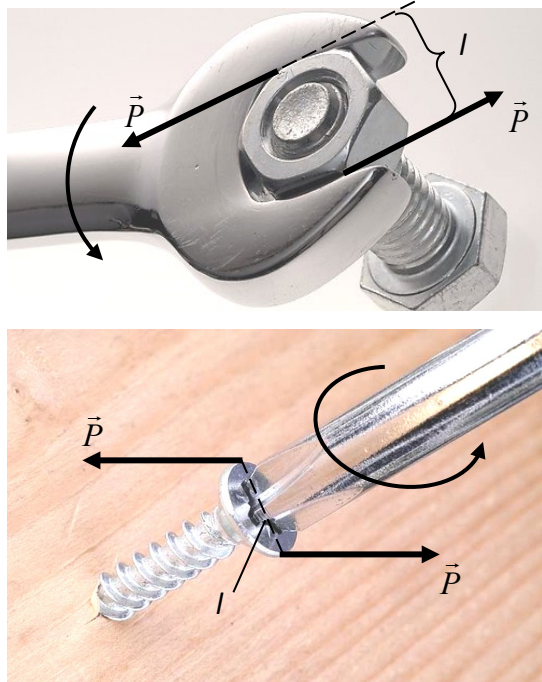


Рис. 5. Приклади дії пари сил

Наведені вище приклади показані для сил, розташованих в одній площині. Реально, в житті, науці й техніці частіше необхідно мати справу з силами, розташованими в просторі. На прикладі складання просторово-розподілених сил (рис. 6.) видно, що завдання зводиться до зведення будь-якої пари сил до однієї площини і знаходження їх рівнодійної.

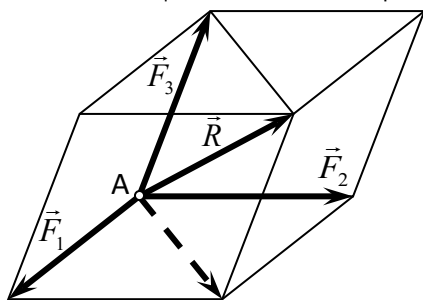


Рис. 6. Знаходження рівнодійної \vec{R} трьох сил \vec{F}_1 , \vec{F}_2 і \vec{F}_3 , розподілених в просторі

Для збільшення сили або зміни її напрямку в техніці використовують механізми, які полегшують людям роботу [9-10]. До механізмів прикладається сила, яку вони передають тілам, переміщаючи їх і виконуючи роботу. Прийнято виділяти вісім найпростіших механізмів, з яких чотири є різновидом двох основних:

Похила площина – простий механізм у вигляді площини, встановленої під гострим кутом до горизонтальної поверхні. Різновид похилій площині – *клин* – дозволяє збіль-

шити тиск за рахунок концентрації сили на малій площі. Використовується у списі, лопаті, кулі тощо. Інший різновид похилій площині – *звинт* – використовується в шурупах і для підйому води (Архімедів винт), у якості свердла в дрилі та ін.

Важіль – описаний Архімедом – використовується, зокрема, для підйому важких предметів, у якості вимикачів і спускових гачків (шатун-кривошип – використовується в ткацькому верстаті, паровій машині, двигунах внутрішнього згоряння). Різновид важеля – *воріт* – використовується для підйому води в колодязях і для пасової передачі та ін.

Блок – колесо з жолобом, вздовж якого пропускають мотузку, трос або ланцюг. Застосовується для зміни величини або напрямку сили.

Колесо – використовується на транспорті та в зубчастих передачах.

Поршень – дозволяє використовувати енергію нагрітих газів або пари. Застосовується, зокрема, у вогнепальній зброї, двигуни внутрішнього згоряння і паровій машині.

Як вже зазначалось, у технічних пристроях джерелом сили є двигун. На сьогодні існує досить велика кількість двигунів, які зазвичай класифікуються за родом енергії, що приводить цей двигун у дію (парові, електричні, пневматичні, гідравлічні або водяні, м'язові тощо) або за принципом роботи (внутрішнього згоряння, реактивні та ін.). Однак завжди слід враховувати, що частину сили, яка розвивається двигуном, необхідно направити на забезпечення роботи самого двигуна. Наприклад, у двигуні внутрішнього згоряння необхідно здійснювати його охолодження за допомогою водяного насоса і вентилятора радіатора, виробляти електроенергію для роботи системи запалювання за допомогою генератора, обертати насос системи мастила тощо. Для цього використовуються механізми передачі зусиль і механізми розподілу сили, в основі яких лежать найпростіші механізми. На рис. 7 показаний стенд, який демонструє різні механізми передачі сил, найбільш часто використовувані в технічних пристроях.

При виконанні будь-якої роботи часто виникає ситуація, коли сили одного двигуна виявляється недостатньо для виконання роботи. Наприклад, для перенесення якоїсь важкої речі необхідна стороння допомога, в результаті якої використовується додавання двох або більше сил, що в загальному випадку розвиваються різними двигунами. В техніці використовують принцип зчеплення, наприклад, кількох тракторів, що рухаються «цугом». Однак в обох випадках виникає проблема синхронізації як руху, так і сил. Легко уявити, як буде змінюватися рівнодійна трьох сил, показана на рис. 6, якщо хоч одна з сил буде змінюватися за величиною або напрямком, або найчастіше за обома параметрами. Тому в техніці для виконання роботи, що вимагає великих, а точніше величезних зусиль просто виготовляють єдиний механізм з одним або декількома двигунами, здатними розвинути необхідну силу, замість того, щоб складати силу декількох механізмів. Наприклад, транспортний літак Ан-225 «Мрія» (рис. 8, а) надвеликої вантажопідйомності (253,8 тонн) є найбільшим у світі літаком (довжина – 84 м, висота – 18 м, розмах крила – 88 м), що здатен розвивати максимальну швидкість 850 км/год та дальність польоту 15,400 км. Основним призначенням важкого транспортного літака було перевезення різних компонентів ракети-носія і космічного корабля від місця виробництва та збирання до місця старту.

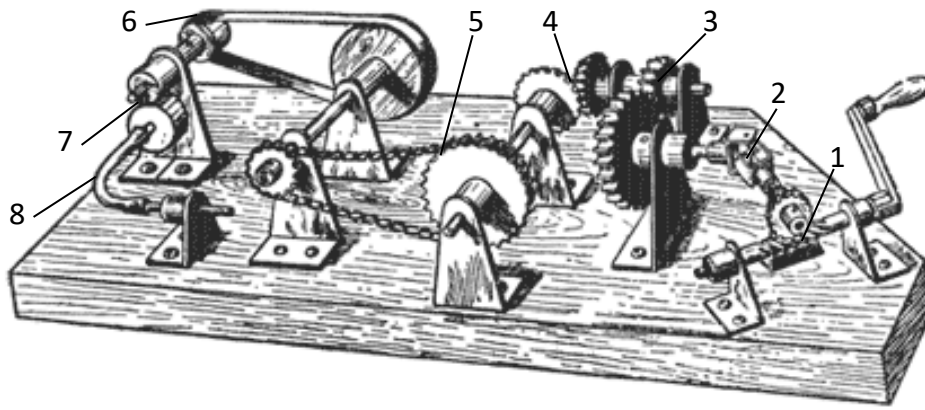


Рис. 7. Механізми передачі зусиль, які використовуються в техніці: 1 – черв'ячна; 2 – карданна; 3 – зубчаста пряма; 4 – зубчаста кутова; 5 – ланцюгова; 6 – ремінна; 7 – фрикційна; 8 – тросова

На рис. 8, б представлений найбільший у світі за розмірами (габаритні розміри 20,6×9,75×8,17 м; маса – 360 тонн) і вантажопідйомністю (450 тон) кар'єрний самоскид БелАЗ-75710, який має сумарну віддачу дизельних агрегатів 4660 кінських сил. При цьому самоскид може розвивати швидкість до 64 км/год.

Найбільшим навантажувачем у світі визнана 262-тонна модель LeTourneau L-2350 (рис. 8, в). Потужність (2300 кінських сил) і розміри цієї машини (довжина корпусу – 20,3 м, ширина – 6,5 м, ківш обсягом 40,5 м³ за раз піднімає 75 тонн гірської породи, висота підйому – 13,7 м) вражають. При цьому навантажувач здатен розвивати швидкість до 15 км/год.



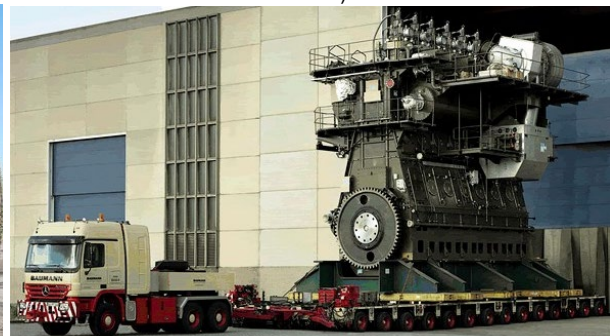
а)



б)



в)



г)

Рис. 8. Приклади механізмів, здатних розвинути велику за значенням силу

Ціла лінійка двигунів, представлених на рис. 8, г, була розроблена для кораблів. Судно місткістю по 8-10 тисяч тонн, що рухається за рахунок роботи єдиного такого двигуна, спокійно розвиває швидкість понад 46 км/год. Діаметр циліндра цього суднового двигуна – 0,96 м, хід поршня – 2,5 м, робочий об'єм циліндра дизеля – 1820 л, робочий об'єм – 25480 л. Потужність цього дизельного двигуна досягає 108920 кінських сил. Цей 14-циліндровий двигун важить 2300 тонн, має довжину близько 26 м, а висоту – 13 м. Основними матеріалами

для його будівництва стали чавун і сталь.

Висновки. Наведені приклади показують, що в техніці використовують різні види сил. Для розкладання сил використовують різного роду коробки зміни передач, механізми передач за допомогою ремнів, ланцюгів тощо. У той же час в техніці процес складання сил від різних джерел існує, але виявляється більш складним, оскільки виникає необхідність чіткої синхронізації руху джерел сил.

Список використаної літератури.

1. Бутиков Е.Н. Кондратьев А.С. Физика: Кн.1. Механика. – М.: Физматлит, 2008. – 352 с.

2. Савельев И.В. Курс общей физики: Кн.1. Механика. – М.: Астрель, 2002. – 336 с.
3. Ricardo Lopes Coelho. On the Concept of Force: How Understanding its History can Improve Physics Teaching // Sci & Educ. – 2010. – Vol. 19. – P. 91-113.
4. John Bigelow, Brian Ellis, and Robert Pargetter. Forces // Philosophy of Science 55, No. 4. – 1988. – P. 614-630.
5. Макс Джеммер. Concepts of Force. – Mineola, NY: Dover Publications Inc., 1999.
6. Arthur Stinner. The story of force: from Aristotle to Einstein // Physics education. – 1994. – Vol. 29, No. 2. – P. 77-85.
7. Вакуленко М., Вакуленко О. Фізичний тлумачний словник. – К.: Київський університет, 2008. – 767 с.
8. Блумфилд Л. Как все работает. Законы физики в нашей жизни. – М.: АСТ Corpus, 2016. – 704 с.
9. Балдаев Р., Раджендран В., Паланичами П. Мир физики и техники. – М.: Техносфера, 2006. – 579 с.
10. Кірієнко О.А., Гузенко Ю.М. Теорія механізмів і машин. Деталі машин. Розрахунки механічних передач: Навчальний посібник. – Київ: Київський політехнічний інститут, 2016. – 188 с.

Khursenko S.M., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Physics in technology: use of forces

Force is one of the fundamental concepts of mechanics. In physics, force is a vector quantity that is a measure of the effect on a given body from other bodies or fields. In mechanics, force is a quantitative measure of the interaction of bodies, the cause of deformations of bodies and the accelerations that are provided to them. The disputes surrounding the definition of force are still ongoing. This is due to the difficulties of uniting in one definition of forces that are different in their nature and character. In technology, forces are the driving forces that do some work. To carry out work, these forces must be transformed, changed their direction, decomposed into components or added to other forces. For the decomposition of forces, various kinds of gearboxes, transmission mechanisms using belts, chains, and the like are used. To increase force or change its direction in technology, mechanisms are used that make it easier for people to work. It is customary to distinguish eight simple mechanisms, among which there is an inclined plane, a wedge, a screw, a lever, a gate, a block, a wheel and a piston. The source of force in technical devices, as a rule, is the engine. Today there are a fairly large number of engines, which are usually classified according to the type of energy that drives this engine (steam, electric, pneumatic, hydraulic or water, muscle, etc.) or according to the principle of operation (internal combustion, jet, etc.). When doing any work, a situation often arises when the power of one engine is not enough to perform this work. In this case, it is sometimes more expedient to manufacture a single mechanism with one or more engines capable of developing the required force, instead of adding the force of several separate mechanisms, since in the latter case it becomes necessary to accurately synchronize the movement of the sources of forces. This article may be needed by students of physics and engineering specialties when studying additional material on physics, and will also be of interest to a wide range of readers interested in physics and technology.

Keywords: force, addition and decomposition of forces, a pair of forces, resultant forces, simple mechanisms.

Дата надходження до редакції: 07.05.2021

ВПЛИВ ОРГАНІЗАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ НА ЕКОЛОГІЧНУ БЕЗПЕКУ СИСТЕМИ «ЛЮДИНА-МАШИНА-ДОВКІЛЛЯ»

Радіонов Олександр Володимирович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
ТОВ «НПЗП «Ферогідродинаміка»
ORCID: 0000-0001-7282-578X
e-mail: ferrohydrodynamica@gmail.com

Тарельнік Наталія В'ячеславівна

кандидат економічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-6304-6925
e-mail: natasha-tarelnik@ukr.net

Думанчук Михайло Юрійович

старший викладач,
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-3559-4729
e-mail: m_duman@i.ua

В статті розглянуто питання підвищення екологічної безпеки технічних систем шляхом вдосконалення їх технічного сервісу. Розглянуто вплив комплексу заходів з технічного обслуговування обладнання на надійність функціонування технічних систем. Прیدілена увага питанням модернізації технологічного устаткування, що забезпечує поліпшення властивостей системи в жорстких умовах існуючої конструкції. Представлено досвід модернізації електродвигунів шляхом застосування магніторідинних герметизуючих комплексів. Запропоновано варіант модернізації підшипникових вузлів насосних та компресорних агрегатів шляхом формування комплексних електроіскрових покриттів на елементах підшипників ковзання.

Ключові слова: екологічна безпека, довговічність, технічний сервіс, модернізація, покриття, підшипник, ущільнення, електродвигун, компресор, насос.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.8>

Вступ.

Однією з фундаментальних складових загальної безпеки є екологічна безпека, суть якої полягає у формуванні сприятливих природних умов для життєдіяльності людини. Багато машин і устаткування слід розглядати як джерела підвищеної небезпеки для людей і навколишнього середовища.

Оцінка захищеності складних технічних систем (СТС) визначається їх здатністю протистояти виникненню і розвитку несприятливих ситуацій в штатних і позаштатних умовах. Оцінку захищеності складних технічних систем і вироблення захисних заходів припадає здійснювати в умовах високого рівня невизначеності щодо інтенсивності експлуатаційних навантажень і зовнішніх впливів на систему, а також несучої здатності відповідальних елементів СТС на різних етапах циклу експлуатації. Джерелом невизначеності є: природна варіативність параметрів системи і зовнішнього середовища, обмеженість знань про зв'язки між елементами СТС, між подіями і процесами, в них протікають; неточність наявних статистичних даних та існуючих оцінок;

Для України ситуація ускладнюється тим, що більшість заводів було збудовано 40 та більше років тому. А це означає, що старіють всі фабрики і заводи, їх комунікації. Велика частина основних виробничих фондів в Україні в даний час фізично зношена і морально застаріла, ступінь їх зносу в окремих галузях перевищує 80%, а рівень оновлення знаходиться в межах 0,4...9% [1]. Цією обставиною пояснюється

виробничий травматизм і високий рівень професійних захворювань.

У порівнянні з ненадійним становищем в традиційній енергетиці через дефіцит органічного палива, фізичного і морального старіння обладнання теплових електростанцій, через шкідливий їх вплив на навколишнє середовище, ядерна енергетика працює досить стабільно і при дотриманні всіх заходів безпеки є найбільш екологічно чистим джерелом енергії. Незважаючи на відносно високу надійність АЕС їх обладнання також потребує модернізації. Концепція підвищення безпеки діючих енергоблоків атомних електростанцій (далі - Концепція) [2] є основоположним документом для продовження реалізації заходів, передбачених «Комплексною програмою модернізації та підвищення безпеки енергоблоків атомних електростанцій». В продовження планування після 2010 року ДП НАЕК "Енергоатом" у 2010 році розробив "Комплексну програму підвищення безпеки енергоблоків АЕС України", в якій необхідні заходи відсортовані по їх пріоритетності [3].

Процеси функціонування СТС та процеси забезпечення їх безпеки багато в чому принципово відрізняються. Перші орієнтовані на досягнення головної, виробничої мети складної технічної системи, тому їм приділяється основна увага на всіх стадіях життєвого циклу. Другі визначаються, на жаль, досить часто як другорядні зважаючи помилкової думки, що основні проблеми працездатності і надійності, а, отже, і безпеки СТС вирішені на етапах розробки, доведення,

випробувань, доопрацювання.

Тому важливою є проблема безпеки при нормальній експлуатації. Бездіяльність будь-якої СТС можна розглядати як складну систему (подія), яка має просторову і часову характеристику, тобто відбувається в певний час і в обмеженому просторі, і складається з ряду окремих елементів виробничого циклу, що знаходяться в причинно-наслідкових зв'язках, які в цілому складають систему типу «людина-машина-середовище». Імовірність виникнення таких відмов повинна бути знижена до мінімуму за допомогою технічних і організаційних заходів.

Для цього необхідно забезпечити системну узгодженість оцінювання і коригування працездатності і безпеки в процесі функціонування СТС. Тому важливо встановити вплив кожного з її елементів на забезпечення необхідного рівня безпеки. Одним з таких елементів, який вимагає всебічного дослідження та вивчення, є організація виробничого технічного сервісу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У літературі досить докладно досліджуються особливості та властивості технічних систем, що призводять до проблем при взаємодії з навколишнім середовищем. До них відносяться дрібні відмови, які можуть в результаті провокувати значні наслідки; накопичення прихованих ушкоджень, старіння матеріалів, втомні динамічні процеси в конструкціях, що призводять до різких якісних змін; спільна дія різних факторів в залежності від їх поєднання і послідовності впливу, що в результаті викликає різні наслідки; індивідуальні відмінності навіть однотипних технічних систем в силу «віку» і особливостей експлуатації до дії факторів середовища, той чи інший вплив, «знайшло» уразлива ланка в СТС, що може призвести до ланцюгової реакції відмов і т.д.) [4 - 6].

З урахуванням того, що неможливо створити абсолютно безпечні технології і забезпечити абсолютну безпеку, очевидно, слід прагнути до досягнення такого рівня ризику, з яким суспільство в даний період часу може погодитися. Прийнятний ризик поєднує в собі технічні, екологічні, соціальні аспекти і представляє певний компроміс між прийнятним рівнем безпеки і економічними можливостями його досягнення [7].

Проведений аналіз літературних джерел показав, що основна увага в наукових роботах приділяється питанням оцінки ризику при реалізації власне процесів життєвого циклу. Слід зауважити, що питання оцінки ризиків, які виникають при розробці, впровадженні та/або модернізації технологічного обладнання та його елементів висвітлюється явно в недостатньому обсязі. Це ж відноситься і до аналізу існуючого технологічного рівня в даній галузі промисловості.

В [8] зазначається, що найменш вивченим є питання формування екологічної небезпеки та управління безпекою в умовах постійно діючого технологічного навантаження, яка не носить яскраво вираженого екстремального характеру. В [9] прямо вказується, що мета подальших досліджень повинна складатися в оцінці ступеня впливу конкретних властивостей людино-машинної системи на умови появи і величину техногенного ризику, що, в першу чергу, відноситься до властивостей технічних систем.

Питанню дослідження впливу виробничого технічного сервісу на рівень екологічної і техногенної безпеки в даний час належної уваги не приділяється.

Метою роботи є дослідження взаємовпливу техногенно-екологічної безпеки та технічного сервісу для розробки шляхів комплексного захисту людини і навколишнього середовища.

Виклад основного матеріалу досліджень.

Ухвалення концепції сталого розвитку як основи державної політики свідчить про необхідність комплексного розгляду екологічних проблем в системі «людина-машина-середовище».

Важлива роль при вирішенні цих питань повинна відводитися організації виробничого технічного сервісу.

Грамотно спланований сервіс дозволяє знизити рівень виробничого технічного ризику і підвищити ефективність виробництва як за рахунок створення сприятливих умов трудового процесу, так і підвищення продуктивності праці. Технічний сервіс повинен забезпечувати тривалу безвідмовну роботу технічних систем протягом всіх періодів експлуатації. Він необхідний на всіх стадіях виробничого циклу.

До основних заходів слід віднести коригування системи технічного обслуговування, періодичний контроль за станом об'єкта і визначення засобами технічного діагностування залишкового ресурсу і передвідмовного стану, впровадження сучасної технології ремонту з можливістю одночасного здійснення модернізації, аналіз причин відмов і організація зворотного зв'язку з розробниками і виробниками.

До інновацій в сфері технічного сервісу [10] відносять створення спеціального технологічного устаткування, що дозволяє оптимізувати перебіг процесів. Така модернізація забезпечує поліпшення властивостей об'єкта в жорстких умовах існуючої конструкції. Вона необхідна, так як швидке оновлення парку діючого обладнання в силу економічних причин, що склалися в Україні, неможливо. Необхідно також відзначити, що за останні роки створені нові розробки і технології, які можуть дозволити істотно підвищити ефективність технологічного обладнання. При цьому вони не вимагають серйозних капітальних витрат при впровадженні та великих змін конструкцій. Ці зміни цілком можна провести при плановому ремонті устаткування, одночасно здійснивши і його модернізацію.

Позитивною рисою модернізації з впровадженням останніх технічних досягнень є автоматична їх апробація в важких експлуатаційних умовах, що в майбутньому дозволить закладати високоефективні наукомісткі технології в серійні зразки нової техніки.

Модернізаційний підхід має і ряд інших переваг, основним з яких є:

- можливість поетапного впровадження нових технічних рішень і удосконалень в конструкцію технологічного обладнання;

- можливість впровадження нових технологічних рішень, що підвищують рівень техногенно-екологічної безпеки при ремонті обладнання, що було в експлуатації.

Проаналізуємо одну з таких модернізацій, пов'язану з впровадженням магніторідинні герметизуючих комплексів (МЖГК) на електродвигуни серії ВАСО, ВАСВ, АСВО, які використовуються в якості приводу вентиляторних градирень і апаратів повітряного охолодження.

Для визначення характеру і причин відмов електродвигунів ВАСО було проведено системне вивчення умов експлуатації значної кількості двигунів в різних галузях промис-

ловості. При дослідженні експлуатаційної надійності за період з 1992 по 2020 рік були розглянуті асинхронні електродвигуни (АД) як з традиційними ущільненнями, так і з МЖГК. Дані про відмови були зібрані в електроремонтних цехах хімічних підприємств Северодонецька, Горлівки, Одеси, Череповця, Гродно, Алмалик і т.д. ; нафтопереробних підприємствах Лисичанська, Кременчука, Атирау, Киришей, Тобольська, Омська і т.д. ; а також на газоперекачувальних станціях в Долині і Тюмені. Всього було зібрано та опрацьовано статистичний матеріал про більш ніж 4000 вийшли з ладу електродвигунів ВАСО. Аналіз статистичного матеріалу проводився з використанням методів математичної статистики [11]. Дані про величини середньомісячної відносної вологості, температури повітря, тривалості випадання роси і т.д. бралися з архівів метеостанцій, відкритий доступ до яких є в інтернеті.

На підставі аналізу статистичних даних про причини передчасного виходу електродвигунів з ладу виділені в якості «слабких ланок» наступні елементи конструкцій електродвигуна ВАСО: підшипниковий вузол - пошкодження складають 73%, обмотка статора - 24%, ротор - 3% від загального числа відмов АД (вибірка містила АД тільки із застосуванням традиційних ущільнень). Інші пошкодження АД були в інтервалах похибки і тому далі не розглядалися.

На рис. 1 представлені діаграма характеру пошкоджень електродвигунів ВАСО на хімічних і нафтопереробних

заводах України і середньої смуги Росії, за період 2000 - 2005 рр. (так як в ці роки кількість електродвигунів, що експлуатуються, було максимальним). Ці дані добре корелюються з результатами, наведеними в [12], де 80% відмов пов'язані з ушкодженнями підшипників, 16% - з обмоткою статора і 4% - з ротором, а також з даними, що обговорювалися на першому семінарі з проектування, управління та діагностики електричних машин WEMDCD'2013, де пошкодження підшипників склали 69%, обмоток статора - 21%, ротора - 7% і пошкодження, пов'язані з сполучними муфтами вентилятора - 3% [13].

Далі був проведений статистичний аналіз відмов електродвигунів ВАСО на заводах, де вже тривалий час все АД укомплектовані МЖГ. На його підставі був зроблений висновок, що підшипниковий вузол вже не є основною причиною передчасного виходу електродвигунів з ладу. Це добре ілюструється рис.2, де наведені причини виходу з ладу електродвигунів за даними експлуатації ПАТ «Укртатнафта» (м.Кременчук) за 1994 - 1998 рр. (Комплектація штатними ущільненнями) і за 2011 - 2016 рр. (Комплектація МЖГ).

«Вузьким місцем» при експлуатації ВАСО стала ізоляція обмотки статора. З цієї причини передчасно вийшло з ладу 61% АД, по підшипниковому вузлу було зафіксовано 36% відмов і з інших причин - 3% відмов [14].

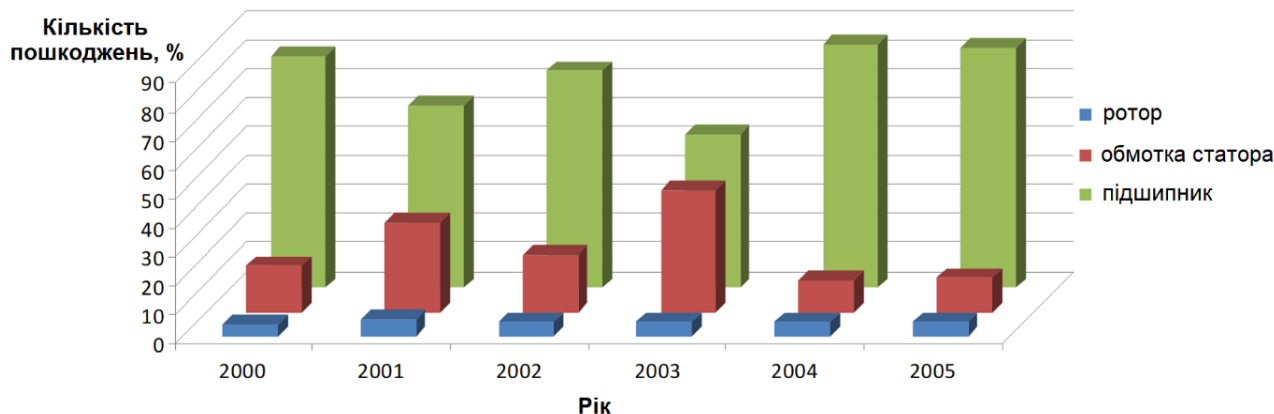


Рис. 1. Діаграма характеру пошкоджень електродвигунів ВАСО на хімічних і нафтопереробних заводах України і середньої смуги Росії за п'ять років.

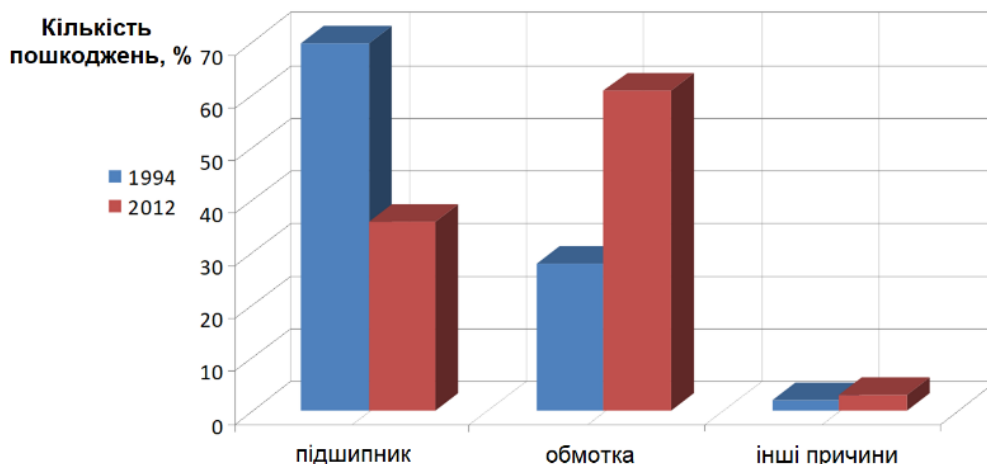


Рис. 2. Діаграма характеру пошкоджень електродвигунів серії ВАСО на ПАТ «Укртатнафта» (м.Кременчук) зі штатними ущільненнями (1994 - 1998 рр.) і МЖГ (2012 - 2016 рр.).

Аналіз досвіду модернізації шляхом застосування МЖГК показує, що першорядні загрози за масштабами і тяжкості наслідків відчувають такі базові властивості системи, як здатність до саморозвитку і здатність протистояти дестабілізуючим чинникам. Тому в якості критерію оцінки рівня техногенно-екологічної безпеки необхідно включати критерії, що характеризують базові властивості системи.

Технічні служби підприємств абсолютно обґрунтовано приділяють постійну увагу розвитку систем діагностики і моніторингу, вдосконалення методів і підвищенню якості технічного обслуговування обладнання. Однак слід зазначити, що створити абсолютно безвідмовну і гранично довговічну машину неможливо, так як протягом всього життєвого циклу на неї впливають різні чинники, змінюючи властивості деталей і, як наслідок, знижуючи її надійність. Базовий рівень надійності агрегату закладений в його конструкції і постійно знижується в процесі експлуатації. Модернізація є оптимальним рішенням проблем, пов'язаних з підвищенням продуктивності та економічності динамічного обладнання при відносно невеликих витратах і повинна забезпечити поліпшення споживчих властивостей агрегату в жорстких рамках існуючої конструкції. Перш за все потрібно позбавити замовника від проблем, що мають місце при експлуатації агрегату, мінімізувати всі навантаження, втрати і витрати, використовувати отримані

резерви для більш якісного виконання основних виробничих функцій.

Іншим прикладом модернізації може послужити аналіз роботи підприємства ТОВ «ТІЗ» м Суми, яке протягом багатьох років тісно співпрацює з низкою найбільших підприємств хімічної, нафтової і газової промисловості в області модернізації, ремонту, діагностики та реконструкції відцентрового компресорного та насосного обладнання.

Результатом довголітнього співробітництва і взаєморозуміння є модернізація понад сто позицій компресорного устаткування, яке успішно експлуатується на різних підприємствах. При цьому міжремонтний ресурс агрегатів або модернізованих вузлів в середньому збільшено в 2-3 рази. У ряді випадків відновлена працездатність обладнання, реальний ресурс якого був близький до нуля. На замовлення підприємств виконано модернізацію ряду компресорів, а також реконструкція їх окремих систем і вузлів. У процесі модернізації вирішувалися проблеми, пов'язані зі збільшенням терміну служби машин, який безпосередньо залежить від підвищення зносостійкості і надійності вузлів тертя. Для пар тертя найбільше застосування знайшли бабітові підшипники ковзання (ПК) у яких бабітові покриття може наноситися як на криволінійні (рис. 3, а, б), так і на плоскі поверхні (рис.3, в) [15, 16].

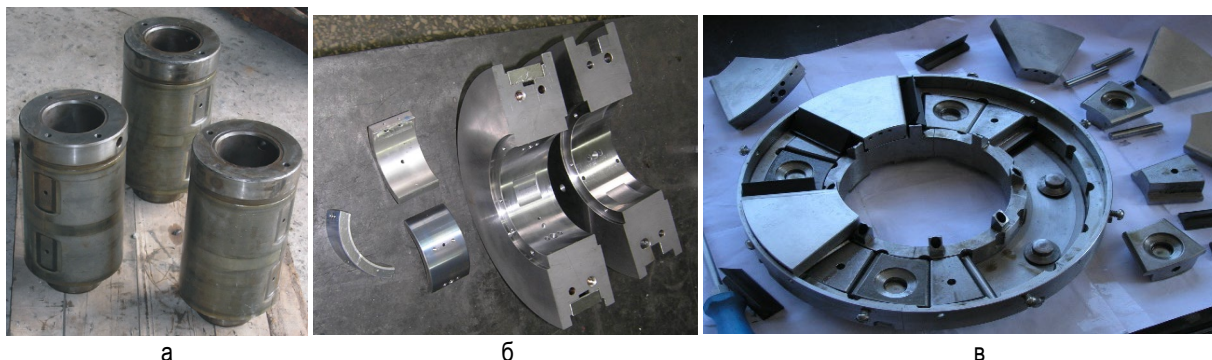


Рис. 3. Конструктивні елементи ПК з бабітових покриттям: а - зовнішня поверхня опорних пальців зубчастих коліс, б - внутрішня поверхня вкладишів опорних ПК, в - плоска поверхня напольгивої ПК.

Значною мірою надійність ПК, при інших рівних умовах, залежить від якості його виготовлення, а також проведення монтажних і ремонтних робіт, виконання всіх вимог конструкторської та технологічної документації. При виготовленні корпусів і вкладишів підшипників (ВП), а також підшипникових шийок (цапф) роторів компресорів і насосів завжди є відхилення від їх ідеальної геометричної форми, які називаються похибками. Додаткові неточності привносяться при установці ротора. Накопичення похибок значно знижує реальну площу контакту цапфи і ВП, що є причиною перенапруження антифрикційного шару, особливо в період припрацювання. Крім того, в місцях незадовільного прилягання, поверхні вкладиша і «ліжка» можуть піддаватися щільний і фреттинг корозії.

Недостатня жорсткість вала може стати причиною перекосів цапф щодо підшипників і концентрації навантаження у країв. Результатом підвищеного керамічного тиску може бути утворення тріщин або пластичний зсув м'якого сплаву.

Поліпшення умов припрацювання і поліпшення ре-

жиму роботи в післяприрацювальний період можна забезпечити за рахунок збільшення піддатливості ВП і більш щільного прилягання до «ліжка», шляхом нанесення на одну або обидві контактуючі поверхні методом електроіскрового легування (ЕІЛ) м'яких металів (позиції 9 і 10, рис. 4), як правило, міді або олова. М'який метал, деформуючись під впливом високих питомих навантажень, забезпечить самовстановлення ВП, компенсуючи похибки виготовлення ПК [17].

Формування якісного поверхневого шару в значній мірі залежить від міцності зчеплення антифрикційного бабітові шару зі сталеву підкладкою. Так, причиною виходу з ладу ПК може служити неякісне заливання бабіту, яке проявляється в відшаруванні бабітовоо шару, викришування окремих ділянок, руйнуванні в процесі експлуатації.

Причиною виходу з ладу ПК на стадії експлуатації є вплив різних видів зносу: кавітація, абразивний знос, зношування внаслідок пластичної деформації, утомлюване зношування та ін., а також вплив навколишнього середовища.

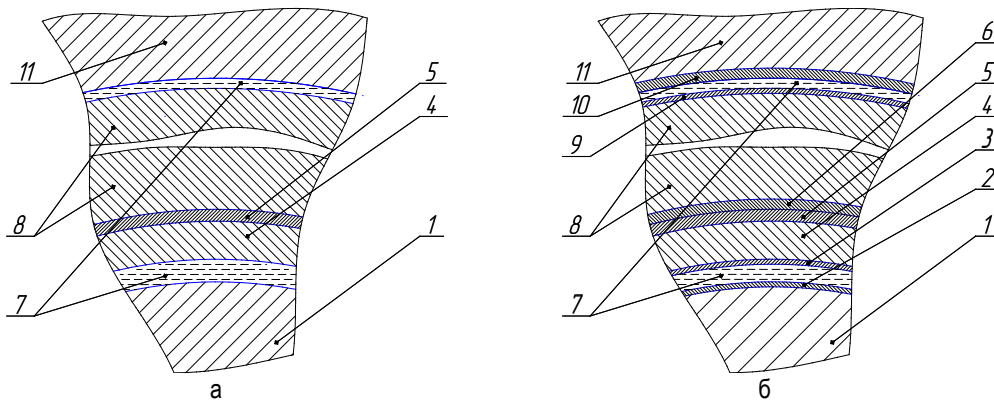


Рис. 4. Схема нанесення електроіскрових покриттів на елементи ПК: а - традиційна і б - фірми «ТРІЗ»: 1 - вал ротора; 2 - припрацювальне покриття з міді або олова на цапфі валу; 3 - припрацювальне покриття з індію або олова на поверхні бабіту; 4 - шар бабіту; 5 - лудіння оловом; 6 - перехідний шар з міді; 7 - робоча рідина (олива); 8 - вкладиш ПК; 9, 10 - м'яке, антифрикційне покриття з міді або олова на поверхні вкладиша (8) і (або) корпусу (10) ПК; 11 - корпус ПК.

Прискорення зношування і розвитку пошкоджень поверхонь тертя в післяприпрацювальний період, залежить від наявності на поверхні тертя невірних мікро-, а іноді і макропошкоджень, що утворилися в процесі припрацювання. До таких пошкоджень відносяться локальні руйнування структурних складових в результаті перевантажень. У металі в цьому випадку розвиваються пошкодження внаслідок малоциклової втоми, причому вражаються найбільш слабкі структурні складові. Так, при використанні в тонкошарових підшипниках бабіту Б83, в кубічних кристалах SnSb утворюються мікротріщини, які згодом стають осередками розвитку тріщин вже по товщині всього шару [18].

Для припрацювання бабітових підшипників ковзання запропоновано спосіб, який полягає в ЕІЛ поверхні бабіту Б83 індієм і оловом, що дозволяє сформувати поверхневий шар товщиною відповідно до 130 і 100 мкм, мікротвердість якого нижче мікротвердості основи. Проведений металографічний аналіз показав, що в структурі сформованого шару тверді включення відсутні, тому такі покриття можуть поліпшити умови припрацювання ВП [19].

Наступними дослідженнями встановлено, що більш технологічно захистити поверхню бабітові шару від руйнування можна шляхом нанесення припрацювального покриття на цапфу вала [20].

В [21] запропоновано новий спосіб обробки вкладишів підшипників, що підвищує міцність зчеплення бабітового шару зі сталеву підкладку за рахунок формування методом ЕІЛ проміжного шару з міді. Спосіб може застосовуватися як для ПК, так і для плаваючих ущільнень, опорних пальців планетарних мультиплікаторів та ін.

В [22] наведені порівняльні результати якісних характеристик антифрикційних бабітових шарів, сформованих традиційною технологією, і з підшаром міді. Випробування на стиск по ГОСТ ІСО 4386-2-99 показали, що застосування перехідних шарів з міді, сформованих методом ЕІЛ в захисному середовищі (аргон), підвищує міцність з'єднання бабітового шару з підкладкою на 35% в порівнянні з традиційною технологією (сталь 20 + олово + бабіт).

ВИСНОВОК.

Доведено, що в основі досягнення прийнятного рівня техногенно-екологічної безпеки значне місце повинно відводитися виробничій безпеці, що базується на створенні комплексної системи менеджменту безпеки, що включає в себе сервіс технічних систем, апріорний аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів, моделювання небезпечних ситуацій і шляхів їх запобігання, а також розробку ефективних управлінських механізмів.

Список використаної літератури.

1. Скалецький Ю. М., Бірюков Д. С., Мартюшева О. О., Яценко Л. Д. Проблеми впровадження культури безпеки в Україні: аналіт. доп. К.: НІСД, 2012. 56 с.
2. Концепція державного регулювання безпеки та управління ядерною галуззю в Україні: Постанова Верховної Ради України від 25 січня 1994 року № 3871-XII. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3871-12#Text>
3. Официальный сайт ГП НАЭК Энергоатом (<http://www.energoatom.kiev.ua/ru/index.html>).
4. Быков А. А. О проблемах техногенного риска и безопасности техносферы. *Проблемы анализа риска*. 2012. т. 9., №3. С. 4-8.
5. Махутов Н. А., Резников Д. О. Сопоставительная оценка нормативного и основаного на управлении риском подходов к оценке защищенности сложных технических систем. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2011. № 6. С. 92 – 103.
6. Панкратова Н. Д. Системный анализ в динамике диагностирования сложных технических систем. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2008. № 1. С. 33 – 50.
7. Калькис В., Кристиньш И., Роя Ж. Основные направления оценки рисков рабочей среды. Рига: SIA «Jelgavastipografija». 2005, 74 с.
8. Гражданкин А. И. Методическое обеспечение анализа опасностей и оценка риска промышленных аварий. *Безопасность труда в промышленности*. 2015. № 1. С. 54 – 58

9. Белов П.Г. Управление рисками, системный анализ и моделирование. М.: Издательство Юрайт. 2014. 728 с.
10. Карнаухова В.К., Краковская Т.А. Сервисная деятельность. М.: ИКЦ «МарТ». 2008. 154 с.
11. Ивановский Р.И. Теория вероятностей и математическая статистика. Основы, прикладные аспекты с примерами и задачами в среде Mathcad. – СПб.: БХВ – Петербург, 2008. – 528с.
12. Хомутов С.О. Система поддержания надежности электрических двигателей на основе комплексной диагностики и эффективной технологии восстановления изоляции [Электронный ресурс]: монография / С.О. Хомутов. – Электронные данные. – Барнаул: ООО «МЦЭОР», 2015. – 1 эл. опт. диск (CD-R); 12 см.
13. F. Filippetti, A. Belini, G.-A. Capolino. Condition Monitoring and Diagnosis of Rotor Faults in Induction. *Machines State of Art and Future Perspectives. Published in conference WEMDCD'*. 2013. March, 11-12, IEEE. Pp. 196 – 209.
14. Марцинковський В.А., Тарельник В.Б., Антошевський Б., Марцинковський В.С., Радіонов О.В., Конопляченко Є.В., Гапонова О.П., Позовній О.О. Екологічна безпека експлуатації компресорного і насосного обладнання: монографія, за ред. О.В. Радіонова. Суми: Сумський державний університет. 2018. 282с.
15. Марцинковський В.С., Тарельник В.Б., Конопляченко Є.В., Радіонов О.В., Загорулько А.В., Гапонова О.П., Гудков С.М., Роп'як Л.Я., Величкович А.С., Витвицький В.С., Шовкопляс М.В., Тарельник Н.В., Думанчук М.Ю. Проблеми безпечної експлуатації компресорного та насосного обладнання в сучасній промисловості: монографія, за ред. В.Б. Тарельника, Є.В. Конопляченка - м. Суми: ФОП Литовченко Є.Б., 2020. – 410 с.
16. Tarelynyk V.B., Antoszewski B., Martsinkovskii V.S., Konoplyanchenko E.V., Belous A.V., Gaponova O.P., Improvement in Babbit Sliding Bearing Quality with Electrospark Alloying. *Chemical and Petroleum Engineering* 54(7-8), (2018) pp. 598-604.
17. В. С. Марцинковський, В. Б. Тарельник, Н. В. Тарельник, Способ сборки подшипников скольжения, Патент 2422690 RU. МПК F16C17/02, F16C33/04.
18. А. В. Чичинадзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун и др., Трение, износ и смазка - М: Машиностроение: 2003. – 575 с.
19. В. С. Марцинковський, В. Б. Тарельник, Способ обработки вкладышей подшипников, Патент 2404378 RU. МПК В23Н9/00.
20. В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, О. В. Дзюба, Спосіб поліпшення припрацьовуваності пари тертя «вкладиш підшипника-шийка вала», Патент 105422 UA. МПК (2014.01), В23Н 1/00, В23Н 5/00.
21. В. С. Марцинковський, В. Б. Тарельник, Спосіб обробки вкладишів підшипників ковзання. Патент 64663A UA. МКВ В23Н1/00.
22. Тарельник В.Б., Марцинковський В.С., Антошевський Б., Совершенствование технологии изготовления бабитовых подшипников скольжения. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*, № 4 (6). – 2006 г. – С. 15-22.

Radionov A.V., SMPE Ferrohydrodinamica (Ukraine)

Tarelynyk N.V., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Dumanchuk M.Y., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

The influence of the technical service organization on the ecological safety of the «man-machine-environment» system

The article considers the issue of improving the environmental safety of technical systems by improving their technical service. The influence of a set of measures on maintenance of equipment on the reliability of technical systems is considered. Attention is paid to the modernization of technological equipment that improves the properties of the system in the harsh conditions of the existing structure. The experience of modernization of electric motors by application of magnetic fluid sealing complexes is presented. The variant of modernization of bearing units of pump and compressor units of ways of formation of complex electrospark coverings on elements of sliding bearings is offered.

Key words: *ecological safety, durability, technical service, modernization, covering, bearing, consolidation, electric motor, compressor, pump.*

Дата надходження до редакції: 26.05.2021

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГІДРАВЛІЧНИХ РОЗПИЛЮВАЧІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ РОСЛИН

Сировицький Кирило Геннадійович

старший викладач
Державний біотехнологічний університет
ORCID: 0000-0003-0250-8994
e-mail: gaver89@ukr.net

Шуляк Михайло Леонідович

доктор технічних наук, професор
Державний біотехнологічний університет
ORCID: 0000-0001-7286-6602
e-mail: m.l.shulyak@gmail.com

Мельник Віктор Іванович

доктор технічних наук, професор
Державний біотехнологічний університет
ORCID: 0000-0002-1176-2831
e-mail: victor_melnik@ukr.net

В статті дано обґрунтування методики досліджень технічного стану гідравлічних розпилювачів для хімічного захисту рослин, як: вплив форми сопла розпилювача на якість і рівномірність розпилення робочої рідини, тиск подачі робочої рідини. Так само, як і за теоретичними уявленнями, форма сопла розпилювача та тиск подачі робочої рідини вагомо впливали на форму плями розпилення і рівномірність розподілу рідини.

Авторами розроблено методику діагностування технічного стану гідравлічних розпилювачів для хімічного захисту рослин на створеному дослідному стенді. Дослідний стенд дозволяє отримувати двомірні характеристики розподілу робочої рідини розпилювачем, проводити дослідження впливу технічного стану розпилювача на якісні показники його роботи.

Збільшення витрати рідини розпилювачами, яке створюється за рахунок погіршення технічного стану сопла може призвести до перевитрати робочої рідини у 1,2-1,8 разів за годину роботи, що негативно впливає на технологічний процес захисту рослин та його техніко-економічну оцінку.

Ключові слова: гідравлічний розпилювач, технічний стан, сопло, якість розпилення, рівномірність, захист рослин.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.9>

Постановка проблеми. Аналіз наукових досліджень свідчить, що основні світові тенденції в землеробстві ведуть до того, що через прагнення до мінімізації обробки ґрунту роль хімічних засобів захисту рослин і, зокрема, гербіцидів, з року в рік збільшується. Щодо самих технологій внесення гербіцидів, то з тих же причин росте частка обприскування із застосуванням різних штангових знарядь. Інша техніка і технології використовуються не так інтенсивно [1].

Визначальним чинником ефективності використання пестицидів є якість їх внесення. Основними критеріями якості обприскування є норма внесення робочої рідини, дисперсність розпилювання, густина покриття краплинами поверхні, що обробляється, та рівномірність розподілу по ній. Усі показники якості обприскування значною мірою залежать від типу, параметрів і режимів роботи розпилювачів. Нині є багато різновидів розпилювачів [2], тож і постає актуальне питання добору оптимального з них для конкретних умов роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням технічного стану розпилювачів для хімічного захисту рослин присвячені роботи багатьох вчених [3, 4, 5, 6, 7, 8]. Аналіз наведених джерел дозволяє сформулювати висновки про ступінь розробленості обраної теми і намітити мету досліджень.

При якісному і своєчасному внесенні засобів захисту рослин гідравлічними розпилювачами констатується підвищення врожайності сільськогосподарських культур, що обумовлює рішення багатьох аграріїв застосовувати технології

захисту рослин інтенсивніше. Захист рослин, як складова основних технологічних операцій, буде застосовуватись в майбутньому більш повно та продуктивно. В сучасних реаліях все більше фермерських господарств пробують перехід від використання самохідних або причіпних обприскувачів до використання дронів, з метою зменшення проходів агрегатів по полю та необхідності їх обслуговування і ремонту [9, 10, 11]. Також значну увагу приділяють технологічній і техніко-економічній оцінці проведення операцій по захисту рослин [12]. Це обумовлено розвитком технологій і систем точного землеробства, інформаційних технологій та супутникового зв'язку. Незмінним в технологічному процесі захисту рослин залишається лише робочий орган, тобто розпилювач.

Метою досліджень є дослідження впливу технічного стану розпилювача на якісні показники його роботи, як: вплив форми сопла розпилювача на якість і рівномірність розпилення робочої рідини, тиск подачі робочої рідини.

Результати досліджень. Досліди проводилися в лабораторії на створеному авторами дослідному стенді (рис. 1), який імітує роботу розпилювача в полі. Дослідний стенд включає бачок 1 для робочої рідини з заливною горловиною і шаровим краном 1 і ніпелем з шлангом подачі повітря 2, який з'єднаний з компресором (на схемі не показаний), еластичний трубопровід 3, верхню балку 4 з вмонтованим корпусом розпилювача 5, стійки 6, матрицю верхню 7 та матрицю нижню

8, які мають в собі отвори діаметром 14 мм для тримання лабораторних пробірок (на схемі не показані). Дослідний стенд виконано з матеріалів, які мають високу стійкість до корозії, а саме з капролону та органічного скла. Умови випробувань: температура повітря +25 °С, вологість повітря 70 %, тиск в гідросистемі стенду варіювався від 2 до 4 атм з кроком в 0,5 атм, висота встановлення розпилювача від поверхні розпили 50 см, час досліді – 1 хв.

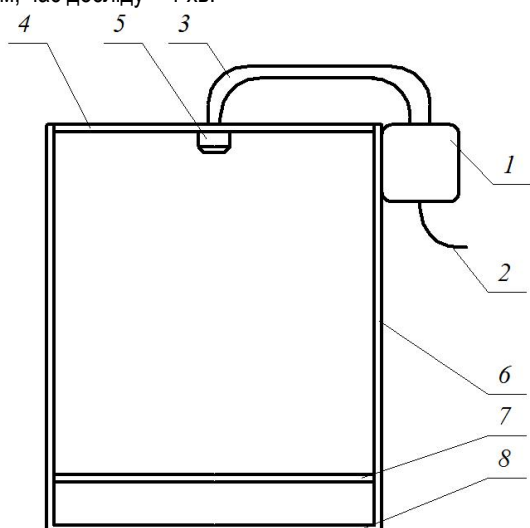


Рис. 1. Схема розробленого дослідного стенду для діагностики розпилювачів.

Розпилювачі для дослідження були отримані від фермерського господарства області, яке займається виробництвом продукції рослинництва. Було надано партію латунних розпилювачів, які експлуатувались один сезон на одному штанговому обприскувачі. В якості контрольного екземпляру було надано розпилювач з тієї ж партії, але який не експлуатувався. Всі отримані розпилювачі маркувались та проходили попередній огляд форми сопла на універсальному електронному мікроскопі. Приклад отриманих фото стану сопла розпилювача представлено на рис. 2.

Аналіз форми сопла розпилювачів проводився методом трапецій за формулою:

$$\int_a^b f(x) dx \approx \left(\frac{f(a)+f(b)}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) \right) h. \quad (1)$$

Похибка при цьому не перевищувала за $\frac{(b-a)^3 M}{12n^2}$,

де $M = \max \{ |f''(x)| : x \in [a, b] \}$.



Рис. 2. Форма сопла гідравлічного розпилювача після сезонної експлуатації.

Після завершення візуальних замірів кожен розпилювач встановлювали в розроблений дослідний стенд та проводили гідравлічні випробування. Кожен дослід проводили на різному рівні висоти встановлення розпилювача та різному тиску в гідросистемі. Вмикали компресор, після того, як тиск в гідросистемі досягав потрібного значення і вирівнювався, відкривали шаровий кран і подавали робочу рідину до розпилювача. Через одну хвилину кран закривали, а компресор вимикали. Пробірки зважували на вагах третього класу точності, які були додатково обладнанні кабелем USB 2.0, для передачі даних в комп'ютер. Отримані значення ваги рідини в пробірках заносились автоматично до MS Excel за допомогою вбудованого Visual Basic for Applications (рис. 3.). По завершенні зважування всі пробірки висушували та повертали в матрицю діагностичного стенду. Загальні умови проведення лабораторного випробування одного розпилювача приведено в таблиці 1.

Результати дослідів продуктивності розпилювачів на висоті встановлення 50 см приведено на рис. 4. З графіка видно, що продуктивність розпилювачів варіюється залежно від форми сопла розпилювача.

| 1725 | № пробірки | Вага, мгм | № пробірки | Вага, мгм | № пробірки | Вага, мгм |
|------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
| 1726 | y1 | x1 | y2 | x2 | y3 | x3 |
| 1727 | 1 | 30 | 32 | 68 | 34 | 40 |
| 1728 | 2 | 33 | 31 | 66 | 35 | 68 |
| 1729 | 3 | 67 | 30 | 102 | 36 | 104 |
| 1730 | 4 | 103 | 29 | 140 | 37 | 142 |
| 1731 | 5 | 141 | 28 | 180 | 38 | 182 |

Рис. 3. Фрагмент отриманих даних в MS Excel.

Таблиця 1. Умови проведення лабораторних випробувань розпилювачів

| Номер досліджу | Висота встановлення, см | Тиск в гідросистемі, атм |
|----------------|-------------------------|--------------------------|
| 1 | 50 | 2,0 |
| 2 | | 2,5 |
| 3 | | 3,0 |
| 4 | | 3,5 |
| 5 | | 4,0 |

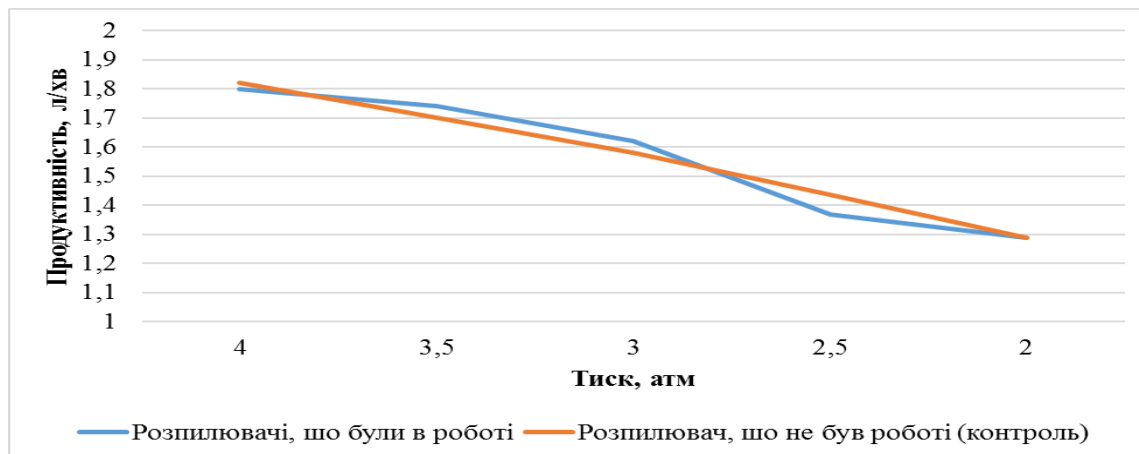


Рис. 4. Усереднена продуктивність розпилювачів при висоті встановлення 50 см.

Наступним етапом досліджень було оцінка якості розподілу робочої рідини по поверхні. Для цього отримані дані ваги робочої рідини в пробірках оброблялися за допомогою

сплайн-інтерполяції та отримувалися поверхні відгуку, приклад яких представлено на рис. 5. На основі аналізу поверхонь можна зробити висновки щодо якості розподілення рідини розпилювачем та можливості його подальшої експлуатації.

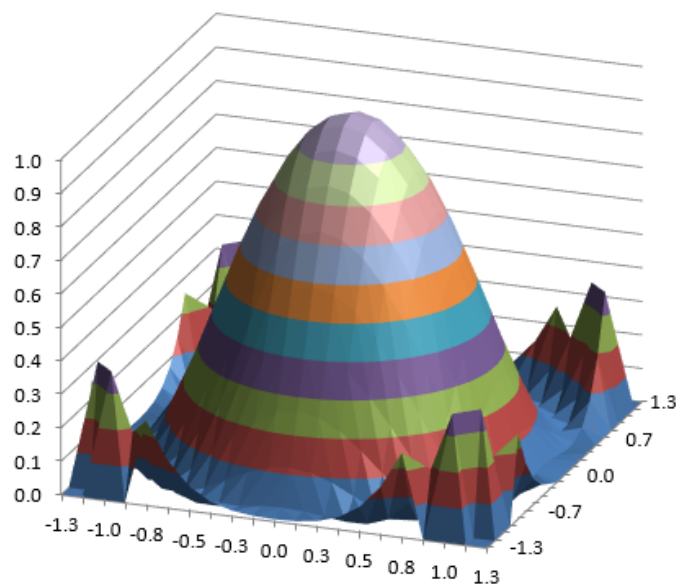


Рис. 5. Поверхня відгуку стану розпилення робочої рідини розпилювачем

Як видно з рис. 5, має місце неоднорідність плями розпилю по поверхні. На краях плями розпилювання спостерігається збільшення витрати рідини по відношенню до центральних (максимальних) значень у середньому на 15%. Явище, яке спостерігається, може призвести до перевитрати робочої рідини у 1,2-1,8 разів за годину роботи.

Висновки. Авторами розроблено методику діагностування технічного стану щілинних гідравлічних розпилювачів для хімічного захисту рослин на створеному дослідному стенді.

Дослідний стенд дозволяє отримувати двомірні характеристики розподілу робочої рідини розпилювачем, проводити дослідження впливу технічного стану розпилювача на якісні показники його роботи.

Збільшення витрати рідини розпилювачами, яке створюється за рахунок погіршення технічного стану сопла може призвести до перевитрати робочої рідини у 1,2-1,8 разів за годину роботи, що негативно впливає на технологічний процес захисту рослин та його техніко-економічну оцінку.

Список використаної літератури.

1. Сайко В. Актуальні проблеми землеробства: простих шляхів мінімалізації обробітку ґрунту не буває // Техніка АПК. —2008. № 1. — С. 8 – 14.
2. TeeJet technologies. 51-RU. Каталог. - Спреинг Системс Ко. - 2011. - 148 с.
3. Мельник В.И. Внутрипочвенное внесение жидкостей в растениеводство: Монография. – Харьков: «Міськдрук», 2010, - 439 с.: ил.
4. Кобець А. С., Кобець О. М., Ільницький В. М. Діагностування технічного стану щілинних розпилювачів пестицидів. ДДАУ – 2013.
5. Анализ конструкций распылителей машин для химической защиты растений / П. А. Догода, Ю. В. Самсонов // Наукові праці Південного філіалу Національного університету біоресурсів і природокористування України "Кримський агротехнологічний університет". Технічні науки. - 2013. - Вип. 153. - С. 158-164.
6. Мельник В. І. Наукові основи екологічно ощадних технологій і технічних засобів для внесення рідких добрив та хімічного захисту рослин : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.11 - Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва ; наук. конс. Л. М. Тіщенко ; Харків, 2010. 40 с.
7. Кобець О.М. Результати дослідження розпилювачів пестицидів / Кобець О.М. та ін. Матеріали міжнародної студентської науково-практичної конференції «Перспективи розвитку аграрної вищої освіти України очима молодих науковців. М. Ніжин. 2013. – 81-84 с.
8. Коваль В.П. Обприскування відцентровими розпилювачами Роса / В.П. Коваль, О.І. Мележик // Техніка і технології АПК. – 2011. № 11,12.
9. Діордієв, В., Кашкар'єв, А., & Семендяєв, О. (2019). Проблеми використання дронів у задачах обприскування сільськогосподарських культур та шляхи їх вирішення. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету, 9 (1).
10. Чуб О.О. Застосування дронів для обприскування полів / О.О. Чуб, А.О. Никифоров // Матеріали студентської науково-практичної конференції «Експлуатаційна та сервісна інженерія». Х.: ХНТУСГ. – 2020. С. 215-216.
11. Мельник В.И. Цыганенко М., Анисеев А., Сыровицкий К.Г. Экономическая эффективность элементов системы точного земледелия. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – 2015. Vol.17. № 7. С. 61-66.
12. Зубко В.М. Технологічна і техніко-економічна оцінка машинних агрегатів при проведенні догляду за посівами при вирощуванні сільськогосподарських культур /В. М. Зубко, О. В. Дубровіна // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – К., 2013. – Вип. 185, ч. 1. – С. 352-363.

Sirovitskiy K.G., State Biotechnological University (Ukraine)

Shulyak M.L., State Biotechnological University (Ukraine)

Melnyk V.I., State Biotechnological University (Ukraine)

Results of research of the technical condition of hydraulic nozzles for plant protection

The article substantiates the method of research of technical condition of hydraulic nozzles for chemical plant protection, as: the influence of the shape of the spray nozzle on the quality and uniformity of spraying working fluid, supply pressure. As well as according to theoretical ideas, the shape of the nozzles and the supply pressure of the working fluid significantly influenced the shape of the spray spot and the uniformity of the liquid distribution.

The authors developed a method for diagnosing the technical condition of hydraulic nozzles for chemical protection of plants on the created experimental stand. The experimental stand allows to receive two-dimensional characteristics of distribution of working liquid by a spray, to carry out research of influence of a technical condition of a spray on qualitative indicators of its work.

The increase in fluid consumption by sprays, which is created by the deterioration of the technical condition of the nozzle can lead to overconsumption of working fluid in 1.2-1.8 times per hour, which negatively affects the technological process of plant protection and its technical and economic evaluation.

Key words: hydraulic nozzle, technical condition, nozzles, spray quality, uniformity, plant protection.

Дата надходження до редакції: 26.05.2021

A REVIEW OF THE ELECTRO-SPARK DEPOSITION TECHNOLOGY

Zhang Zhengchuanpostgraduate student
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-7874-6879
e-mail: zzc0860@163.com**Liu Guanjun**PhD, Professor
School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Institute of Science and Technology
ORCID: 0000-0002-5987-404X
e-mail: lguan@126.com**Ievgen Konoplianchenko**PhD, associate professor
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0003-4814-1796
e-mail: konopl_e@i.ua**Viacheslav Tarelnyk**doctor of science, professor
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0003-2005-5861
e-mail: tarelnik@i.ua**Ge Zhiqin**Bachelor, Assistant Engineer,
Materials and Equipment Department, CCCC First Highway Engineering Group Xiamen Engineering Co., LTD
ORCID: 0000-0003-2116-2626
e-mail: 710810132@qq.com**Du Xin**postgraduate student
Sumy National Agrarian University
Henan Institute of Science and Technology
ORCID: 0000-0002-1996-602X
e-mail: 51969926@qq.com

Electro-spark deposition (ESD) technology is a new method for repairing and strengthening the surface of metal materials. This method has the advantages of simple equipment, convenient operation and wide application range. The alloyed coating has higher wear resistance, good corrosion resistance, excellent friction performance and other special properties, so it has better practical value and wide application prospect. This paper introduces the characteristics and principle of electro-spark deposition technology, analyzes the research status of this technology and points out the future development direction of this technology.

Key words: electro-spark deposition (ESD); surface; coating; special properties

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.10>

1. Introduction

The electro-spark deposition (ESD) technology is that the material to be deposited is used as the electrode, the electrode is operated on the surface of the substrate, the pulse frequency of the power supply is 100Hz-6000Hz and a high-density current (10^5 - 10^6 A/cm²) is instantaneously (10^{-6} to 10^{-5} s) passed through the power supply, produce high temperature of 5000 ~ 25000°C in a very small scope, make the material in the discharge area ionize with high energy, the electrode transfers to the surface of the substrate at a high speed and diffuses to the surface of the substrate, thus forms the deposit coating with metallurgy combination [1-3]. The process can really realize the metallurgical

bonding of the coating and the substrate and simultaneously can keep the temperature of the substrate at room temperature and prevent the thermal deformation of the substrate metal[4]. This process can be used not only for the repair of local areas of parts, but also for surface coating [5-7]. The thickness of a single layer of deposited metal is limit, the electro-spark deposition is carried out again and again on the previous deposited layer, and finally a deposited layer with a certain thickness is obtained. Because the electric spark discharge of the latter deposit layer will make the former deposit metal re-melt, and the micro-cracks in its surface layer will also be eliminated, so only the last surface deposit layer has micro-cracks. At the end of deposition, the deposited layer is slightly higher than the required size of the workpiece,

and the remaining layer can be grinded to eliminate the micro-cracks on the surface layer.

2. The characteristics of the electro-spark deposition technology

The electro-spark deposition technology can effectively improve the physical and chemical properties, mechanical properties and tribological properties of the surface of mechanical parts, so that the surface of mechanical parts has high hardness, high wear resistance, high fatigue strength, high corrosion resistance and oxidation resistance, high temperature resistance, ablation resistance and other special properties [8-10]. Widely used in tools, molds, cutting tools, agricultural machinery, military, medicine, automotive, food, mining, metallurgy, aerospace, nuclear industry, marine vessels, turbines, electric power generation, electrical transmission and other industries of mechanical parts of the surface strengthening and the surface repair of failure parts, especially for precision parts of the surface strengthening and local material addition manufacturing [11-13]. Compared with other surface treatment technologies, electro-spark deposition has the following advantages.

(1) No temperature rise or very low temperature rise in parts, no change in organizational structure and performance, parts will not anneal and deform.

(2) Fast heating and rapid cooling can easily obtain fine crystal and even amorphous structure. When the material is heated and cooled rapidly, it is easy to obtain fine grain structure, even amorphous structure under high temperature gradient, so as to improve the mechanical properties, wear resistance and corrosion resistance of the material surface.

(3) The ESD coating and the substrate are metallurgically bonded and the bonding strength is high.

(4) The ESD coating is dense and has good uniformity.

(5) Only a small amount of pre-treatment and post-treatment is needed and sometimes even no need. The final machining allowance of the deposited layer is small and the subsequent machining cost of a workpiece is saved.

(6) The ESD device is simple and convenient to carry and operate. It is suitable for online repair (good equipment mobility), which is very important for the repair of large workpieces or online equipment.

(7) Wide application range, suitable for all conductive, fusible metal and ceramic materials.

(8) The surface of the deposition layer is orange peel-like with a large number of tiny pores and pits, which is quite beneficial to the lubrication of the workpiece (Figure 1).

(9) There are some other advantages of electro-spark deposition, such as economic and practical, safe and environmental protection, easy to automate. It can be used in places that can't be seen, such as inner holes and grooves of parts.

However, there are also some shortcomings in the process, such as thin surface layer (generally less than 1 mm), slow deposition rate and low efficiency, so it is not suitable for large area and complex surface.

3. The research status of the electro-spark deposition technology

The electro-spark deposition can be used as a surface strengthening method to strengthen the surface with the requirements of wear resistance, corrosion resistance and oxidation resistance, or to repair the surface through deposition, and also to prepare various special functional coatings [14-16].

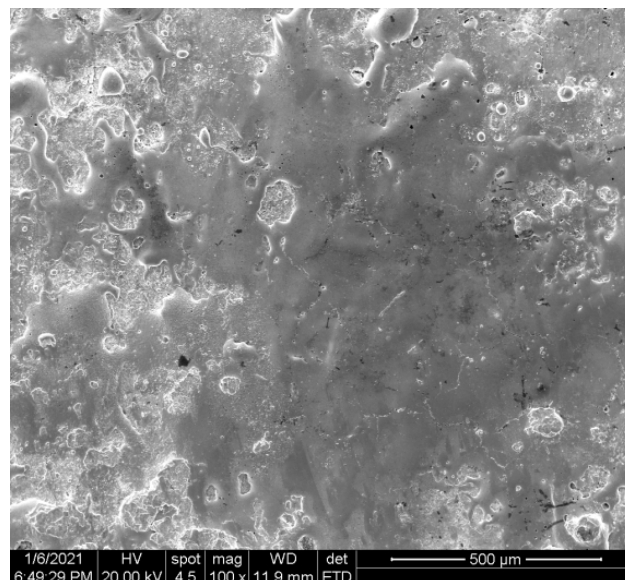


Fig. 1 The morphology of the ESD coatings surface

3.1 The research on the mechanism of electro-spark deposition

Since the theory of electro-spark deposition was put forward in 1943, the new technology of electro-spark deposition has been developed rapidly. With the development of the theory of electro-spark deposition, researchers have different views on the definition of this technology. Some scholars believe that electro-spark deposition is a process of surface strengthening by direct use of high energy density of electric energy. Through spark discharge, conductive materials as electrodes are infiltrated into the surface of metal workpieces to form alloyed surface deposits, which can improve the physical, chemical and mechanical properties of workpieces. Another part of researchers connect the electric spark deposition with the traditional electric arc welding, and think that the electric spark deposition is a kind of pulse electric arc micro-welding technique, which utilizes the short time big electric current pulse produced by the electric capacity discharge to form the high temperature plasma arc with the temperature as high as 5000~25000°C, melting or vaporizing the electrode material and transiting to the work piece.

Researchers put forward two theories to explain the mechanism of electric spark deposition discharge. One is the principle of non-contact discharge, the other is the principle of contact discharge. The physical process of non-contact discharge is that the electric field strength increases when the electrodes are close to each other, when the distance is close enough, the gap between the electrode and the workpiece is broken down to generate spark discharge, through the discharge channel, the electron beam bombards the surface of the anode and converts into heat energy, the surface of the anode is heated and melted to generate metal droplets. The droplets move from the front of the moving anode to the cathode and are heated in the process of separating from the anode, and the temperature rises until boiling and explosion occur, forming a large area of particle flow. The molten particles reach the cathode, adhere to the cathode and partially infiltrate into the surface of the cathode. The electrode moving behind these particles mechanically strikes the workpiece and moves upward away from the workpiece, leaving a layer of anode material on the cathode surface.

At the same time, some researchers also questioned the non-contact discharge theory, thinking that it cannot reasonably explain the discharge mechanism of electro-spark deposition, they think that under normal conditions, when the discharge voltage of electro-spark deposition cannot reach the air breakdown voltage, non-contact discharge mode is difficult to occur. For example, in iron cathode, the minimum breakdown voltage of air is 270V, while in electro-spark deposition, the bipolar voltage is less than 100V. Therefore, the theory of contact discharge is put forward, and the discharge process can be divided into three stages: (1) the formation stage of low voltage breakdown condition; (2) spark discharge stage; (3) separate that electrode from the workpiece. The condition of low voltage breakdown is that high current density is generated instantaneously under the condition of contact resistance discharge and the energy is highly concentrated, so that thermal emission and thermal ionization are generated, the concentration of free electrons, ions and other charged particles between electrodes is greatly increased, the number of collisions between electrons and atoms or molecules meeting the requirement of gas breakdown is realized and the gas low voltage breakdown condition is formed.

In [17], the formation mechanism of micro-nano coating was described, the main reason for the improvement of hardness and wear resistance of cladding layer were analyzed. The addition of nanocrystalline hard phase and focused on the formation reason of nanocrystalline structure in micro-nano coating. The metal surface layer was quenched at ultra-high speed in the cladding process of rapid cooling and rapid heating.

In another report [18], the phenomenon of arc drift in spark discharge during the study of automatic strengthening of electric spark was observed and explained this phenomenon by using the principle of welding arc. But there are essential differences between welding arc and electric spark deposition arc. Welding arc is continuous discharge, but electric spark deposition arc is intermittent discharge controlled by high frequency pulse.

Single point gap discharge, single point contact discharge and continuous discharge with rotary electrode tests were conducted in order to study the discharge mechanism of electro-spark deposition with rotary electrode, as in research [19]. The voltage and current waveform between the electrode and substrate in discharge process were collected and analyzed. The results show that the medium between electrode and substrate can be broken down and result in gap discharge under certain voltage and gap conditions. Contact discharge mainly consists of two stages: short circuit discharge and gap discharge. The contact state between electrode and substrate is complicated and variable in the process of electro-spark deposition with rotary electrode. During the discharge process, there exists not only non-contact discharge phenomena, but contact discharge and short circuit discharge phenomena. Most of them are contact discharge phenomena.

At present, the research on the mechanism of electro-spark deposition is still continuing.

3.2 The research on the electro-spark deposition equipment

In 1944, the former Soviet Union made the world's first electric spark perforating machine according to the deposition process proposed by Lazarenko and his wife. In 1950, the former Soviet Union Central Institute of Electrical Science developed the YHP series of electro-spark deposition equipment and also developed the he series of electro-spark deposition equipment. In

1964, the Institute of Applied Physics of the Academy of Sciences of Moldavia of the former Soviet Union developed 3H series equipment according to the theory of deposition technology of Lazarenko and his wife and widely used in industrial departments. The Kishinev Experimental Factory of the Institute of Applied Physics of the Academy of Sciences of Moldavia produced the new equipment for electro-spark deposition using thyristors and transistors in the 1970s which has greatly improved the quality of deposited layers and manual operability. According to records, in 1978 to 1979, the former Soviet Union used 37 such sedimentation equipments to save about 400000 rubles.

European and American countries began to study and use this deposition process in the 1950s and mostly used in mould parts while Japan began to study and use it in the 1960s. These devices are typically manually operated devices with a power of within 200W. After entering the 1990s, Japan's electro-spark deposition technology has been great development, they developed the SparkDepo deposition equipment power is bigger, can obtain a more uniform coating, coating thickness also increased a lot and the current use of SparkDepo Model 300 electro-spark deposition equipment. ASAP (Advanced Surface And Process Inc.) of the United States is the authority on the spark deposition, is the most advanced spark deposition system manufacturers and it has also the successful applied ESD to the aviation, marine, military, medical, automotive and food processing industries.

The research of electro-spark deposition technology in China started very early and the research of electro-spark deposition equipment began in the 1950s, but due to the theoretical knowledge and technical conditions at that time, this technology was not applied in a large area. In 1977, Suzhou Electro-machining Machine Tool Research Institute developed D9 series of deposition equipment which has been widely used in the deposition strengthening and surface repair of dies, measuring tools and mechanical parts and achieved good economic benefits. In the 1990s, with the progress of science, this enhancement technology has been further developed. Xi'an Qing'an Group Co Ltd of Aviation First Group has developed the ZS-116 type electro-spark deposition equipment which is characterized by a wide range of deposition current and can be used for a variety of electro-spark deposition processes. Some institutions of higher learning and scientific research units in China have done a great deal of work on the development of the deposition equipment and have developed a series of new-type electro-spark deposition equipment. For example, some scientific research units such as Tsinghua University have developed the pulse electric spark deposition equipment. Because a set of control circuit is designed on this series equipment, the discharge energy is greatly increased, thus the quality and thickness of the deposition layer are improved and the surface roughness is reduced. The Institute of Metal Research of Chinese Academy of Sciences has developed the 3H-ES series of electric spark surface strengthening and repairing machine, high energy micro-arc pulse cold welding processing equipment which is characterized by small thermal effect, no deformation of the workpiece, metallurgical bonding between the deposit and the substrate and on-line surface deposition and repair, thus greatly saving production costs. At present, the DZ-4000III electric spark surfacing machine produced by the Institute of Surface Engineering Technology of China Academy of Agricultural Mechanization Science and Technology is widely used.

The electro-spark deposition equipments and the parameters (model, power, voltage, capacitance and frequency) are shown in Table 1.

Table 1 The parameters of the electro-spark deposition equipments

| Model | Power, W | Voltage, V | Capacitance, μF | Frequency, Hz |
|------------|----------|------------|----------------------------|---------------|
| Elitron22A | 500 | 15-70 | 360 | --- |
| Elitron52A | 3500 | 35-210 | 120-2040 | --- |
| Depo150 | 500 | 50/100/150 | --- | 60-1400 |
| Depo300 | 2000 | 50/100/150 | --- | 60-2000 |
| DZ-4000III | 4000 | 20-200 | 30-420 | 1300-6000 |
| SZ-08 | 1500 | 20-100 | --- | 50-500 |
| SZ-HCS07 | 3800 | 20-100 | --- | 50-500 |
| SW1500 | 1500 | 20-100 | --- | 50-500 |
| VC400DHF | 1500 | 20-100 | --- | 50-500 |

3.3 The research on the electro-spark deposition process

The equipment and process of electro-spark deposition have a significant impact on the efficiency and quality of deposition. There are many process parameters affecting the electro-spark deposition which are systematically studied and classified as follows [20-22]:

(1) Electrode and its movement. Electrode materials (material composition, density, microstructure), manufacturing technology (machining, powder metallurgy, 3D printing), shape, speed of movement, specific deposition time, contact force, cycle times, deposition angle and so on [23-25]. According to the application, the electrode materials used can be divided into three categories. The first is wear resistance material that include hard carbides (carbides of W, Ti, Cr, Ta, Mo, Hf, Zr, Nb, V, etc.), hard-facing alloys (Stellite, high nickel chromium alloy), Ti, Zr, Ta and other borides, intermetallic compounds and cermets. The second is corrosion resistance material that include stainless steel, special alloys (Hastelloy, Inconel, etc.), intermetallic compounds of Fe, Ni and Ti with Al, multicomponent alloys FeCrAlY, NiCrAlY, CoCrAlY. The third is repair or modification material that include nickel-based or cobalt-based superalloy, noble metals such as Au, Ag, Pt, Ir, Pd and Rh, refractory metal such as W, Mo, Ta, Re, Nb and Hf and alloys thereof and alloys of Fe, Ni, Cr, Co, Al, Ti, Cu, Zr, Zn, V, Sn and Er [26-28]. Because the electrical resistivity, melting heat, thermal conductivity, ductility, wetting angle and other characteristics of materials are very different and considering the instability of the electro-spark deposition process, the influence of process parameters on the preparation and performance of coatings is uncertain.

(2) Substrate material. Material, surface roughness, cleanliness, shape, temperature.

(3) Power supply. Electric spark energy and frequency, voltage, current, capacitance, discharge time of electric spark, inductance.

(4) Environment. Gas or liquid composition, fluid properties, gas flow rate and mode, temperature.

(5) Electro-spark deposition composite process. Sometimes it cannot achieve the desired effect by using a single electro-spark deposition technology for deposition, some scholars combine the electro-spark deposition technology with other processes to achieve better results [29,30]. And other process com-

pared with that electro-spark deposition technology include magnetron sputter, ultrasonic treatment, laser treatment, chemical heat treatment, shot peening treatment and rolling treatment [31-33].

The research scope of electro-spark deposition by scholars is narrow and the thickness of deposition layer is often used as the basis for evaluating performance and selecting process parameters. So the research of electro-spark deposition mostly focused on how to determine the relationship between process parameters and deposit thickness and how to increase the deposit thickness, and the research of deposition process parameters mainly focused on the limited ceramic or cemented carbide deposition materials, spark capacitance, voltage, frequency and specific deposition time. There are obvious deficiencies in the research of deposition materials, electrode motion and automatic control.

In [34], NiCrAlY coatings with different Al contents on GH4169 superalloy by electro-spark deposition were prepared. There was a coating thickness limit for the NiCrAlY coating with high Al content. The coating thickness could be further increased by coating again after annealing treatment. The low aluminum content NiCrAlY coating was not applied to the limit thickness after being applied to the 130 layers. Different element content of the alloy coating on the thickness of the coating is also a great impact.

In another paper [35], a new method of ESD is proposed to improve the wear resistance of copper alloys surface. TiN strengthened coating is formed on the surface of QAl9-4 aluminum bronze rotating workpiece by the reaction of titanium cluster electrode with nitrogen under the action of electric spark discharge heat. The results show that a uniform and continuous TiN coating was formed on the surface of copper alloy. The surface of the TiN coating is composed of refined grain structure and compact structure. The electrode wire has a strong grinding pin coating effect on the surface of the coating, which significantly reduces the roughness of the coating surface. The sum of the titanium and nitrogen atom on the surface of the coating layer and the end of the electrode wire is more than 90%. The coating is mainly composed of TiN hard phase with a thickness of about 85 μm . The microhardness of the coating can reach 890HV_{0.05}, which is about 4.8 times of the substrate (185HV_{0.05}). There is an alloying metallurgical bonding layer between the coating and the substrate. The friction coefficient of the coating is 0.125-0.2, which is much smaller than that of the substrate (0.23-0.35) and the fluctuation is small. The wear rate of the TiN coating is about 49.6% of that of the substrate. The TiN coating has better antifriction and wear resistance than the substrate.

In other work [36], electro-spark deposition process was used to prepare the Mo₂FeB₂-based cermet coatings in Ar and in air. The DZ2000 electro-spark deposition equipment was used to prepare the coatings and the specific process parameters were as follows: capacitance 360 μF , voltage 150V, frequency 1800Hz, deposition rate 2min/cm² and argon gas flow rate 5L/min. The coating prepared in air is oxidized severely, and has a rougher surface and non-uniform thickness. Both of the coatings are composed of amorphous phase and martensitic phase while more amorphous phase is involved in the coating produced in Ar. The coating prepared in Ar has better wear resistance, whose wear mass is about 1/7 that of the coating produced in air. The abrasion mechanism of the two coatings is fatigue wear and abrasive

wear and the coating produced in Ar is mainly fatigue wear, whereas the coating prepared in air is primarily abrasive wear.

In [37], In order to investigate the effects of pulse energy on microstructure and properties of Mo^2FeB^2 -based cermet coatings, three kinds of coatings were prepared under different pulse energy (1.35J, 6.41J and 17.81J) by electro-spark deposition. The results show that all the coatings are consisted of amorphous, martensite and Fe_3B . The content of amorphous phase is the lowest when the pulse energy is 17.81J. The splash area of single spot and the quantity of cracks on the coatings surface increase with the pulse energy increasing, while the thickness variation is limited. Metallurgical bonding to the substrate is formed in all the coatings. The coating deposited at pulse energy of 6.41J has a maximum peak microhardness of 1395HV_{0.05}, the minimum mean friction coefficient (0.313) in the steady state and the minimum wear mass (0.7mg) after 1h of abrasion, indicating its better friction and wear performance.

In the present study [38], the effects of process parameters (voltage, nitrogen flux and specific strengthening time) on the microstructure and wear resistance properties of TiN coatings prepared by electro-spark deposition (ESD) were investigated systematically. The microstructure of the coatings was characterized for thickness (TOC), content of TiN (CON) and porosity (POC). A statistical model was developed to identify the significant factors affecting the microstructure and wear resistance of the coatings. The results show that the voltage and nitrogen flux present significant effects on majority of the evaluation indexes such as TOC, friction coefficient (COF) and wear mass loss, while the specific strengthening time has a significant effect on POC and a small effect on the other indexes. The optimal process parameters were obtained as follows: voltage 60V, nitrogen flux 15L/min and specific strengthening time 3 min/cm². The variation of wear mass loss by the variation of the voltage and nitrogen flux is attributed to the change of wear mechanisms of TiN coatings. The main wear mechanism of TiN coating prepared under optimal process parameters is micro-cutting wear accompanied by micro-fracture wear.

The most recently [39], aiming at the defects such as pores, microcracks, loose surface structure, poor continuity and poor surface quality in the ESD layer, a machining method of "ESD-remelting and rolling" was proposed. The results show that the electrode has great extrusion and rolling effect on the deposited surface during remelting and rolling. Remelting and rolling can effectively eliminate the defects such as pores, microcracks and loose microstructure in the sediment layer. In addition, this process can refine the grain size and improve the continuity and integrity of the layer. It is considered that the rotating electrode has a remarkable effect on grinding the surface of the deposited layer. The results show that the roughness value of remelting and rolling coatings is 76.3% of the conventional ESD coating, which indicate the surface quality of the deposition layer is improved.

In order to determine the temperature field of WC-12Co coating, mathematical model of heat conduction was established by utilizing suitable heat source and the thermal boundary conditions [40]. Numerical simulation was carried out by commercial finite element code ANSYS, and iso-surface, the temperature distribution curve and temperature variation curve were derived. The areas of melting and gasification zone were measured by setting of contour lines of temperature field. Further-

more, the influence of process parameters on the areas of melting and gasification zone was researched and the optimized process parameters were predicted. To verify the prediction, electro spark deposition experiments were carried out and the optimized process parameters were determined.

Through the optimization of different process parameters, analysis of the various parameters on the deposition layer quality and deposition efficiency to obtain stable and reliable process parameters in order to achieve quality and efficiency of double excellent is one of the research direction of the electro-spark deposition process scholars and experts.

3.4 The research on the surface characteristics of electro-spark deposition

Electro-spark deposition technology can effectively improve the physical and chemical properties, mechanical properties and tribological properties of the surface, so that the surface has high hardness, high wear resistance, high fatigue strength, high corrosion resistance and oxidation resistance, high temperature resistance, ablation resistance and other special properties.

The composite coatings of the tin bronze surface that was formed by alternately ESD applying the soft antifriction material of silver, copper and babbitt B83. The investigation of the tribological properties of the coatings in dry friction show that the lower resistance is exhibited by the composite coatings deposited using the soft antifriction material. The surface friction coefficient of the composite coatings is 55.6% of the tin bronze substrate. The surface of wear traces were analysed in order to understand the friction and wear resistance mechanisms of the coatings. The wear scars of the tin bronze substrate with and without the soft antifriction composite coatings after tribological testing are shown in Fig. 2 and Fig. 3. It was found from analysis of wear scars in Fig. 2 that the wear mechanism of the tin bronze substrate is dominated by severe ploughing wear and fatigue delamination. A lamellar structure can be distinguished on the surface of the worn tin bronze substrate. This can be responsible for low friction under these conditions. However, it can be seen in Fig. 3 that the soft antifriction composite coatings may effectively restrain fatigue delamination, showing plastic deformation, abrasive wear and slight polishing.

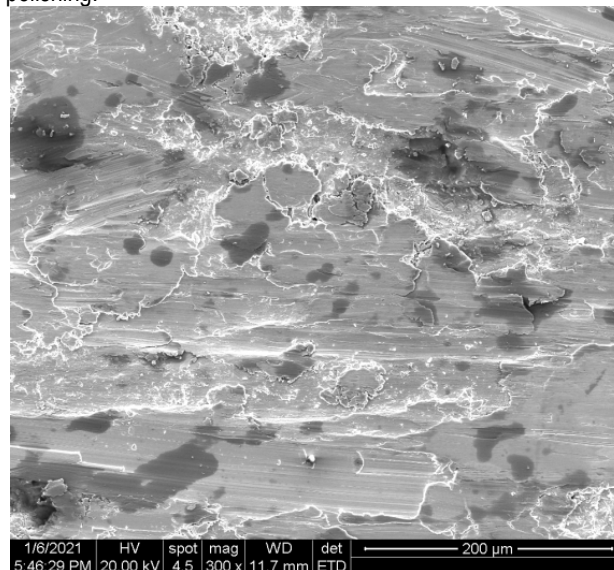


Fig. 2 The wear scars of the tin bronze substrate after tribological testing

Plastic deformation and abrasive wear dominated on the relatively soft composite coatings. The initial surface microgeometry was changed during load application and its surface became smooth with fine shallow scratches observed after the wear test. After the smooth surface was formed, the friction and wear stabilised.

In [41], indium, tin, copper and silver soft wear-resistant coatings were deposited on the axial surface of Babbitt alloy by electrospark deposition technology, which can reduce the requirements for the assembly standards of friction units and reduce the formation of SnSb crystals on the surface of Babbitt alloy.

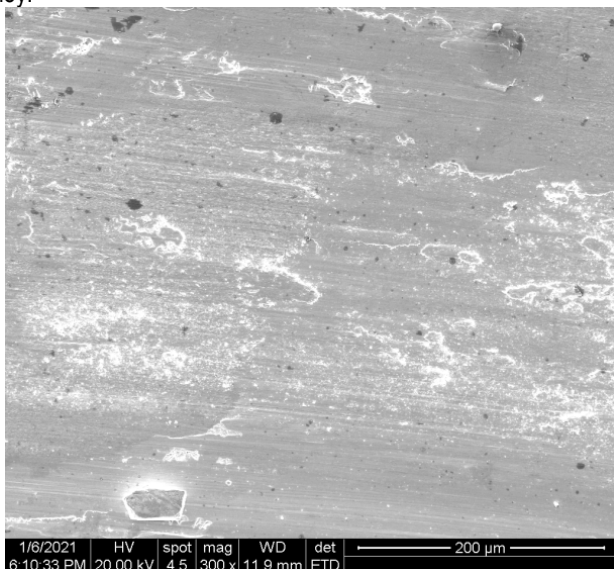


Fig. 3 The wear scars of the tin bronze substrate with the composite coatings after tribological testing

In other research [42], a new method was proposed to improve the surface properties of titanium alloy TC4 by synthesizing TiN coating with flexible titanium electrode. In that process, the flexible titanium electrode and the titanium alloy TC4 surface are subjected to electric spark discharge, nitrogen is introduced into a processing area through the interior of the titanium electrode at the same time, and the TiN coating is generated on the surface of a workpiece by utilizing the electro spark discharge energy. The results show that the TiN strengthening coating is prepared on the surface of TC4 workpiece and the coating is compact, uniform and continuous.

WC-Cu coating was deposited on the surface of C45 carbon steel by using laser technology and electro-spark deposition technology and good anti-corrosion effect was obtained [43].

In another report [44], the tribological properties of electro-spark deposited bronze were studied, Molybdenum, chromium, composite t15k6 and bronze on C45 steel under boundary lubrication conditions. The results showed that the molybdenum coating was the most stable, but the bronze coating had a lower friction coefficient in low load applications.

In more recent work [45], it was found that a metallic glass coating was uniformly formed on the stainless steel substrate. The samples with optimized coating were shown to exert lower cytotoxicity, better cell attachment, and higher blood compatibility than the stainless steel substrates.

In other work [46], the impact of laser modification on the

morphology and mechanical properties of carbide/copper coatings produced by electro-spark treatment was analyzed. The laser beam machining of ESD coatings led to the homogenization of chemical composition, fragmentation of the structure, and elimination of microcracks. Laser processing proved to have a positive effect on improving the adhesion of coatings and reducing their porosity. This paper also presents a simulation model of heat transfer processes for the case of laser radiation impact on a WC-Cu coating. The developed numerical model, describing the influence of laser treatment on the distribution of temperature fields in the heated material (at a given depth) is of significant importance in the development of treatment technologies. Laser-modified ESD coatings perform anti-wear and protective functions, which enable their potential application in means of transport such as rolling stock.

4. The future research direction of the ESD deposition technology

The electro-spark deposition technology is a new technology with special strengthening effect and unique technical value which has great potential in the future. The application of electro-spark deposition in the prevention, protection and repair of surface coatings has obvious effect on improving production efficiency and reducing cost.

At present, the scientific research worker has done the massive research work in the electro-spark deposition technology mechanism research, equipment development and application and has obtained many research results, but along with the modern industry development of the high speed and heavy load, the mechanical components service condition is worse, the surface damage form and the degree are complex serious day by day. Electro-spark deposition technology need to be applied in a wide range. But also the problem of thin deposition layer, large surface roughness, low deposition efficiency, poor process stability and reliability need to be solved. The existence of these problems greatly limits the expansion of the application field of this technology, so the future research direction of electro-spark deposition technology will mainly focus on the following aspects:

(1) To strengthen the research on the mechanism of electro-spark deposition technology which will play an important role in guiding the basic research, equipment manufacturing and application development of ESD. At present, the existing mechanism of electro-spark deposition still has great limitations, including the mechanism of electro-spark deposition discharge and electrode material transfer mechanism. Scholars have not yet reached a unified conclusion on this which requires researchers to further overcome the difficulties and form a complete theoretical system as soon as possible to support the promotion and application of electro-spark deposition technology.

(2) The new types of electro-spark deposition automatic equipments are needed to develop and improve the quality and stability of the coating and the deposition efficiency.

(3) Strengthen the research of ESD process parameters. The strengthening process of different electrode and matrix materials, multi-electrode strengthening process, the strengthening process of multi-electrode materials on the same surface and composite strengthening process were studied.

(4) The research of coating materials is mainly focused on cemented carbide and ceramic materials, but other materials with excellent performance are also worth to be studied.

(5) Combining other technologies with the electro-spark deposition technology and developing the composite treatment

technology to prepare the deposits with excellent performance may become the preferred process in the process of the development of this technology. Electro-spark deposition technology combines with ultrasonic technology, nano-technology, laser technology, plasma technology, magnetron sputtering, chemical heat treatment, thermal spraying, electroplating, brush plating, chemical plating, physical meteorology deposition, ion implantation and other technical means to deposit coatings with better performance. Electro-spark deposition technology combines with computer simulation, artificial neural network, fuzzy control, expert system, intelligent control, pattern recognition, genetic algorithm, ant colony algorithm, particle swarm algorithm and other advanced technologies to promote the continuous progress of electro-spark technology.

5. Conclusions

The electro-spark deposition technology can make the surface have high hardness, high wear resistance, high fatigue

strength, high corrosion resistance and oxidation resistance, high temperature resistance, ablation resistance and other special properties. It is believed that with the development of this new surface treatment technology, more and more people will devote themselves to the research of this technology and this technology will be widely used and play an important role in surface treatment. The research on the new technology of electro-spark deposition is an innovative and challenging research work which not only enriches the connotation of electro-spark deposition, but also has great significance for improving the processing and application level of advanced composite materials.

Notes

The authors declare no competing financial interest.

Acknowledgments

This work was financially supported by the Ministry of Education and Science of Ukraine (0116U002756) and the Joint Foundation of Henan Province, China (U1804142).

References

1. Enrique, P. D., Jiao, Z., Zhou, N. Y., & Ehsan, T. (2018). Dendritic Coarsening Model for Rapid Solidification of Ni-Superalloy Via Electrospark Deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, 258: 138-143. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.03.023>
2. Zhang, Y., Li, L., Chang, Q., Wang, X., Zhao, Y., Zhu, S., Xu, A., & Gao, X. (2021). Research Status and Prospect of Electro-Spark Deposition Technology. *Surface Technology*, 50(1): 150-161. doi: <https://doi.org/10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.01.012>
3. Zhang, J., Zhang, L., Liu, H., Rong, Y., Jiao, K., & Shi, Y. (2020). Microstructure and Degradability of Aluminum Alloy Repaired by Electro-Spark Deposition. *Surface Technology*, 49(10): 224-232. doi: <https://doi.org/10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.10.025>
4. Kuptsov, K.A., Sheveyko, A.N., & Manakova, O.S. (2020). Comparative Investigation of Single-layer and Multilayer Nb-doped TiC Coatings Deposited by Pulsed Vacuum Deposition Techniques. *Surface and Coatings Technology*, 385: 1-10.
5. Anisimov, E., Khan, A. K., & Ojo, O. A. (2016). Analysis of Microstructure in Electro-Spark Deposited IN718 Superalloy. *Materials Characterization*, 119: 233-240. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.07.025>
6. Tarel'nik, V. B., Konoplyanchenko, E. V., Kosenko, P. V., et al. (2017). Problems and Solutions in Renovation of the Rotors of Screw Compressors by Combined Technologies. *Chemical and Petroleum Engineering*, 53(7): 540-546. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0378-7>
7. Umanskyi, O. P., Storozhenko, M. S., Tarelnyk, V. B., Koval, O. Y., Gubin, Y. V., Tarelnyk, N. V., & Kurinna, T. V. (2020). Electrospark deposition of FeNiCrBSiC–MeB₂ coatings on steel. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 59(1), 57-67.
8. Geng, M., Wang, W., & Zhang, X. (2020). Microstructures and Properties of Ni/Ti(C,N) Composite Cermet Coating Prepared by Electrospark Deposition. *Surface Technology*, 49(4): 222-229. doi: <https://doi.org/10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.04.025>
9. Tarelnyk, V., & Martsynkovskyy, V. (2014). Upgrading of Pump and Compressor Rotor Shafts Using Combined Technology of Electroerosive Alloying. *Applied Mechanics and Materials*, 630: 397-412. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.630.397>
10. Varecha, D., Bronček, J., Kohár, R., Nový, F., Vicen, M., & Radek, N. (2021). Research of friction materials applicable to the multi-disc brake concept. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 647-661.
11. Tarel'nik, V. B., Paustovskii, A. V., & Tkachenko, Y. G. (2017). Electric-Spark Coatings on a Steel Base and Contact Surface for Optimizing the Working Characteristics of Babbitt Friction Bearings. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 53(3): 285-294. doi: <https://doi.org/10.3103/S1068375517030140>
12. Yu, H., Lin, Y., Chen, C., Nie, S., Peng, R., Yang, Y., & Yang, S. (2010). Research on the Character of NiCr Coating Deposited on 35CrMo Steel by the Electro-Spark Deposition. *Surface Technology*, 39(4): 5-7. doi: <https://doi.org/10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2010.04.014>
13. Tarelnyk, V., Konoplianchenko, I., Martsynkovskyy, V., Zhukov A., & Kurp P. (2018). Comparative Tribological Tests for Face Impulse Seals Sliding Surfaces Formed by Various Methods. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2019:382. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_40
14. Hayriye, E. E., & Batuhan, B. (2020). Effect of Cr-Ni Coated Cu-Cr-Zr Electrodes on the Mechanical Properties and Failure Modes of TRIP800 Spot Weldments. *Engineering Failure Analysis*, 110: 1-13.
15. Hassan, S., Mehdi, S., & Abbas, B. (2020). Fabrication, Microstructural Characterization and Mechanical Properties Evaluation of Ti/TiB/TiB₂ Composite Coatings Deposited on Ti6Al4V Alloy by Electro-spark Deposition Method. *Ceramics International*, 46(10): 15276-15284.
16. Lorenzo, M. F., Charles, C. K., & Norman, Y. Z. (2019). The Effect of Pulse Energy on the Defects and Microstructure of Electro-Spark-Deposited Inconel 718. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 50A: 1-10.
17. Zhang, R., Li, J., Xiao, M., Luo, B., & Guo, P. (2013). Research and Application of Micro Nanostructured Coating by Electro-spark. *Surface Technology*, 42(2): 108-111. doi: <https://doi.org/10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2013.02.035>

18. Gu, W., Ding, H., Di, P., & Zhu, S. (2010). Investigation on Turbulent Arc in the Process of Electric Spark Automatic Strengthening. *China Surface Engineering*, 23(6): 66-69. doi: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9289.2010.06.013>
19. Han, H., Guo, J., & Jiao, W. (2019). Discharge Mechanism of Electro-spark Deposition with Rotary Electrode. *Transactions of the China Welding Institution*, 40(5): 67-72. doi: <https://doi.org/10.12073/j.hjxb.2019400129>
20. Salmaliyan, M., Malek, G. F., & Ebrahimiya, M. (2017). Effect of Electro Spark Deposition Process Parameters on WC-Co Coating on H13 Steel. *Surface and Coatings Technology*, 321: 81-89. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.04.040>
21. Tarelnyk, V., Martsynkovskiy, V., & Konoplianchenko, I. (2012). Electroerosive Alloying Modes Optimization at Formation of a Special Microrelief on Bronze Sliding Bearings Friction Surfaces Selected Problems of Mechanical Engineering and Maintenance. *Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej*, 188:98-103.
22. Yuan, X., Guan, N., Hou, G., Chen, X., & Ma, S. (2020). Research Progress on Reliability and Preparation of High Temperature Solid Self-lubricating Coatings. *Materials Reports*, 34(3): 05061-05067. doi: <https://doi.org/10.11896/cldb.18110171>
23. Wang, J., Wang, D., Wang, X., Jia, Q., Chen, R., & Cui, Y. (2018). Property Improvement of Tin-based Babbitt B83 Based on Metallography Control. *Materials Science and Technology*, 26(5): 89-96. doi: <https://doi.org/10.11951/j.issn.1005-0299.20170368>
24. Cao, T., Sun, H., & Wang, X. (2017). Self-lubricating Coating Prepared by Electro-spark Deposition Using Electrode with Drilled Holes at End Face. *Journal of Materials Engineering*, 45(10): 88-94. doi: <https://doi.org/10.11868/j.issn.1001-4381.2016.000691>
25. Tarelnyk, V. B., Paustovskii, A. V., & Tkachenko, Y. G. (2017). Electrode Materials for Composite and Multilayer Electro-spark-Deposited Coatings from Ni-Cr and WC-Co Alloys and Metals. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 55(9): 585-595. doi: <https://doi.org/10.1007/s11106-017-9843-2>
26. Wang, X., Long, W., He, P., Jiu, Y., & Yang, C. (2019). Effect of Aging Treatment on Interfacial Microstructure and Mechanical Properties of Ni/Babbitt Alloy. *Transactions of the China Welding Institution*, 40(8): 113-117. doi: <https://doi.org/10.12073/j.hjxb.2019400218>
27. Raimondas, K., Audrius, Ž., & Artūras, K. (2016). A Study of Tribological Behaviour of W-Co and Cu Electro-spark Alloyed Layers under Lubricated Sliding Conditions. *Tribology International*, 103: 236-242.
28. Song, Z., Peng, Z., Yan, M., Li, Z., Dong, G., & Zhang, L. (2019). Effect of Fabrication Methods on Microstructures and Mechanical Properties of Tin-based Babbitt Bearings. *Chinese Journal of Rare Metals*, 38(6): 283-289. doi: <https://doi.org/10.13373/j.cnki.cjrm.XY19070031>
29. Korneev, P. K., Sheveyko, A. N., Shvindina, N. V., Levashov, E. A., & Shtansky, D.V. (2018). Comparative Study of Ti-C-Ni-Al, Ti-C-Ni-Fe and Ti-C-Ni-Al/Ti-C-Ni-Fe Coatings Produced by Magnetron Sputtering, Electro-Spark Deposition and a Combined Two-Step Process. *Ceramics International*, 44(7): 7637-7646. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.01.187>
30. Penyashki, T., Kostadinov, G., Morteve, I., & Dimitrova, E. (2017). Investigation of Properties and Wear of WC, TiC and TiN Based Multilayer Coatings Applied onto Steels C45, 210CR12 and HS6-5-2 Deposited by Non-Contact Electrospark Process. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 23(2): 325-342.
31. Chen, Y., Yu, M., Cao, K., & Chen, H. (2021). Advance on Copper-based Self-lubricating Coatings. *Surface Technology*, 50(2): 91-100. doi: <https://doi.org/10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.02.010>
32. Hao, Y., Wang, J., Yang, P., Wang, Y., Liang, X., & Gao, J. (2020). Microstructures and Properties of Tin-Based Babbitt Metal Prepared by Laser Cladding Deposition. *Chinese Journal of Lasers*, 47(8): 1-10. doi: <https://doi.org/10.3788/CJL202047.0802009>
33. Hang, Z., Chang, G., & Xiao, W. (2019). A Novel Method to Fabricate Composite Coatings Via Ultrasonic-assisted Electro-spark Powder Deposition. *Ceramics International*, 45(17): 22528-22537.
34. Wang, L., Cao, G., Ma, X., & Yang, S. (2017). Preparation of NiCrAlY Coating Electro-Spark Deposited on GH4169 Alloy. *Transactions of the China Welding Institution*, 38(7): 104-108. doi: <https://doi.org/10.12073/j.hjxb.20150917001>
35. Xu, A., Wang, X., Zhu, S., Chang, Q., Yuan, X., & Zhou, K. (2019). Microstructure and Wear Resistance of TiN Coating Synthesized by ESD with Cluster Electrode. *China Surface Engineering*, 32(3): 1-8. doi: <https://doi.org/10.11933/j.issn.1007-9289.20180727001>
36. Wei, X., Chen, Z., Zhong, J., Huang, Q., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2018). Influence of Deposition Atmosphere on Structure and Properties of Mo₂FeB₂-Based Cermet Coatings Produced by Electro-Spark Deposition. *Rare Metal Materials and Engineering*, 47(4): 1199-1204.
37. Huang, Q., Chen, Z., Wei, X., Wang, L., Hou, Z., & Yang, W. (2017). Effects of Pulse Energy on Microstructure and Properties of Mo₂FeB₂-based Cermet Coatings Prepared by Electro-spark Deposition. *China Surface Engineering*, 30(3): 89-96. doi: <https://doi.org/10.11933/j.issn.1007-9289.20170106002>
38. Hong, X., Feng, K., Tan, Y. F., Wang, X., & Tan, H. (2017). Effects of Process Parameters on Microstructure and Wear Resistance of TiN Coatings Deposited on TC11 Titanium Alloy by Electrospark Deposition. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(8): 1767-1776. doi: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60199-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60199-7)
39. Xu, A., Wang, X., Zhao, Y., Zhu, S., & Han, G. (2020). Experiments on ESD-Heating Remelting, Rolling Dressing. *China Mechanical Engineering*, 31(14): 1741-1746. doi: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-132X.2020.14.014>
40. Wei, H., Chu, W., Lin, T., & He, P. (2015). Numerical Simulation of Temperature Field of WC-12Co Coating by Monopoles Electro Spark Deposition. *Transactions of the China Welding Institution*, 36(3): 35-38.
41. Tarelnyk, V., Martsynkovskyy, V., & Dziuba, A. (2014). New Method of Friction Assemblies Reliability and Endurance Improvement. *Applied Mechanics and Materials*, 630: 388-396. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.630.388>
42. Xu, A., & Liu, Z. (2014). Study of the Ti N Coating Synthesized by EDM of Flexible Titanium Electrode. *Transactions of the China Welding Institution*, 35(2): 23-27.

43. Pliszka, I., & Radek, N. (2017). Corrosion Resistance of WC-Cu Coatings Produced by Electrospark Deposition. *Procedia Engineering*, 192: 707-712. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.122>
44. Padgurskas, J., Kreivaitis, R., Rukuiža, R., Mihailov V., Agafii V., Kriūkienė R., & Baltušnikas A. (2017). Tribological Properties of Coatings Obtained by Electro-spark Alloying C45 Steel Surfaces. *Surface and Coatings Technology*, 311: 90-97. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.12.098>
45. Afsaneh, E., Seyed, A. G., & Maryam, N. (2021). Biocompatibility Assessments of 316L Stainless Steel Substrates Coated by Fe-based Bulk Metallic Glass Through Electro-Spark Deposition Method. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 198: 1-9.
46. Norbert, R., Jacek, P., & Aneta, G. M. (2020). The Morphology and Mechanical Properties of ESD Coatings before and after Laser Beam Machining. *Materials*, 13: 1-17.

Чжан Чженчуань, Сумський національний аграрний університет (Україна)

Лю Гуаньцзюнь, Школа машинобудування та електротехніки, Хенанський інститут науки і технологій (Китай)

Коноплянченко Є.В., Сумський національний аграрний університет (Україна)

Тарельник В.Б., Сумський національний аграрний університет (Україна)

Ге Чжицин, CCCC First Highway Engineering Group Xiamen Engineering Co., LTD (Китай)

Ду Сінь, Сумський національний аграрний університет (Україна); Хенанський інститут науки і технологій (Китай)

Огляд технології електроіскрового легування

Технологія електроіскрового легування – це новий метод відновлення та зміцнення поверхні металевих матеріалів. Перевагами цього методу є просте обладнання, зручність експлуатації та широкий діапазон застосування. Леговане покриття має більш високу зносостійкість, хорошу стійкість до корозії, відмінні характеристики тертя та інші особливі властивості, тому має кращу практичну цінність і широку перспективу застосування. У цій роботі ознайомлюються з характеристиками та принципом технології електроіскрового легування, аналізуються стан досліджень цієї технології та вказується напрямок подальшого розвитку цієї технології.

Ключові слова: електроіскрове легування; поверхня; покриття; особливі властивості.

Дата надходження до редакції: 27.05.2021

КОНСТРУКЦІЯ КЛІМАТИЧНОЇ КАМЕРИ З ОСВІТЛЕННЯМ, АДАПТОВАНИМ ДЛЯ ВИРОЩУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

Шелест Микола Сергійович

асистент

Сумський національний аграрний університет

ORCID: 0000-0001-5722-8944

e-mail: koladj1992@gmail.com

Дацько Оксана Миколаївна

аспірантка

Сумський національний аграрний університет

ORCID: 0000-0001-9610-3087

e-mail: datsko.oksana.nikol@gmail.com

Захарченко Єліна Анатоліївна

кандидат сільськогосподарських наук, доцент

ORCID: 0000-0002-9291-3389

e-mail: elionapolis@gmail.com

В останні роки в Україні та світі з'являється все більше тепличних комплексів. Збільшення їх кількості потрібне задля забезпечення людства продуктами харчування, так як населення землі щороку зростає. Для вирощування рослин у закритому ґрунті та із застосуванням аеропоніки потребує контрольованих умов із створенням оптимального середовища росту та розвитку. Проведення вегетаційних дослідів у гроубоксах також дозволяють отримати повноцінні дані щодо вивчення генотипів рослин, ефективності добрив, біопрепаратів і т.і. Одним із питань, що потребує додаткового вивчення, є дослідження щодо обрання найбільш придатного джерела освітлення для вирощування рослин, зокрема, сільськогосподарських. Відповідно, було спроектовано та побудовано кліматичну камеру об'ємом 1,44 м³, висотою 2 м з метою здійснювати дослідження рослин. Для контролю абіотичних факторів в ній використовуються такі датчики як YL-38+YL-69 та HTU-21, для освітлення - світлодіоди моделі ST-12-5050-60-RGB-65 та люмінесцентна лампу DeLux T8 36/33. Програму для контролю клімату було створено за допомогою "Arduino IDE". Показана відмінність створеної кліматичної камери у більш швидкій заміні джерел освітлення. Встановлено переваги та недоліки джерел освітлення, що використовуються у середовищах з контрольованими умовами для вирощування рослин. Наведено приклади інших гроубоксів, фітотронів та кліматичних камер, що використовуються для вирощування культур.

Ключові слова: теплиця, світлодіоди, флуоресцентна лампа, гроубокс, фітотрон, закритий ґрунт, інтенсивність світла

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.11>

Вступ. Із зростанням населення на планеті та підвищенням попиту на свіжу овочеву продукцію протягом всього року, спостерігається збільшення кількості тепличних комплексів. Оскільки цілями сталого розвитку передбачено подолати голод та відповідально споживати енергоресурси (ціль №9 "Інновації та інфраструктура"), дослідниками з усього світу було запропоновано певні удосконалення системи освітлення теплиць чи кліматичних камер, що дасть можливість зменшити використання електроенергії та підвищити продуктивність рослин за рахунок використання необхідних спектрів освітлення.

Питання впливу інтенсивності освітлення та фотоперіоду на проростання, подальший розвиток рослини, формування генеративних органів є вагомим у плані удосконалення вивчення доцільності проведення вегетаційних дослідів та покращення умов вирощування у контрольованих умовах (Mayeux et al., 1993; Evtushenko E.V. & Chekurov V.M., 2008; Massa et al. 2016; Porter et al., 2015; Semenova N. A. et al., 2020; Zabel et al., 2014). Важливим при створенні штучних умов вирощування контролювати відстань від джерела освітлення та рослинами (Niinemets Ülo & Keenan Trevor, 2012).

В теплицях використовуються різні джерела освітлення: металогалогенні лампи, натрієві лампи високого і низького тиску, флуоресцентні лампи, світлодіоди (LED) та ін. (Katagiri et al. 2015; Svistunov & Bevza, 2017). Кожне із цих видів освітлення має свої переваги та недоліки. Так, наприклад, натрієві лампи високого тиску забезпечують необхідне фотосинтетичне випромінювання, а також виділяють тепло під час роботи, що можна вважати як плюсом (економія теплової енергії), так і мінусом (опіки листя рослин). Недоліком натрієвих ламп є недостатнє випромінювання червоного і синього спектрів (Gomez et al., 2013, Kowalczyk et al., 2020). Флуоресцентні лампи, хоч і є одними із найпопулярніших для використання у тепличних комплексах (Dutta Gupta, 2017), не є енергоефективними та мають короткий термін служби (Meng & Runkle, 2016). На відміну від інших видів освітлення, світлодіоди набирають все більшу популярність. Їх перевагою є те, що вони не гріються під час роботи, що дає можливість розташовувати їх доволі близько до поверхні рослини (Katzin et al., 2020). Енергоефективність світлодіодів можна забезпечити за рахунок використання у тепличних комплексах чи кліматичних камерах лише червоного і синього спектрів освітлення (Choong et al., 2018).

Тому, метою нашого дослідження є проектування кліматичної камери, що буде слугувати для проведення експериментів, результати яких можна буде надалі використовувати у промислових об'єктах і буде відрізнятися швидкою заміною джерел освітлення, що удосконалив процес проведення досліджень за рахунок можливості вивчення впливу різного освітлення на біологічні об'єкти.

Матеріали і методи досліджень. Проектування кліматичної камери і створення схеми взаємодії електричних

компонентів здійснювалось за допомогою програми "КОМПАС".

Електронне керування функціоналом кліматичної камери здійснюється мікроконтролером Arduino та необхідними датчиками і компонентами (табл. 1).

Програма, що здійснює керування всім функціоналом кліматичної камери, була створена за допомогою програми "Arduino IDE" (рис. 1).

Таблиця 1. Компоненти, що використовуються для контролю клімату та освітлення у кліматичній камері

| № п/п | Назва компонента | Функція |
|-------|---------------------------|---|
| 1. | Мікроконтролер Arduino | Керування датчиками та світловими модулями |
| 2. | Датчик YL-38+YL-69 Модуль | Вимірювання вологості ґрунту |
| 3. | Датчик HTU-21 | Вимірювання температури і вологості повітря |
| 4. | ST-12-5050-60-RGB-65 | Освітлення над полицю |
| 5. | DeLux T8 36/33 | Освітлення, розташоване на полиці |

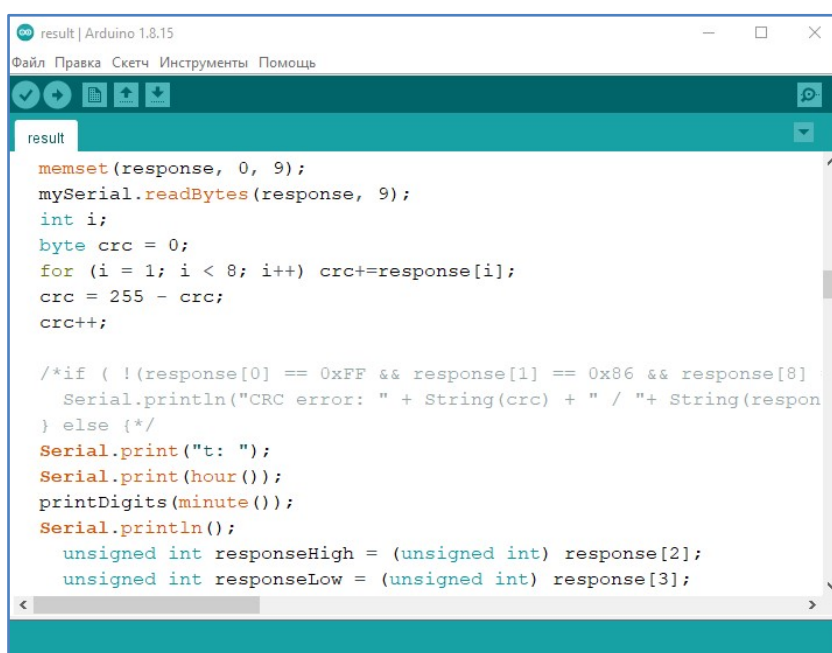


Рис. 1. Інтерфейс програми "Arduino IDE"

Результати. Розмір сконструйованої кліматичної камери є 2 × 1,2 × 0,6 м, або 1,44 м³. Конструкцію побудовано із OSB, товщина якого 10 мм та утеплено полотном Мегаф з одностороннім фольгуванням ППЕ-Л тип FP товщиною 5 мм. В процесі проектування кліматичної камери (рис. 2) враховувались вимоги рослин до умов вирощування. Для підтримання необхідної температури у камері у холодний період без опалення, камеру обладнано системою обігріву, що складається з тону і вентилятора. Можливість регулювання температури до необхідної, яку потребує певна культура, керується за допомогою комп'ютера, тобто датчик температури повітря у кліматичній камері відслідковує нижню межу, що необхідно підтримувати; при перетині цієї межі комп'ютер дає команду працювати нагрівальному елементу, коли необхідної температури досягнуто, нагрівальний елемент вимикається. Під час роботи системи обігріву тепле повітря подається по трубі у кліматичну камеру, де розгалужується для рівномірного підігріву всієї камери. Повітря до кліматичної ка-

мери подається за температури не більше ніж 50°C, щоб уникнути перегрітих зон та опіків рослин. Тен також має систему захисту, яка складається з теплового запобіжника та системи стабілізації температури тена.

Задля забезпечення рослин вологою встановлено систему зрошення. Вона складається з резервуару для води, насоса, розподільника і тонких трубочок для мікрокрапельного зрошення. Полив відбувається тоді, коли датчик вологи ґрунту передає комп'ютеру, що вологість менша за необхідну. Для видалення надлишкової вологи, що випаровується із ґрунту, реалізується система вентиляції. У разі необхідності, і для більш зручного проведення агрономічних досліджень, є опційна можливість встановлення додаткової полицки, що також матиме своє освітлення.

Найважливішою функцією, що відрізняє дану кліматичну камеру від інших, є можливість заміни джерела освітлення для проведення досліджень. Наразі, задля проведення досліду з порівняння впливу на культури флуоресцентних

ламп і монохромних червоно-синіх світлодіодів, у верхню частину кліматичної камери встановлено світлодіоди, а на полицю встановлено флуоресцентну лампу. Таким чином, проведення дослідів буде більш достовірним, адже проходить за

однакових умов. Для ізоляції одного джерела світла від іншого, полиця, що встановлена у кліматичній камері, повністю вкрита світлонепроникним матеріалом.

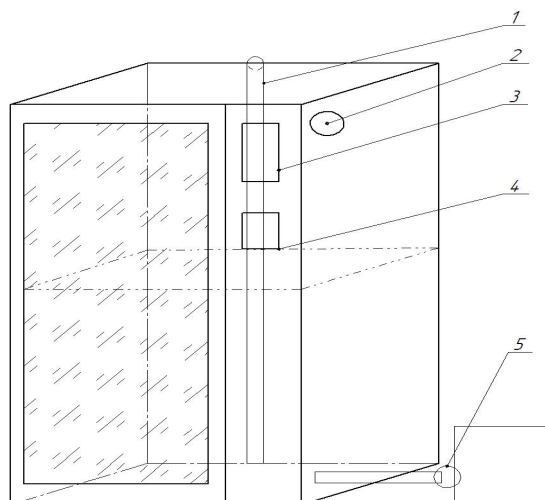


Рис. 2. Схема кліматичної камери, де 1 - система опалення; 2 - система вентиляції; 3 - щит електричного керування; 4 - комп'ютер; 5 - система зрошення.

Обговорення. Безперечно, кліматичні камери, або як їх ще називають фітотрони чи гроубокси, вже були реалізовані. Так, наприклад, було створено фітотрон для дослідження впливу різних видів світлодіодів. Дана експериментальна установка має поділ на 4 міні-камери і кожна з них має лише один вид вмонтованих світлодіодів: червоні, сині, білі або RGB. Цей фітотрон відрізняється від кліматичної камери тим, що передбачено можливість використання лише цього виду освітлення (Chervinskyi & Lutsak, 2014; Lutsak & Chervinskyi, 2014).

У Київському політехнічному інституті ім. І. Сікорського було реалізоване програмне забезпечення для керування функціоналом гроубоксів. Але дана програма пристосована для використання в якості системи обігріву термоелементу Пельтьє, для контролю вологості ґрунту - емнісний датчик вологості ґрунту v1.2., а для визначення температури і вологості повітря датчик - DHT 11 чи DHT 22. Всі дані, що були зняті датчиками у гроубоксі, користувач може побачити у себе на робочому комп'ютері, оскільки ці дані передаються на спеціальний сервер в Інтернеті (Kotsiurba, 2020). Схожу програму та подібні датчики вже було зроблено вченими університету Гунадарми (Vernandhes et al., 2016). Повністю автоматизовану систему, що здатна контролювати абіотичні фактори вирощування рослин, було створено на базі мікроконтролера Raspberry Pi вченими Каліфорнійського державного університету, відмінністю від попередніх систем є присутність в системі гідропоніки та застосування іншого мікроконтролера (Palande et al., 2018). Схожий гроубокс на гідропоніці було сконструйовано вченими з Національного технологічного інституту у місті Бандунг (Індонезія). Вчені створили

додаток для мобільного телефону, що дає можливість контролювати параметри, за яких зростають рослини на відстані (Hilmy et al., 2021).

Працівниками Коледжу інтегрованої науки і Технічного університету Джеймса Медісона було створено систему для вирощування мікрозелені у контрольованому середовищі. Даний проект займає неймовірні масштаби та має використовуватися не задля проведення досліджень вченими, а для забезпечення населення необхідними продуктами харчування у разі стихійного лиха чи іншої надзвичайної ситуації. Рослини у цьому гроубоксі вирощуються за допомогою гідропоніки та використання фітоламп (LED). Цікавим є той факт, що ця технологія повністю працює на відновлюваних джерелах енергії (Trawick et al., 2018).

Загальну класифікацію комплексів для досліджень з біологічними об'єктами наводить Беспалов І.М. Вони поділяються за призначенням на фітотрони, зоотрони, інсектрони та універсальні (біотрони) (Bespalov, 2007). Втім, у цій класифікації не включено кліматичних камер для досліджень деревини. Аналізом необхідних компонентів для створення таких кліматичних камер займався Борисов В.М. (Borysov, 2013).

Висновки. Кліматична камера, що була розроблена, відрізняється від інших фітотронів та гроубоксів можливістю швидкої заміни джерела освітлення, що дає можливість вченим проводити більш широкі та ґрунтовні дослідження з впливу різних видів ламп на сільськогосподарські культури.

Подяка. Ми вдячні за підтримку чеського уряду, надану Міністерством закордонних справ Чеської Республіки, що дозволило розпочати це наукове дослідження в рамках проекту «Міжвузівське співробітництво як інструмент підвищення якості вибраних університетів України».

Список використаної літератури.

1. Bepalov, I. M. (2007). Laboratorni klimatichni kompleksi dlia doslidiv z biolohichnymu ob'ektyamy [Laboratory climatic complexes for experiments with biological objects]. *Zbirnyk naukovykh prats Instytutu tsukrovyykh buriakiv UAAN*, 9, 300-306 (in Ukrainian).

2. Borysov, V. M. (2013). Osoblyvosti struktury ta konstruksii klimatychnoi kamery dlia doslidzhennia derevyny [Features of the structure and construction of the climatic chamber for the study of wood]. *Pratsi Odeskoho politekhnichnoho universytetu*, 2(41), 89-94 (in Ukrainian).
3. Chervynskiy, L. S., & Lutsak, Ya. M. (2014). Eksperymentalna ustanovka dlia doslidzhennia vplyvu zminy spektru optychnoho vyrominiuvannia na zrostantnia teplychnykh roslyn [Experimental setup to study the effect of changes in the spectrum of optical radiation on the growth of greenhouse plants]. *Enerhetyka i avtomatyka*, 4, 119-125 (in Ukrainian).
4. Choong, T.W., He, J., Qin, L., & Lee, S.K. (2018). Quality of supplementary LED lighting effects on growth and photosynthesis of two different *Lactuca recombinant inbred lines* (RILs) grown in a tropical greenhouse. *Photosynthetica*, 56(4), 1278-1286. <https://doi.org/10.1007/s11099-018-0828-2>
5. Dutta Gupta, S. (Ed.). (2017). *Light Emitting Diodes for Agriculture: Smart Lighting*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-5807-3>
6. Gomez, C., Morrow, R.C., Bourget, M., Massa, G.D., & Mitchell, C.A. (2013). Comparison of Intracanopy Light-emitting Diode Towers and Overhead High-pressure Sodium Lamps for Supplemental Lighting of Greenhouse-grown Tomatoes. *Hort Technology*, 23(1), 93-98. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.23.1.93>
7. Hilmy, R. H., Susana, R., & Hadiatna, F. (2021). Rancang Bangun Smart Grow Box Hidroponik untuk Pertumbuhan Tanaman Microgreen Berbasis Internet of Things. *Power Elektronik: Jurnal Orang Elektro*, 10(2), 41-47.
8. Evtushenko E. V. & Chekurov V. M. (2008). Duration of ontogenesis phases and some elements of ear productivity in summer soft wheat (*Triticum aestivum* L.) in connection with lighting intensity and photoperiod. *Agricultural biology* (in Russian), 1, 60-64.
9. Katagiri F., Canelon-Suarez D., Griffin K., Petersen J., Meyer R.K., Siegle M., et al. (2015). Design and Construction of an Inexpensive Homemade Plant Growth Chamber. *PLoS ONE* 10(5): e0126826. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126826>
10. Katzin, D., Mourik, S. v., Kempkes, F., & Henten, E.J. v. (2020). GreenLight – An open source model for greenhouses with supplemental lighting: Evaluation of heat requirements under LED and HPS lamps. *Biosystems Engineering*, 194, 61-81. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.03.010>
11. Kotsiurba V. V. (2020). Avtomatyzovana systema vyroshchuvannia roslyn, chutlyvykh do abiotychnykh faktoriv [Automated system for growing plants sensitive to abiotic factors]. Bakalavrskyi diplomnyi proiekt KPI im. Ihoria Sikorskoho (in Ukrainian). Excess mode: <https://ela.kpi.ua/simple-search?query=%D0%9A%D0%BE%D1%86%D1%8E%D1%80%D0%B1%D0%B0+%D0%92>
12. Kowalczyk, K., Olewnicki, D., Mirgos, M., & Gajc-Wolska, J. (2020). Comparison of Selected Costs in Greenhouse Cucumber Production with LED and HPS Supplemental Assimilation Lighting. *Agronomy*, 10(9), 1342. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091342>
13. Lutsak, Ya. M., & Chervynskiy, L. S. (2014). Ustanovka dlia doslidzhennia dii spektru optychnoho vyrominiuvannia na teplychni roslyny [Installation for studying the effect of the spectrum of optical radiation on greenhouse plants]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka*, 153, 128-129 (in Ukrainian).
14. Massa G.D., Wheeler R.M., Morrow R.C., & H.G. Levine (2016). Growth Chamber on the International Space Station for Large Plants. NASA Technical Reports Server. <https://core.ac.uk/reader/42695794>
15. Mayeux H. S., Johnson H. B., Polley H. W., Dumesnil M. J. & Spanel G. A. (1993). A Controlled Environment Chamber for Growing Plants Across a Subambient CO₂ Gradient. *Functional Ecology*, 7(1), 125-133. <https://doi.org/10.2307/2389875>
16. Meng, Q., & Runkle, E.S. (2016). Control of Flowering Using Night-Interruption and Day-Extension LED Lighting. In K. Fujiwara, T. Kozai, & E. S. Runkle (Eds.), *LED Lighting for Urban Agriculture*, 191-202. Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0_14
17. Niinemets Ülo, Keenan Trevor (2012). Measures of Light in Studies on Light-Driven Plant Plasticity in Artificial Environments. *Frontiers in Plant Science*, 3, 156 p. <https://doi.org/10.3389/fpls.2012.00156>
18. Palande, V., Zaheer, A., & George, K. (2018). Fully Automated Hydroponic System for Indoor Plant Growth. *Procedia Computer Science*, 129, 482-488. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.03.028>
19. Porter A.S., Gerald C. Evans-Fitz, McElwain J.C., Yiotis C., Elliott-Kingston C. (2015). *Plant Methods*, 11:44. doi: 10.1186/s13007-015-0088-0
20. Semenova N. A., Grishin A. A., Dorokhov A. A. (2020). Analytical review of climatic chambers for vegetable crops growing. *Bulletin NGIEI*, 1 (104), 5–15.
21. Svistunov, S. V. & Bevza, O. M. (2017). Systemy osvittlenia teplychnykh kompleksiv [Lighting systems for greenhouses]. *Materialy XI-yi naukovy-praktychnoi konferentsii «Perspektyvni napriamky suchasnoi elektroniky»*, KPI im. Ihoria Sikorskoho, 232-237 (in Ukrainian).
22. Trawick, E.D., Stinson, W.J., & Martin, A.C. (2018). Energy modeling & design of prototype hydroponic grow system. *JMU Scholarly Commons*, 2010-2019, 517.
23. Tsili staloho rozvytku [Sustainable development goals]. Excess mode: <https://www.ua.undp.org/content/ukraine/uk/home/sustainable-development-goals.html> (in Ukrainian)
24. Vernandhes, W., Salahuddin, N.S., & Kowanda, A. (2016). Smart Growbox Design with Temperature and Humidity Monitoring System via the Internet. *Teknoin*, 22(11), 850-859.
25. Zabel P., Bamsey M., Schubert D., Tajmar M. (2014). Review and analysis of plant growth chambers and greenhouse modules for space. *International Conference on Environmental Systems*, 13-17 July 2014, Tucson, Arizona.

Shelest M.S., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Datsko O.M., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Zakharchenko E.A., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Construction of the climate chamber with the lighting adapted for growing of agricultural crops

In recent years, more and more greenhouse complexes are appearing in Ukraine and around the world. An increase in their number is needed to provide humanity with food, as the world's population grows every year. For growing plants indoors and using aeroponics requires controlled conditions to create an optimal environment for growth and development. Carrying out vegetation experiments in growboxes also allows to obtain complete data on the study of plant genotypes, the effectiveness of fertilizers, biological products, etc. One of the issues that need to observe is the study of choosing the most suitable light source for growing plants, in particular, crop. Thereby, a climate chamber with a volume of 1.44 m³ and a height of 2 m was designed and constructed to study plants. For control of abiotic factors, such sensors have been used as YL-38 + YL-69 and HTU-21, for lighting - LEDs model ST-12-5050-60-RGB-65 and fluorescent lamp DeLux T8 36/33. The climate control program was developed using the Arduino IDE. The difference between the created climate camera and existed cameras is in possibility of faster replacement of light sources. The advantages and disadvantages of light sources used for growing plants under controlled conditions are shown. Examples of other growboxes, phytotrons and climate chambers used for growing crops are given.

Key words: green house, LEDs, fluorescent lamp, growbox, phytotron, indoor ground, light intensity

Дата надходження до редакції: 27.05.2021

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА РОБОТИ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ПРИ ЗБИРАННІ ПШЕНИЦІ ПО КРИТЕРІЮ ВИТРАТ ПАЛИВА

Барабаш Григорій Іванович

кандидат технічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-1075-479X
e-mail: barabashgi@ukr.net

Мікуліна Марина Олександрівна

кандидат економічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-6918-5192
e-mail: marinamikulina1@ukr.net

Поливаний Антон Дмитрович

студент
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-8363-7186
e-mail: polivanui1@gmail.com

В запропонованій статті наведені методичні підходи стосовно визначення основних техніко-експлуатаційних показників вантажних автомобілів та автопоїздів при транспортуванні зерна від комбайна при збиранні озимої пшениці, що дає можливість визначити в подальшому безпосередньо ефективність їх використання в виробничих умовах.

Ключові слова: пшениця, збирання, комбайн, автомобіль, автопоїзд, швидкість руху, продуктивність, витрати палива.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.12>

Постановка проблеми. Проблема полягає в тому, що при відсутності в господарстві нормативів на показники використання автотранспорту при перевезенні зерна від комбайна, то ці показники можна визначити аналітичним шляхом і використати їх для оплати праці виконавців та списання палива.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Із підручників та інших літературних джерел по машиновикористанню у рослинництві відомо, як визначаються показники використання автомобільного транспорту при відомих їх технічних характеристиках та умовах їх використання при збиранні різних зернових культур. Однак, аналітичних досліджень стосовно того як насправді визначаються зазначені показники в конкретних умовах нами виявлено не було.

Формулювання цілей статті та мета досліджень. Надати методичні підходи по визначенню основних техніко-експлуатаційних показників і, зокрема продуктивність та витрати палива вантажних автомобілів та автопоїздів при транспортуванні зерна від зернозбиральних комбайнів при збиранні пшениці, що дасть можливість дати їм порівняльну оцінку та більш правильно організувати їх роботу в виробничих умовах. Розглянемо це на конкретному прикладі.

Вихідні дані:

Зернозбиральний комбайн ПАЛЕССЕ GS 12.(рис.1)

Вантажний автомобіль КамАЗ – 45143-11 (рис.2)

Автомобільний причіп НЕФА3-8560-02 (рис.2)

Розміри поля: площа поля $F=200$ га; довжина $L=2000$ м; ширина $B=1000$ м.

Рівень врожайності зерна, $У_з = 75$ ц/га = 7,5 т/га

Загальна відстань перевезень – $l_n = 4$ км. В т.ч.:

- виробничою територією – 0,5 км;

- по трасі – 2,5 км;
- по полю.- 1 км. (половина довжини поля)

Варіанти:

А – автомобіль без причепа;

Б – автомобіль з причепом (автопоїзд).



Рис.1.Зернозбиральний комбайн ПАЛЕССЕ GS 12

Техніко-експлуатаційні показники використання комбайна наведені в таблиці 1, які визначені за відомими формулами [1,2,3,4].

Послідовність розрахунків.

1. Тривалість заповнення бункера зерном, t_6 , год.

$$t_6 = m_6 / \omega_0 \quad (1)$$

де m_6 – маса зерна в бункере, т. $m_6 = 5,3$ т;

ω_0 – продуктивність комбайна за 1 год. основного часу,
 $\omega_0 = 21,8$ т/год.

Тоді $t_6 = 0,24$ год.



Рис.2. Автопоїзд КамАЗ – 45143-11+ НЕФАЗ-8560-02

Таблиця 1. Показники використання комбайна

| № п/п | Показники | Одиниці виміру | Значення показників |
|-------|---|----------------|---------------------|
| 1 | Продуктивність за 1 год. основного часу | т/год. | 21,8 |
| 2 | Робоча швидкість | км/год | 3,8 |
| 4 | Продуктивність за одну годину змінного часу | т/год. | 20,3 |

2. Шлях заповнення бункера зерном, l_6 , год.

$$l_6 = V_p \cdot t_6 \quad (2)$$

Після підрахунків $l_6 = 0,91 \text{ км} = 910 \text{ м.}$, що приблизно дорівнює половині довжини поля. Показники l_6 , t_6 потрібні водію автомобіля для орієнтури в просторі і в часі по відношенню до комбайна.

3. Тривалість циклу вантажного автомобіля (автопоїзда), $t_{\text{ц}}$ складається з наступних елементів: холостий рух автомобіля (виїзд з виробничої території, рух по трасі, в'їзд на поле); завантаження зерном; очікування чергового завантаження; рух завантаженого автомобіля (виїзд з поля, рух по трасі, в'їзд на виробничу територію), зважування та розвантаження автомобіля:

$$t_{\text{ц}} = t_{6\text{в}} + t_3 + t_{03} + t_{p3} + t_6 + t_{3p} \quad (3)$$

де $t_{6\text{в}}$ – тривалість руху автомобіля без вантажу, год.;

t_3 – тривалість завантаження кузова автомобіля зерном, год.;

t_{03} – тривалість очікування чергового завантаження, год.;

t_{p3} – тривалість руху автомобіля між черговими завантаженнями, год.;

t_6 – тривалість руху автомобіля з вантажем, год.;

t_{3p} – тривалість зважування та розвантаження, год.;

3.1 Тривалість руху без вантажу, $t_{6\text{в}}$, год.:

$$t_{6\text{в}} = l_n / V_n + l_{an} / V_{an} + l_e / V_e \quad (4)$$

Швидкість руху автомобіля без вантажу:

- по полю – 30 км/год.;

- по асфальтовій дорозі – 70 км/год.;

- по виробничій території – 5 км/год.

Для обох варіантів приймемо $t_{6\text{в}} = 0,17$ год.

3.2 Тривалість завантаження автомобіля зерном (вивантажування бункера, коли комбайн зупиняється, очікує тра-

нспортний засіб (1хв.) і вивантажує зерно (2 хв.), то для одного бункера $t_n = 3 \text{ хв.} = 0,05$ год.

Варіант А: $t_n = 6 \text{ хв.} = 0,1$ год.

Варіант Б: $t_n = 12 \text{ хв.} = 0,2$ год.

Тривалість руху автомобіля між черговими завантаженнями, t_{p3} , год.;

$$t_{p3} = l_{p3} / V_n \quad (5)$$

де l_{p3} – відстань між черговими заправками, км. $l_{p3} = l_6$.

Варіант А: $t_{p3} = 0,91$ км. Варіант Б: $t_{p3} = 0,91 \cdot 3 = 2,73$ км.

Варіант А: $t_n = 0,05$ год. Варіант Б: $t_{p3} = 0,14$ год.

3.3. Тривалість руху з вантажем t_6 , год.

Складається із: виїзду за межі поля l_n ($l_n = 1$ км половина довжини поля), рухові по дорозі з асфальтовим покриттям l_{an} ($l_{an} = 2,5$ км), рухові господарською територією l_e ($l_e = 0,5$ км), год.:

$$t_6 = l_n / V_n + l_{an} / V_{an} + l_e / V_e \quad (6)$$

Швидкість руху автомобіля з вантажем: по полю – 20 км/год., по асфальтовій дорозі – 60 км/год., по господарській території – 5 км/год.

Для обох варіантів приймемо $t_6 = 0,19$ год.

3.4. Очікування чергового завантаження кузова автомобіля дорівнює тривалості заповнення бункера зерном t_6 .

Варіант А $t_n = 0,24$ год. (один бункер)

Варіант Б $t_n = 0,72$ год. (три бункери)

Підрахунки показують, що тривалість рейсу автомобіля-самоскида та тривалість заповнення бункера комбайна зерном практично співпадають. Тобто, для обслуговування зернозбирального комбайна марки ПАЛЕССЕ GS 12 достатньо мати один автомобіль марки КамАЗ – 45143-11. Ті декілька хвилин (близько двох хвилин), протягом яких комбайн буде очікувати транспорт, потрібні комбайнеру для огляду комбайна або перевірки якості обмолоту.

3.5. Спостереження в виробничих умовах свідчать, що на зважування транспортного засобу та вивантаження зерна з кузова триває близько 5 хв.

Для обох варіантів приймемо $t_{3p} = 0,08$ год.

Тоді загальна тривалість циклу буде дорівнювати:

Варіант А: $t_{\text{ц}} = 0,83$ год. Варіант Б: $t_{\text{ц}} = 1,50$ год.

4. Продуктивність транспортного засобу $\omega_{\text{ц}}$, т/год.

$$\omega_{\text{ц}} = m_6 \cdot n_6 / t_{\text{ц}} \quad (7)$$

де n_6 – кількість вивантажень зерна із бункера.

Варіант А: $\omega_u=12,8$ т/год. Варіант Б: $\omega_u=14,1$ т/год.
5. Кількість рейсів за зміну n_u :

$$n_p = T_{зм} / t_u \quad (8)$$

При тривалості зміни, $T_{зм} = 10$ год.-

Варіант А: $n_u = 12$; Варіант Б: $n_u = 7$.

6. Перевезено зерна за зміну, $m_{зм}$, т:

Варіант А: $m_{зм}=127,2$ т. Варіант Б: $m_{зм}=148,4$ т.

Потужність двигуна автомобіля при виконанні транспортних процесів витрачається на: привід механізмів трансмісії, перекочування автомобіля.

7. Втрати потужності в трансмісії, кВт:

$$N_{mp} = N_{ен} \cdot (1 - \eta_{mp}), \quad (9)$$

де $N_{ен}$ – номінальна ефективна потужність двигуна, кВт.
 $N_{ен}=176$ кВт.

η_{mp} – ККД трансмісії: $\eta_{mp} = 0,95$.

Для обох варіантів прийmemo $N_{ен} = 8,8$ кВт.

8. Втрати потужності на перекочування автомобіля, кВт

$$N_f = \frac{G_a \cdot f \cdot V_p}{3,6}, \quad (10)$$

де G_a – вага автомобіля (автопоїзда), кН;

f – коефіцієнт опору перекоченню;

Вага автомобіля (автопоїзда) без вантажу:

Варіант А $G_{ас} = 87,4$ кН;

Варіант Б $G_{асп} = 87,4+51,6 = 139$ кН

Повна вага автомобіля (автопоїзда):

Варіант А $G_{ас} = 87,4+104 = 191,4$ кН;

Варіант Б $G_{асп} = 139 + 208 = 347$ кН.

(вага зерна одного бункера дорівнює 104 кН)

Коефіцієнт опору перекоченню;

- при русі автомобіля по полю $f = 0,07$;

- при русі по асфальтовій дорозі $f = 0,02$

8. Баланс потужності двигуна автомобіля, N_e , (кВт):

$$N_e = N_{mp} + N_f, \quad (11)$$

9. Коефіцієнт завантаженості двигуна по потужності,

η_N :

$$\eta_N = \frac{N_e}{N_{ен}} \quad (12)$$

Оптимальна величина завантаження дизельних двигунів $\eta_N = 0,70 \dots 0,85$.

10. Погодинна витрата палива, G_2 , кг/год.

$$G_2 = N_{ен} \cdot q \cdot \eta_N / 1000, \quad (13)$$

де q – питома витрата палива двигуно, г/кВт-год.
 $q=236$ г/кВт-год.

11. Витрата палива за один цикл, $G_{1ц}$, кг.

Варіант А: $G_{1ц}=4,28$ кг. Варіант Б: $G_{1ц}=5,4$ кг.

12. Витрата палива за зміну, $G_{зм}$, кг.

Варіант А: $G_{зм}=51,4$ кг. Варіант Б: $G_{зм}=37,8$ кг.

13. Витрата палива на одну тону перевезеного зерна,

G_m , кг/т:

Варіант А: $G_{зм} = 0,40$ кг/т. Варіант Б: $G_{зм} = 0,25$ кг/т.

Визначені показники наведені в таблиці 2

Таблиця 2. Показники використання автомобілів (Варіант А/Варіант Б)

| № п/п | Елементи часу зміни | N_e , кВт | η_N | $G_{1ц}$, кг | $G_{зм}$, кг |
|-------|---|-------------|-----------|---------------|---------------|
| 1 | Холостий рух автомобіля: | | | | |
| | -по виробничій території | 11,2/12,7 | 0,06/0,07 | 0,25/0,29 | 3,0/2,0 |
| | -по трасі | 42,8/63,4 | 0,24/0,36 | 0,40/0,60 | 4,8/4,2 |
| | -по полю | 63,9/89,6 | 0,34/0,51 | 0,45/0,64 | 5,1/4,5 |
| 2 | Напівпорожній рух по полю | 90,4/103 | 0,51/0,36 | 0,75/0,75 | 7,8/5,3 |
| 3 | Рух завантаженого автомобіля: | | | | |
| | -по полю | 121/144 | 0,69/0,82 | 1,44/1,70 | 17,2/11,9 |
| | -по трасі | 84,0/124 | 0,41/0,70 | 0,68/0,87 | 8,2/6,1 |
| | -по виробничій території | 14,2/18,9 | 0,08/0,10 | 0,33/0,42 | 4,0/2,9 |
| 4 | Вивантаження зерна із кузова автомобіля | - | 0,05/0,06 | 0,10/0,17 | 1,2/1,2 |
| 5 | Всього за фактичну тривалість зміни | - | - | - | 51,3/38,1 |

7. Тривалість простоїв комбайна в очікуванні транспортних засобів, $t_{ок}$, год.

$$t_{ок} = (t_б - t_p) (n_p - 1)$$

Тоді: варіант А: $t_{ок} = 2,2$ год.; варіант Б: $t_{ок} = 1,2$ год..

Тобто, при використанні автопоїзда простої комбайна зменшаться на 1,0 год.

8. Умовний намолот за час очікування, $\omega_{оч}$, т/год.

$$\omega_{оч} = t_{ок} \cdot \omega_о,$$

де $\omega_о$ – продуктивність комбайна за 1 год. основного часу, т/год.

$$\omega_о = 21,8 \text{ т/год.}$$

Тоді: варіант А: $\omega_{оч} = 48$ т.; варіант Б: $\omega_{оч} = 26$ т.

Тобто, при використанні автопоїзда комбайн зміг би намолотити зерна більше на $48-26 = 22$ т. в порівнянні з автомобілем.

Результати розрахунків по порівняльній оцінці роботи транспортних засобів на відвезенні зерна від комбайна дозволяють зробити наступні висновки:

Висновки.

1. Якщо використовувати автомобіль-самоскид КамАЗ – 45143-11 як самостійну транспортну одиницю, то за зміну тривалістю 10 годин він зможе перевезти від комбайна 127,2 т. зерна, автопоїзд в складі цього ж автомобіля та автопричепа НЕФА3-8560-02 за той же час - 148,4 т зерна, тобто на

21 т більше. Тобто, по цьому критерію перевагу слід віддати другому варіанту.

2. При використанні автопоїзда на перевезенні зерна витрачається дизельного палива 0,25 грн. на кожну тону, а при використанні автомобіля без причепа – 0,40 грн. Тобто, на кожній тоні економиться 15 коп. При площі поля в 200 га та врожайністю 75 ц/га, то економія в цілому складе 225 грн. По великому рахунку по цьому критерію оцінки використання транспорту обидва варіанти рівнозначні. Пояснення цьому просте – коефіцієнт завантаження двигуна в першому варіанті значно менший ніж у другому (таблиця 2).

3. Найбільше палива на одиницю довжини шляху витрачається при рухові його по полю з повністю заповненим кузовом, де завантаженість двигуна найбільша – 0,69...0,82.

4. Більш повну і правильну оцінку використання цих двох варіантів можна дати, якщо за критерії взяти економічні показники.

Пропозиції.

1. Якщо в даній ситуації за головний критерій оцінки транспортних засобів брати більш ефективне використання комбайна через зменшення простоїв, перевагу слід віддати автопоїзду: комбайн буде простоювати на 1,0 год. менше ніж при використанні одного автомобіля. За цей час він зможе намолотити три бункери зерна.

2. Для усунення або зменшення простоїв комбайна можна застосувати декілька заходів:

- придбати і використати так званий перезавантажувач зерна. Це такий самохідний технічний засіб, з допомогою якого при відсутності транспортного засобу він завантажується зерном від комбайна, а потім при його появі вивантажує зерно;
- на полі можна мати транспортний засіб в складі малопотужного трактора і автомобільного причепа, який би завантажувався при відсутності автопоїзда.

Список використаної літератури.

1. Мельник І.І., Тивоненко І.Г., Фришев С.Г. та ін. Інженерний менеджмент / За ред. І.І.Мельника. Навчальний посібник. – Вінниця: Нова Книга, 2007. - 536 с.
2. Г.І. Барабаш, М.О. Мікуліна / Залежність техніко-економічних показників використання зернозбиральних комбайнів від рівня врожайності озимої пшениці // Вісник Сумського Національного Аграрного Університету, серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». – 2019. – №3 (37). - С. 31-33
3. Орманджи К.С. Методика разработки операционной технологии механизированных полевых работ//К.С.Орманджи, Ю.К.Киртбая, Г.И.Барабаш.- М.:ПМУ ЦОПКБ ВИМ, 1982.- 192 с.
4. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. – М.: Колос, 1971.- 248 с.(Вып.1).
5. М.О. Мікуліна, Г.І. Барабаш / Вплив типу рушія трактора на показники використання орних агрегатів плугів, // Збірник тез доповідей по матеріалах 25-ї міжнародної наукової конференції «Технології XXI века», (15-20 вересня 2019 р., м. Суми, м. Одеса) / ч.1. - Суми: СНАУ, 2019. С.-35
6. Г.І. Барабаш, М.О. Мікуліна / Залежність техніко-експлуатаційних показників орних агрегатів // Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні моделі розвитку агропромислового виробництва : виклики та перспективи», Випуск 2 Глухів : ГАТІ ім. С.А. Ковпака СНАУ, 2019. С. 10-16

Barabash G.I., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Mikulina M.A., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Polivanui A.D., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Comparative assessment of the work of vehicles during wheat harvesting according to the criterion of fuel consumption

The problem is that in the absence of standards for the use of vehicles in the transportation of grain from the combine, these indicators can be determined analytically and used to pay for contractors and write off fuel.

From textbooks and other literature sources on machine use in crop production, it is known how to determine the indicators of the use of road transport with their known technical characteristics and conditions of their use in the harvesting of various cereals. However, we have not found any analytical studies on how these indicators are actually determined in specific conditions.

Provide methodological approaches to determine the main technical and operational indicators and, in particular, productivity and fuel consumption of trucks and trains when transporting grain from combine harvesters when harvesting wheat, which will give them a comparative assessment and better organize their work in production conditions. Consider this with a specific example.

Key words: wheat, harvesting, combine, car, road train, speed, productivity, fuel consumption.

Дата надходження до редакції: 28.05.2021

**ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПОСІВНИХ КОМПЛЕКСІВ ВІТЧИЗНЯНОГО ВИРОБНИЦТВА
МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ (за техніко-економічними критеріями)**

Саржанов Олександр Анатолійович

кандидат технічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-3973-0185
e-mail: alexsar@i.ua

Барабаш Григорій Іванович

кандидат технічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-1075-479X
e-mail: grinya45@ukr.net

Саржанов Богдан Олександрович

асистент
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-9796-9499
e-mail: arhimag0@gmail.com

Традиційно техніко-експлуатаційні показники використання машинних агрегатів в рослинництві визначаються, виходячи з того, що за довідковими даними про стан ґрунту та відомими тяговими зусиллями тракторів вибирають необхідну передачу, завантажуючи таким чином двигун трактора до оптимального значення, але в межах певного діапазону агротехнічно допустимих швидкостей. Але на даний момент ситуація помінялась. Інформація що до згаданих показників відсутня через те, що офіційно лабораторно-польові дослідження або не проводяться або інформація про це відсутня. Про це було сформульовано в попередній статті «ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПОСІВНИХ КОМПЛЕКСІВ ВІТЧИЗНЯНОГО ВИРОБНИЦТВА МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ (за інженерно-технічними критеріями)»

В запропонованій статті наведені методичні підходи по визначенню основних техніко-економічних показників нових посівних комплексів вітчизняного виробництва, по яких ще відсутня в літературних джерелах інформація що до ефективності використання в певних виробничих умовах; наведені конкретні значення складових прямих експлуатаційних та приведених витрат, що дозволить проводити аналітичні дослідження по ефективності їх використанню.

Ключові слова: сівба, посівні комплекси, методика, балансова вартість, реновація, експлуатаційні витрати, приведені витрати, затрати праці, ефективність.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.13>

Постановка проблеми.

Технологічні процеси по обробітці ґрунту та сівбі є основними складовими частинами зональних науково обґрунтованих систем землеробства. Особливо важливе значення це набуває в сучасних умовах, коли істотно ускладнилось ресурсне забезпечення аграрних підприємств.

Для остаточного прийняття рішення стосовно вибору більш ефективного машинного агрегату необхідно дати йому економічну оцінку. Для вирішення цього питання ми пропонуємо в даній статті сучасні математичні підходи.

Аналіз результатів останніх досліджень. Аналітичні дослідження стосовно оцінки ефективності роботи посівних комплексів і їх порівняльної оцінки в умовах Ліссостепу Сумської області не проводились.

Формулювання цілей статті та мета досліджень. Вони полягають в тому, щоб надати методичні підходи по визначенню техніко-економічних показників використання посівних комплексів, що дасть можливість в подальшому обґрунтувати вибір одного із альтернативних агрегатів по критеріях приведених витрат.

Теоретичні передумови визначення техніко-економічних показників використання посівних комплексів

1. Доля роботи в річному завантаженні, δ :

$$\delta = \frac{t}{T} = F \omega_{зм} T, \quad (1)$$

де t – фактична тривалість роботи агрегата на даному полі, год.;

T – нормативне річне завантаження складових МА;
 F – площа поля, га.

2. Балансова вартість складових МА, Б, грн.:

$$B = 1,1(C_{тр} + C_m), \quad (2)$$

де $C_{тр}$, C_m – ціна відповідно трактора і робочої машини (посівного комплексу), грн.

3. Відрахування на реновацію, S_a , грн.:

$$S_a = 0,01(B_{тр} a_{р тр} \delta_{тр} + B_m a_{р м} \delta_m), \quad (3)$$

де $a_{р тр}$, $a_{р м}$ – норма відрахувань на реновацію відповідно трактора і робочої машини, %.

4. Відрахування на поточний ремонт (ПР) та технічне обслуговування (ТО), $S_{ТО}$, грн.:

$$S_{ТО} = 0,01(B_{тр} a_{ТО тр} \delta_{тр} + B_m a_{ТО м} \delta_m) \quad (4)$$

де $a_{ТО тр}$, $a_{ТО м}$ – норма відрахувань на ПР та ТО відповідно трактора і робочої машини, %.

5. Витрати на паливо, S_n грн.:

$$S_n = 1,05 G_{га} * F * s_n, \quad (5)$$

де s_n - ціна палива, грн./кг.

6. Основна оплата праці, S_0 (грн.):

$$S_0 = (s_{m0} * n_0 + s_{m0} * n_g) t \quad (6)$$

де s_{m0}, s_{m0} - тарифні ставки відповідно основних та допоміжних робітників на обслуговуванні МА;

n_0, n_g - кількість відповідно основних та допоміжних робітників на обслуговуванні МА.

8. Додаткова оплата праці, ΔS_g , грн.:

$$\Delta S_g = k_s S_0, \quad (7)$$

де k_s - коефіцієнт надбавки до основної заробітної плати.

9. Загальна оплата праці, S_3 , грн.:

$$S_3 = S_0 + \Delta S_g \quad (8)$$

10. Відрахування на соціальні заходи $S_{сз}$, грн.:

$$S_{сз} = 10^{-2} k_{сз} * S_3, \quad (9)$$

де $k_{сз}$ - відсоток відрахувань на соціальні заходи, %.

11. Загальні прями експлуатаційні витрати, S , грн.:

$$S = S_a + S_{т0} + S_n + S_3 + S_{сз} \quad (10)$$

12. Експлуатаційні витрати на одиницю роботи (питомі витрати), $\&$, грн./га:

$$\& = \frac{S}{F}$$

13. Загальні приведені витрати, Π , грн.:

$$\Pi = S + E (B_{тр} \delta_{тр} + B_m \delta_m) \quad (11)$$

де E - норма ефективності капітальних вкладень, $E=0,15$.

14. Приведені витрати на одиницю роботи, n , грн./га:

$$n = \frac{\Pi}{F} \quad (12)$$

Вихідні дані для розрахунків в таблиці 1.

Результати математичного моделювання наведено в таблиці 2.

Таблиця 1. Техніко-експлуатаційні показники використання посівних комплексів *

| № з/п | Показники | Одиниці виміру | Варіанти | |
|-------|------------------------|----------------|--------------------------------------|-------------------------|
| | | | МТЗ -3022 ДЦ + Алкор – 7,5 | МТЗ -3022ДЦ+ Алкор - 10 |
| 1 | Розміри поля: | | | |
| | - Площа | га | 200 | 200 |
| | - Довжина | м | 2000 | 2000 |
| | - ширина | м | 1000 | 1000 |
| 2 | Культура | | Озима пшениця | |
| 3 | Технологічна операція | | Сівба з внесенням мінеральних добрив | |
| 4 | Норма внесення насіння | | 200 | |
| 5 | Доза внесення добрив | | 85 | |
| 6 | Продуктивність | | 4,6 | 5,9 |
| 7 | Витрата палива | | 8,2 | 7,2 |
| 8 | Кількість агрегатів | | 1 | 1 |

* Див. статтю «Обґрунтування вибору посівних комплексів вітчизняного виробництва методом математичного моделювання (за інженерно-технічними критеріями)», стор. 21-25.

Таблиця 2. Показники використання посівних комплексів

| Показники | Одиниці виміру | Варіанти | |
|---|---------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| | | МТЗ-3022 ДЦ + +Алкор – 7,5 | МТЗ-3022 ДЦ+ +Алкор - 10 |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1.Необхідна кількість агрегатів, n_a | шт. | 1 | 1 |
| 2.Тривалість виконання роботи на загальній площі, t | год. | 43,0 | 33,9 |
| 3.Норма річного завантаження, T : | | | |
| - трактора; | год. | 1350 | 1350 |
| - посівного комплексу. | | 240 | 240 |
| 4.Доля участі в загальному обсязі робіт, Δ : | | | |
| - трактора; | | 0,032 | 0,025 |
| - посівного комплексу. | | 0,179 | 0,141 |
| 5.Ціна, C : | | | |
| - трактора; | тис. грн. | 1503 | 1503 |
| - посівного комплексу; | | 1400 | 1600 |
| 6.Балансова вартість, B : | | | |
| - трактора; | тис.грн. | 1653 | 1653 |
| - посівного комплексу; | | 1540 | 1760 |
| - разом | | 3193 | 3413 |
| 7.Норма відрахувань на реновацію, a_p : | | | |
| - трактора; | % | 17 | 17 |
| - посівного комплексу | | 12,5 | 12,5 |
| 8.Відрахування на реновацію, S_p : | тис.грн. | 40,3 | 35,2 |
| 9.Норма відрахувань на поточний (ПР) ремонт та ТО, $a_{то}$: | | | |
| - трактора; | % | 9,9 | 9,9 |
| - посівного комплексу. | | 18 | 18 |
| 10.Відрахування на ПР, та ТО, $S_{то}$, | тис.грн | 50,3 | 39,6 |
| 11.Комплексна ціна палива, S_m | грн./кг | 29,4 | 29,4 |
| - ціна дизельного палива, S_l | | 28,0 | 28,0 |
| 12.Витрати на паливо, S_n | тис.грн. | 48,2 | 42,9 |
| 13.Кількість обслуговуючого персоналу, n_m | люд. | 1 | 1 |
| 14.Розряд робіт: | | V | V |
| 15.Тарифна ставка, S_T : | грн./год | 31,23 | 31,23 |
| 16.Основна оплата праці, S_o : | тис. грн. | 1,34 | 1,06 |
| 17.Додаткова оплата праці, S_d : | тис. грн. | 0,42 | 0,35 |
| 18.Загальна оплата праці, S_z | тис.грн. | 1,76 | 1,41 |
| 19.Відрахування в соціальний фонд, $S_{сз}$ | тис.грн. | 0,39 | 0,31 |
| 20.Прямі експлуатаційні витрати, S | тис.грн. | 140,95 | 119,42 |
| 21.Питомі експлуатаційні витрати, $\&$ | грн. /га | 705 | 597 |
| 22.Приведені витрати, Π | тис.грн. | 186,46 | 155,23 |
| 23.Питомі приведені витрати, π | грн./га | 932 | 776 |
| 24.Затрати праці, Z_n | люд. – год. га | 0,22 | 0,17 |
| 25.Умовний економічний ефект | грн./га тис.грн. | - | 156 31,2 |

Висновки

Більш ефективним посівним агрегатом по головному критерію оптимізації – приведених витратах – є агрегат, який складається із трактора Беларусь 3022-ДЦ та посівного комплексу Алкор-10. Більш затратним є агрегат, який складається із трактора Беларусь 3022-ДЦ та посівного комплексу

Алкор – 7,5. Різниця між ними при обробітку 200 га по цьому показнику складає 156 грн./га. Працюючи в дві зміни обидва агрегати засіють поле своєчасно – за три доби, але другий управиться з роботою на 9 годин раніше (трохи більше однієї зміни).

Список використаної літератури

1. Методика розробки операційної технології механізованих польових робіт / Г. І.Барабаш, В. М. Зубко, О. Г. Барабаш, Т. В. Хворост. – Суми: ТОВ "Друкарський дім "Папірус", 2016. – 130 с.

2. Оптимізація комплексів машин і структури машинного парку та планування технічного сервісу / [Мельник І.І., Гречко-сій В.Д., Марченко В.В., Михайлович Я.М., Мельник В.І., Надточій О.В.]; за ред. І. І. Мельника. – Київ: Видавничий центр НАУ, 2004. – 85 с.

Sarzhanov O.A., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Barabash G.I., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Sarzhanov B.O., Sumy National Agrarian University (Ukraine)

Justification of the choice of seed complexes of domestic production by the method of mathematical modeling (according to technical and economic criteria)

Traditionally, technical and operational indicators of the use of machinery in crop production are determined based on the fact that the reference data on soil condition and known traction forces of tractors choose the required gear, thus loading the tractor engine to the optimum value, but within a certain range of agronomically acceptable. But at the moment the situation has changed. There is no information on these indicators due to the fact that official laboratory field studies are either not conducted or there is no information about it. This was formulated in the previous article "JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF SEED COMPLEXES OF DOMESTIC PRODUCTION BY THE METHOD OF MATHEMATICAL MODELING (according to engineering and technical criteria)

Key words: sowing, sowing complexes, methods, book value, renovation, operating costs, reduced costs, labor costs, efficiency.

Дата надходження до редакції: 29.05.2021

ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ ГАЛУЗЕВОГО МАШИНОБУДУВАННЯ

Ребрій Алла Миколаївна

старший викладач
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-3467-2353
email: rebrii@ukr.net

Рибенко Ірина Олександрівна

старший викладач
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-7795-1689
email: fishw36@gmail.com

Павлов Олександр Григорович

старший викладач
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-7421-8502
email: pvalex@ukr.net

В статті розглянуті питання впровадження та використання систем автоматизованого проектування для підготовки фахівців на об'єктах галузевого машинобудування.

Ключові слова: комп'ютеризація, проектування, галузеве машинобудування, системи автоматизованого проектування, технічні дисципліни.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.14>

Вступ

Широке впровадження комп'ютеризації в умовах науково-технічного прогресу забезпечує збільшення продуктивності праці в суспільному виробництві. Водночас коли продуктивність праці у сфері виробництва з початку століття виростає в сотні разів, то в області проектування ця величина тільки наближається до збільшення. Тривале проектування зазвичай є причиною затримання впровадження досягнень науки та техніки в промисловості, що не відповідає потребам розвитку економіки. Такий стан справ обумовлюється і з модернізацією діючого обладнання на об'єктах галузевого машинобудування.

Для розроблення проектів удосконалення технологічних об'єктів машинобудування нині застосовують системи автоматизованого проектування (САПР), які реалізуються за допомогою персональних комп'ютерів (ПК) і спеціального програмного забезпечення. Одним із важливих досягнень САПР слід вважати акумуляцію величезного досвіду проектування технічних засобів різного призначення, накопиченого кваліфікованими інженерами-конструкторами, який реалізований у програмному продукті. Автоматизоване проектування дає змогу значно скоротити суб'єктивізм при ухваленні рішень, підвищити точність розрахунків, вибрати якнайкращі варіанти для реалізації на основі математичного аналізу всіх або більшості варіантів проекту з оцінкою технічних, технологічних і економічних характеристик виробництва і експлуатації проектного об'єкта.

Предмет досліджень

Об'єктом дослідження є підвищення якості підготовки майбутніх фахівців машинобудівних спеціальностей за допомогою застосування систем автоматизованого проектування.

Основна частина

Під автоматизацією проектування розуміється такий

спосіб виконання процесу розроблення проекту, коли проектні процедури й операції здійснюються розробником виробу за умови тісної взаємодії з ПК. Система автоматизованого проектування - це система, що включає користувача (інженера, конструктора) і комплекс засобів автоматизації проектування, які утворюють технічне, програмне, математичне, інформаційне, лінгвістичне, методичне, організаційне забезпечення. Розвиток САПР ґрунтується на сучасній науково-технічній базі. До неї належать засоби обчислювальної техніки. Сучасний ринок САПР пропонує широкий спектр програмних продуктів для вирішення великого кола завдань за допомогою ПК, усі ці продукти можна класифікувати за рівнями [1]. Структура САПР складається з підсистем. Розрізняють підсистеми проектувальні й обслуговуючі.

Розв'язок проблеми підвищення ефективності праці фахівців при створенні нових і вдосконалюванні раніше розроблених виробів машинобудування, а також підготовки майбутніх фахівців, можливо різними шляхами. Традиційно ці завдання вирішуються за допомогою проведення робіт із систематизації, уніфікації й стандартизації як окремих деталей, так і складальних одиниць і виробів у цілому. Це дозволяє використовувати метод проектування та залучати різні технічні засоби.

Застосування САПР у навчальному процесі доцільно при вивченні всіх розділів графічних дисциплін. Вивчення машинобудівного креслення може проводитися повністю із застосуванням САПР. Застосування комп'ютерної графіки є істотним доповненням у підвищенні якості підготовки майбутніх фахівців.

Графічні дисципліни прийнято розділяти на такі розділи, як нарисна геометрія, проекційне креслення, машинобудівне креслення. Кожний з розділів відіграє важливу роль у формуванні просторового мислення, розвитку навичок вико-

нання й читання креслень різного роду майбутнім фахівцем машинобудівного профілю. Навчальні програми цих дисциплін передбачають виконання креслень за допомогою спеціалізованих комп'ютерних програм, які прийнято відносити до САПР. У процесі вивчення технічних дисциплін здобувачі освіти освоюють навички побудови тривимірних моделей окремих деталей і складальних одиниць, створення креслень на основі таких моделей, а також їх оформлення відповідно до ДСТУ.

З розвитком інформаційних технологій, відбулися істотні зміни у використанні при проектуванні не тільки засобів, але й методів роботи. Первісні системи автоматичного проектування без участі людини, на більших ЕОМ себе економічно не виправдали, а в комбінації з використанням перших графобудівників для виводу графічної інформації, привели до виникнення швидко застарілого поняття «машинна графіка». На зміну прийшли методи автоматизованого проектування інтерактивного, з автоматизацією виконання окремих проектних процедур на персональних комп'ютерах. Перші версії таких систем, як Компас-графік містили досить обмежену кількість автоматично виконуваних проектних процедур - геометричні обчислення, елементарні графічні побудови. Крім того, базувалися вони на традиційних проєкційних уявленнях - кресленнях. При детальному розгляді, уже тоді можна було побачити величезні переваги й перспективи використання таких систем широким колом фахівців при виконанні досліджень і при проектуванні:

- відносна дешевизна й доступність;
- відносна простота в освоєнні й повна сумісність із традиційними науковими уявленнями про геометрію й інженерну графіку;
- універсальність і відкритість (можливість налаштування на будь-яку сферу діяльності, створення спеціалізованих користувачьких меню, бібліотек типових зображень);
- практично необмежена точність виконуваних побудов і обчислень;
- можливість віртуального моделювання як плоских, так і тривимірних об'єктів;
- можливість зберігати й обмінюватися інформацією про об'єкт із іншими комп'ютерними системами.

Досить ефективно при розробці моделей оригінальних деталей використовувати базові функції побудови параметричних моделей типових геометричних ліній (коло, еліпс) і форм (призма, піраміда, циліндр, конус, сфера, тор).

Особливо ефективне використання спеціальних програм, що є компонентами при розв'язанні більш складних прикладних завдань. Тому цілком обґрунтоване використання засобів автоматизації виконання типових процедур як модулів.

Залишається актуальним комплекс програм, призначений для автоматизованих розрахунків і побудови розгортки деталей, утворених комбінацією усічених площинами й взаємно пересічених циліндрів і конусів. Безумовно, можна вирішувати такі завдання, ґрунтуючись на традиційних алгоритмах нарисної геометрії в інтерактивному режимі. З використанням комп'ютерного моделювання на площині це дає більший ефект (точність розв'язання) з використанням традиційних креслярських інструментів. Існує також можливість побудови і потім більш ефективного використання параметричних зображень, як графічних примітивів, проєкцій, так і тривимірних моделей деталей. Однак максимальний ефект (мінімум витрат) при розв'язку подібних завдань досягається при авто-

матизованому (з використанням спеціальних програм) розв'язанні.

Набір таких завдань можна доповнювати (якщо в цьому часто виникає необхідність), наприклад, програмами автоматизованого побудови моделей уніфікованих конструктивних елементів, різьбових деталей, кріпильних деталей, пружин, вінців зубчастих коліс, підшипників і т.п.

При моделюванні виробів у цілому моделі стандартних і уніфікованих деталей і складальних одиниць необхідні так само, як і їхні зображення при традиційному проектуванні. Автоматизувати побудову таких моделей також можна, розробивши комплекс відповідних програм. Таким чином, уміла комбінація інтерактивних методів моделювання з використанням програмних модулів автоматизованого розв'язку підзадач у параметричній формі надає найбільший ефект як у навчанні, так і в практичній інженерній діяльності. Крім того, досвід розробки програм автоматичної побудови точних плоских параметричних моделей стандартних і уніфікованих деталей машин, приводить до виводу про необхідність створення таких програм для побудови тривимірних моделей цих деталей замість створення величезних бібліотек моделей таких деталей.

Розгляд, вивчення та застосування всіх можливостей комп'ютерного геометро-графічного моделювання в навчальному процесі забезпечує необхідний сучасному фахівцеві кругозір в галузях наукового дослідження, проектування й інженерного забезпечення сучасного машинобудівного виробництва.

Впровадження інформаційних технологій в машинобудівне виробництво має наступні позитивні ефекти [2]:

а) забезпечення гнучкості, здатності до швидкого переходу з випуску одного виду виробу на інший при мінімальних простоях устаткування та забезпеченні стабільної якості продукції;

б) можливість розв'язувати складні інтелектуальні задачі як то вибір оптимальних режимів обробки, виявляти несправності та вчасно усувати їх, автоматично переходити на нову продукцію, що раніше не випускалася, при цілковитому керуванні всіма функціями електронно-обчислювальними машинами;

в) ведення найскладніших інтелектуальних процесів, що організують виробництво, швидкий обмін інформацією з підприємствами.

На сьогодні широко застосовуються високопродуктивні системи автоматизованого проектування, технологічної підготовки виробництва і інженерного аналізу [3]. Це стало ключовим елементом бізнесу підприємства, що працює на сучасному ринку машинобудування.

Висновки

Застосування систем автоматизованого проектування в освітньому процесі засновано та апробовано на реальному викладанні технічних дисциплін, які формують інженерно-графічні компетенції у здобувачів освіти. Застосування методичного забезпечення дозволяє підвищити мотивацію до навчання та придбання умінь і навичок у оволодінні сучасними засобами автоматизованого проектування з використанням засобів сучасних комп'ютерних технологій, що забезпечують ефект - продуктивність професійної діяльності фахівців галузевого машинобудування в умовах конкурентного середовища.

Список використаної літератури.

1. Норенков И. П. Автоматизированное проектирование / И. П. Норенков. – М.: 2000. – 188 с.
2. Никифоров А.Д. Современные проблемы науки в области технологии машиностроения: учеб. пособие / А. Д. Никифоров. - М.: Высшая школа, 2006. - 392 с.
3. Новикова, Е. А. Компьютерные технологии в машиностроении и научных исследованиях: учеб. пособие / Е.А. Новикова; Владим. гос. ун-т. -Владимир: Ред.-издат. комплекс ВлГУ, 2005. - 108 с.

Rebriy A., *Sumy National Agrarian University (Ukraine)*

Rybenko I., *Sumy National Agrarian University (Ukraine)*

Pavlov O., *Sumy National Agrarian University (Ukraine)*

Application of automated design systems for training of industrial machine building specialists

The modern market of mechanical engineering imposes more and more strict requirements to terms and cost of design works. Carrying out design work aimed at creating high-quality, competitive products, associated with the preparation of models of components and units, as well as the implementation of a huge amount of mathematical calculations required for engineering analysis of structures. The main way to increase the competitiveness of enterprises is associated with a sharp reduction in the time to create models and accelerate the calculation of mathematical parameters at all stages of product development.

Therefore, today in mechanical engineering the importance and practical value of creating a well-developed computer infrastructure as an integral part of modern design and production with a comprehensive solution, based on network technologies and integrated automated systems that provide collective work and the ability to create a single information space enterprises with the provision of continuous information support of the entire life cycle of products and its production component associated with the design and technological preparation of production.

The study and application of all possibilities of computer geometric-graphic modeling in the educational process provides the necessary modern specialist outlook in the fields of research, design and engineering support of modern machine-building production.

Today, high-performance systems of automated design, technological preparation of production and engineering analysis are widely used. This has become a key element of the business of an enterprise operating in the modern engineering market.

The application of computer-aided design systems in the educational process is based and tested on the actual teaching of technical disciplines that form engineering and graphic competencies in students. The use of methodological support allows to increase the motivation to learn and acquire skills in mastering modern means of computer-aided design using modern computer technology, providing the effect - the productivity of professional activities of industry engineering in a competitive environment.

Key words: *computerization, design, branch mechanical engineering, computer-aided design systems, technical disciplines.*

Дата надходження до редакції: 28.05.2021

АВТОМАТИЗОВАНА УСТАНОВКА ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ГАЛЬВАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

Роп'як Любомир Ярославович

доктор технічних наук, професор
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0002-9374-2550
e-mail: L_ropjak@ukr.net

Николайчук Микола Ярославович

кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0001-6185-2272
e-mail: nmj_2010@ukr.net

Шовкопляс Максим Володимирович

аспірант
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0002-5302-3623
e-mail: maks.shovkoplias@gmail.com

Витвицький Василь Степанович

кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0003-3682-1612
e-mail: vytytskyi.v.s@gmail.com

Романів Микола Миколайович

аспірант
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0001-5222-3810
e-mail: romaniv2809@ukr.net

Білінський Віталій Михайлович

здобувач
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0003-0219-8156
e-mail: hqaconstructif@gmail.com

У праці розглянуто основні типи покриттів та їх розповсюдженість у світі за частотою застосування в машинобудуванні. Відзначено, що найбільш розповсюдженими серед них є металеві – електрохімічні хромові покриття та неметалеві – оксидні покриття, сформовані у різних електролітах. Проведено аналіз способів та обладнання для утилізації відпрацьованих електролітів для формування покриттів на деталях машин у гальванічних цехах і дільницях. Як об'єкти дослідження вибрали електроліти для електрохімічного хромування сталей та для плазмоелектролітичного оксидування алюмінієвих сплавів. Використано системний підхід до вирішення актуальної проблеми утилізації відпрацьованих електролітів гальванічних ванн для нанесення покриттів, що є особливо важливим завданням на етапі переходу до «зелених технологій». Розроблено технологічну схему переробки відпрацьованих електролітів, яка включає процеси осадження, нейтралізації та очищення. Застосовано мехатронний підхід і комп'ютерне моделювання під час проектування установки для реалізації вказаної технології, котра містить два реактори і гідроциклон-фільтр, які сполучені трубопроводами, а також оснащену насосами, вказівниками рівня рідини, рН-метричним обладнанням та автоматизованою системою керування. В склад установки входить розроблена нова конструкція гідроциклон-фільтра, який забезпечує комбіноване очищення рідин від завислих частинок забруднення шляхом одночасного поєднання відцентрового очищення та фільтрування, а також дозволяє здійснювати промивання його кільцевого зазору та регенерацію фільтрувальної зернистої засипки фільтрувальної касети. Розроблена технологія утилізації відпрацьованих електролітів є ефективною під час експлуатації та не потребує дорогавартісного обладнання, процес є екологічно безпечним як для обслуговуючого персоналу, так і для навколишнього природного середовища, а продукти переробки можна повторно використовувати у виробничому циклі.

Ключові слова: електрохімічне хромове покриття, плазмоелектролітичне оксидне покриття, технологічний процес, електроліт, мехатроніка, реактор, гідроциклон-фільтр, зелені технології.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.15>

Вступ

Для підвищення зносостійкості та корозійної стійкості робочих поверхонь деталей машин застосовують різні технологічні способи зміцнення. Серед них найбільш вигідно вирізняються технології формування покриттів, які забезпечують раціональне поєднання властивостей матеріалу покриття та матеріалу основи деталі. Результати дослідження застосування покриттів у галузі машинобудування показують, що найбільш розповсюдженими серед металевих є електрохімічні хромові покриття для сталей [1-3], а серед неметалевих – оксидні для алюмінієвих і титанових сплавів [4]. Також в останні роки інтенсивно проводяться науково-дослідні роботи спрямовані на розробку технологій плазмоелектролітичного оксидування (мікродугового оксидування) металів вентильної групи. Зокрема, розробляються технологічні процеси формування оксидних шарів на деталях із компактних алюмінієвих деформованих і литих сплавів та на алюмінієвих покриттях попередньо нанесених, наприклад, на сталеву основу. Під час формування як металевих, так і оксидних покриттів використовують різноманітні склади електролітів, які після відпрацювання потребують утилізації. Тому для зниження рівня забруднення навколишнього середовища і переходу до зелених технологій необхідно розробляти інноваційні методи нанесення покриттів та технології очищення відпрацьованих електролітів гальванічних цехів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У машинобудівному виробництві найбільш часто використовують електрохімічні хромові покриття, які наносять із різноманітних електролітів на робочі поверхні деталей машин. Залежно від технологічних параметрів процесу електролізу можна отримати різні за фізико-механічними властивостями покриття [5, 6]. За функціональним призначенням хромові покриття є одними з найбільш універсальними та володіють високою твердістю, зносостійкістю, корозійною тривкістю та низьким коефіцієнтом тертя. Хромові покриття завдяки наявності на поверхні досить щільної оксидної плівки, яка під час найменшого пошкодження легко відновлюється, застосовують для захисту від корозії різних металів, а також і для декоративної обробки поверхні виробів. Ці покриття використовують як під час виготовлення нових деталей, так і під час ре-

монту зношених. Хромові та оксидні покриття наносять на робочі поверхні різних деталей, наприклад, поршневих і плунжерних насосів, компресорів, двигунів внутрішнього згоряння, гідро- і пневмоциліндрів тощо [7, 8], а також імплантів [9].

Дослідники розробляють різні технології електрохімічного хромування деталей машин [10-12]. Хромування в проточному електроліті [11, 12], завдяки знаходженню електроліту в закритій електрохімічній комірці, забезпечує зменшення його випаровування і забруднення навколишнього середовища та створює безпечніші умови праці робітників порівняно із хромуванням у спокійному електроліті, де гальванічні ванни для нанесення покриття є відкритими. Крім цього, електрохімічні хромові покриття, нанесені в проточному електроліті потребують також зняття менших припусків на механічну обробку [13].

Для електрохімічного хромування деталей використовують електроліти на основі сполук шестивалентного хрому [12, 14] або тривалентного хрому [11, 14-18], які є більш екологічно безпечними.

Технологія хромування потребує великої витрати води на приготування електролітів і на промивання деталей після нанесення покриттів. Під час електрохімічного нанесення покриттів відбувається газовиділення та винесення в атмосферу складових електроліту, водню та озону. В процесі промивання вкритих деталей вода забруднюється високотоксичними сполуками шестивалентного хрому. При цьому річні втрати сполук хрому під час винесення у вентиляцію та зі стічними водами досягають значних обсягів. Таким чином, гальванічне виробництво є крупним споживачем води, а з іншого боку, становить серйозну загрозу для токсичного забруднення навколишнього середовища, оскільки сполуки шестивалентного хрому мають окиснювальні властивості та чинять загальнотоксичну, кумулятивну, алергенну, канцерогенну і мутагенну дію на організм людини і тварин.

Норми гранично допустимих концентрацій (ГДК) для шкідливих речовин, в тому числі й від гальванічного виробництва, регламентуються відповідними Наказами Міністерства охорони здоров'я України. Гранично допустимі концентрації для шестивалентного хрому та тривалентного хрому в повітрі, ґрунті та воді наведені відповідно в табл. 1 – табл. 4.

Таблиця 1. Гранично допустима концентрація хрому в повітрі [19].

| № з/п | Найменування речовини | CAS N | Гранично допустима концентрація, мг/м ³ | | Клас небезпеки |
|-------|---|-----------|--|-----------------|----------------|
| | | | максимально разова | середньо добова | |
| 504 | Хром шестивалентний (у перерахунку на триоксид хрому) | 7440-47-3 | 0,0015 | 0,0015 | 1 |

Таблиця 2. Гранично допустима концентрація хрому в ґрунті [20].

| № з/п | Найменування речовини | CAS N | Гранично допустима концентрація, з урахуванням фону (кларка), мг/кг | Лімітуючий показник шкідливості |
|-------|-----------------------|------------|---|---------------------------------|
| 28 | Хром шестивалентний | 18540-29-9 | 0,05 | Загальносанітарний |
| 40 | Хром тривалентний | 16065-83-1 | 6,0 | Загальносанітарний |

Таблиця 3. Гранично допустима концентрація хрому в питній воді [21].

| № з/п | Найменування показників | Нормативи для питної води, мг/дм ³ | | | Методика визначення згідно з додатком 5 |
|-------|-------------------------|---|--------------------------------|---|---|
| | | водопровідної | з колодязів та каптажів джерел | фасованої, з пунктів розливу та буюетів | |
| 6 | Хром загальний | ≤0,05 | Не визначається | ≤0,05 | п. 45 |

Таблиця 4. Гранично допустима концентрація хрому в промисловій воді [22].

| № з/п | Найменування речовини | Гранично допустима концентрація забруднень у стічних водах, що надходять на споруди біологічного очищення, г/м ³ | Орієнтовна ефективність видалення забруднень на спорудах біологічного очищення (у частках одиниці) | Лімітуюча ознака шкідливості | Клас небезпеки |
|-------|-----------------------|---|--|------------------------------|----------------|
| 95 | Хром (тривалентний) | 2,5 | 0,5 | Санітарно-токсикологічна | 3 |
| 96 | Хром (шестивалентний) | 0,1 | 0,5 | Санітарно-токсикологічна | 3 |

Згідно переліку виробничих процесів [22], під час здійснення яких споживач повинен мати локальні очисні споруди для попереднього очищення стічних вод перед їх скиданням до системи централізованого водовідведення та очищення стічних вод відноситься гальванічне виробництво. Визначення вмісту основних хімічних елементів у природних, питних і стічних водах здійснюють методом атомно-емісійної спектроскопії з індуктивно-зв'язаною плазмою [23] та іншими методами контролю.

Вивчення та системний аналіз науково-технічної літератури, патентів та нормативно-правових документів показав, що для очищення відпрацьованих рідин гальванічних виробництв використовують механічні, хімічні, фізико-хімічні та біологічні способи, які набули найбільшого розповсюдження. Механічні способи забезпечують відділення дисперсних частинок за рахунок седиментації, фільтрації, центрифугування. Хімічні способи очистки базуються на перебігу хімічних реакцій у відпрацьованому гальванічному розчині з доданими реагентами, забезпечуючи одержання екологічно безпечних, або нерозчинних сполук. Фізико-хімічні способи включають коагуляційно-флотаційні, мембранні, електрохімічні, магнітні та термічні процеси або їх поєднання під час очищення забруднених рідин. Біологічні способи ґрунтуються на здатності мікроорганізмів використовувати розчинені та колоїдні органічні забруднювачі стічних вод як джерело харчування.

Авторами [24] проведено аналіз основних фізико-хімічних технологій очистки гальванічних стоків, зазначено їх особливості застосування та виокремлено електрохімічні способи очищення, як найбільш перспективні.

Регенерацію відпрацьованого розчину з вмістом сполук хрому згідно рекомендацій [14] проводять електрохімічним способом. У ванну травлення підвішують свинцеві аноди, або, якщо вона футерована свинцем, її корпус підключають до позитивного полюса джерела постійного струму. Катодом слугують свинцеві пластини, площа поверхні яких повинна бути приблизно в 30 разів меншою від площі поверхні анодів. Під час регенерації від джерела напругою 18 В пропускають через розчин постійний струм забезпечуючи його густину на катоді від 60 А/дм² до 65 А/дм², на аноді – 2,25 А/дм² за температури електроліту від 60 °С до 65 °С. Процес регенерації розчину завершують при досягненні концентрації тривалентного хрому від 3 г/дм³ до 5 г/дм³.

У праці [25] описана розроблена технологія очищення

стічних вод двоступеневою обробкою в електричному пристрої компактної експериментальної установки, яка є досить ефективною.

У праці [26] запропонована нова конструкція електрокоагулятора для обробки стічних вод, які містять сполуки хрому та визначено технологічні режими роботи, що забезпечують досягнення нормативних вимог щодо якості води.

Забезпечення стабільної роботи споруд і підвищення ефективності очищення стічних вод гальванічного виробництва досягається запропонованим комбінованим способом очистки стічних вод «УМКА-STEEL», що використовує методи фізико-хімічного перетворення та гідродинамічного осадження і фільтрації [27].

Під час очищення стічних вод гальванічних виробництв сорбційним методами авторами [28], запропоновано застосовувати глини, які здатні поглинати та утримувати іони важких металів, що дозволить використовувати ці глини як природні геохімічні бар'єри. Були також проведені дослідження з десорбції відпрацьованих сорбентів.

Для утилізації відпрацьованих електролітів для плазмовоелектролітичного оксидування деталей розроблена технологія очищення на базі гіроциклона [29]. У корпусі гіроциклона співвісно з трубою для відведення очищеного розчину встановлена коаксіально зовнішня труба, в якій виконані тангенційні похилі отвори для подачі хімічного реагенту для нейтралізації, що забезпечує підвищення ефективності очищення та нейтралізації відпрацьованого електроліту.

Авторами [30] досліджено можливості комплексної утилізації відпрацьованих електролітів гальванічного виробництва. Запропоновано реагентний гідрохімічний спосіб переробки гальванічних відходів, який базується на різній здатності сполук хрому, купруму і феруму до комплексування та розроблена технологічна схема комплексної утилізації відходів хромо-нікелевих гальванічних виробництв.

Винахідниками [31] запропоновано реагентний спосіб очищення промислових стічних вод від сполук хрому, що включає відновлення розчинених сполук шестивалентного хрому, нейтралізацію розчином-окислювачем до екологічно допустимого рівня та скидання рідини у стік. Однак такий спосіб не забезпечує повне очищення води від зважених частинок.

Результати проведеного аналізу науково-технічної та

патентної літератури показали, що існуючі технології утилізації відпрацьованих електролітів для електрохімічного хромування деталей машин не повною мірою відповідають сучасним зростаючим вимогам щодо створення зелених технологій тому потребують подальшого удосконалення.

Цілі та задачі дослідження

Розробити технологію переробки відпрацьованих електролітів для електрохімічного хромування сталевих та плазмоелектролітичного оксидування алюмінієвих деталей машин, яка включає процеси осадження, нейтралізації та очищення.

Для досягнення поставленої цілі необхідно вирішити такі завдання:

- застосувати мехатронний підхід до конструювання установки для осадження, нейтралізації та очищення відпрацьованих електролітів;
- розробити нову конструкцію гідроциклон-фільтра для комбінованого очищення рідин;
- розробити автоматизовану систему керування процесом роботи установки.

Матеріали та методи дослідження

Технологічний процес електрохімічного хромування сталевих деталей. Технологічний процес плазмоелектролітичного оксидування деталей з алюмінієвих сплавів. Відпрацьовані електроліти для електрохімічного хромування та плазмоелектролітичного оксидування. Методи аналітичної хімії, титрування електролітів. Визначення водневого показника електроліту. Екологічні нормативні документи. Застосовано мехатронний підхід і комп'ютерне моделювання під час

проектуювання установки. Опис програмованого логічного контролера SimaticS7-1200. Програмне середовище TIA Portal (TotallyIntegrationAutomationPortal) виробництва концерну «Siemens».

Результати дослідження

Основні джерела забруднення навколишнього середовища гальванічним виробництвом. Під час електрохімічного нанесення металевих покриттів (хромуванням, нікелюванням, цинкуванням, кадмуванням тощо) та плазмоелектролітичного формування оксидних покриттів на деталях машин практично на всіх операціях технологічного процесу (підготовчих, формування покриттів, промивання) відбувається утворення рідких та газоподібних шкідливих речовин (рис. 1), які призводять до забруднення навколишнього середовища. Тому згідно наведеного переліку виробничих процесів [22], гальванічне виробництво належить до виду господарської діяльності під час здійснення якої машинобудівне підприємство повинно мати локальні очисні споруди для попереднього очищення стічних вод перед їх скиданням до системи централізованого водовідведення та очищення стічних вод.

Розробка технологічної схеми осадження, нейтралізації та очищення гальванічних відходів. Для утилізації відходів гальванічного виробництва (відпрацьованих електролітів) розроблена технологія, що включає осадження, нейтралізацію та очищення електролітів з використанням гідроциклон-фільтра (рис. 2). На першій та другій стадії відповідно здійснюється реагентне осадження та нейтралізація електроліту, а на третій стадії – очищення та фільтрація розчину, тобто тонке його очищення.

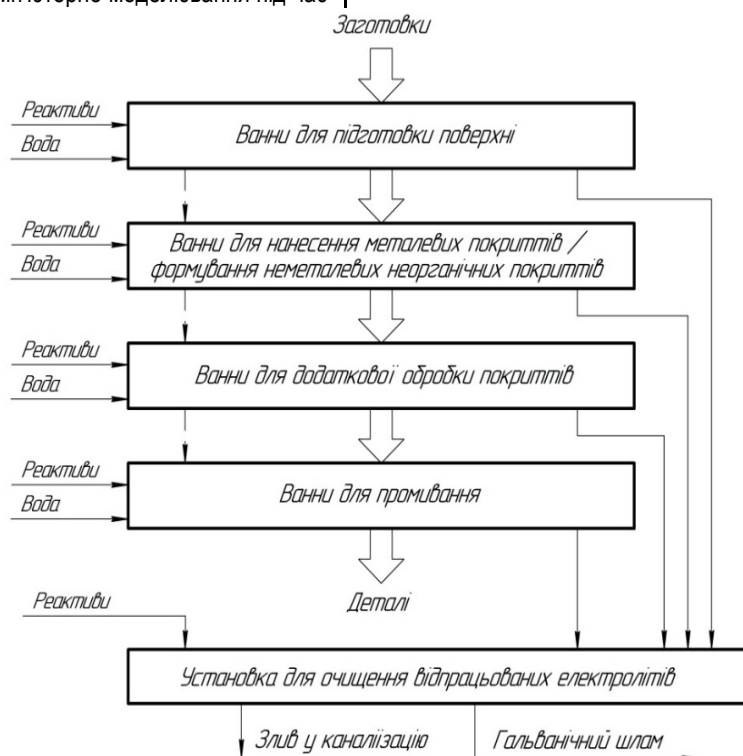


Рис. 1. Схема утворення гальванічних стоків (забруднень) та їх утилізації

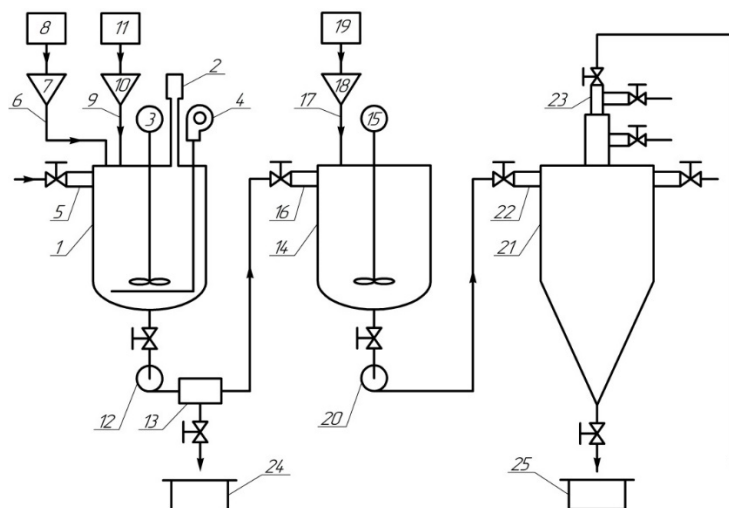


Рис. 2. Схема установки для осадження, нейтралізації та очищення гальванічних відходів

Застосовано мехатронний підхід і комп'ютерне моделювання під час проектування установки для осадження, нейтралізації та очищення гальванічних відходів. Розроблена установка містить два реактори та гідроциклон-фільтр, які сполучені трубопроводами, а також оснащена насосами, вказівниками рівня рідини, рН-метричним обладнанням та автоматизованою системою керування (рис. 2). Реактор 1 оснащений випарником 2, електричною мішалкою 3, повітряним компресором із барботером 4, трубопроводом 5 для подачі розчинів, які підлягають очищенню від сполук хрому, трубопроводом 6, дозатором 7 та місткістю 8 для відновлювального розчину надлишку сульфату двохвалентного заліза, трубо-

проводом 9, дозатором 10 та місткістю 11 для лужного розчину. Насос 12 забезпечує подачу суспензії з реактора 1 через фільтр 13 у реактор 14 який споряджений електричною мішалкою 15, трубопроводом 16, трубопроводом 17, дозатором 18 та місткістю 19 для розчину-окислювача. Насос 20 забезпечує подачу розчину в гідроциклон-фільтр 21 через вхідний трубопровід 22, де відбувається очищення та фільтрування цього розчину, що виходить через вихідний трубопровід 23. Місткості 24 та 25 слугують відповідно для збирання твердих продуктів утилізації. Запропонована конструкція гідроциклон-фільтра для очищення рідин захищена патентом України на винахід [32] і представлена на рис. 3.

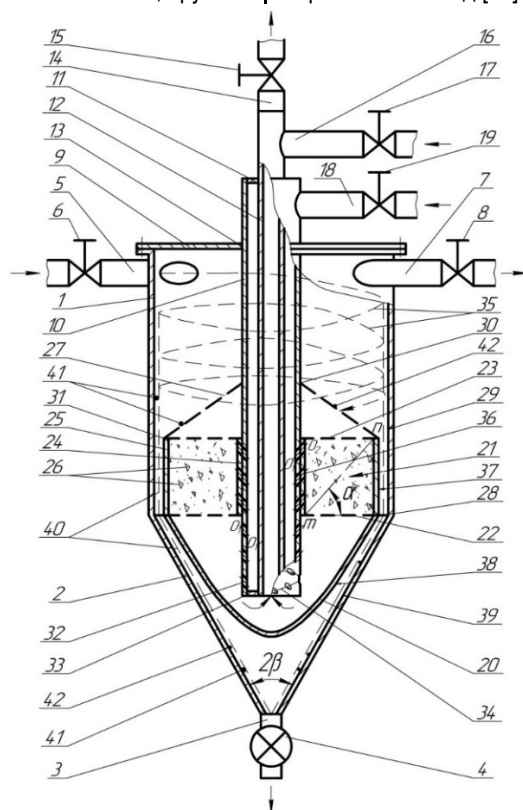


Рис. 3. Схема гідроциклон-фільтра для комбінованого очищення рідин [32]

Гідроциклон-фільтр [32] містить вертикальний цилінд- | ричний корпус 1 із конічним дном 2, до якого знизу приєдна-

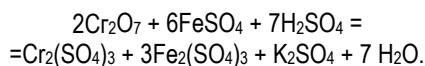
ний штуцер 3 для видалення шламу, що споряджений шлюзовим затвором 4. З протилежних боків до верхньої частини циліндричного корпусу 1 тангенціально приєднані штуцер 5 із вентилям 6 для подачі у циклон-фільтр очищеного рідинного потоку та штуцер 7 із вентилям 8 для відведення забрудненої води після регенерації насипної фільтрувальної зернистої засипки. Кришка 9 з'єднана з верхньою частиною циліндричного корпусу 1. Перфорована труба 10 через два дистанційні кільця 11 встановлена коаксіально до вихлопної труби 12 і нерухомо закріплена в отворі 13 кришки 9. До верхньої частини вихлопної труби 12 співвісно приєднано штуцер 14 із вентилям 15 для відведення очищеного рідинного потоку, а перпендикулярно збоку приєднано штуцер 16 із вентилям 17 для подачі чистої води для регенерації насипної фільтрувальної зернистої засипки. До верхньої частини перфорованої труби 10 також перпендикулярно збоку приєднано штуцер 18 із вентилям 19 для подачі чистої води для інтенсифікації регенерації насипної фільтрувальної зернистої засипки. В середині циліндричного корпусу 1 встановлена вставка 20, виконана у вигляді перевернутого закритого зрізаного тіла обертання – гіперболоїда обертання та стаціонарна фільтрувальна касета 21, із нижньою кільцевою сітчастою основою 22 і верхньою кільцевою сітчастою кришкою 23, що з'єднані між собою внутрішньою втулкою 24 та зовнішньою втулкою 25, в якій розміщена насипна фільтрувальна зерниста засипка 26. Сітчастий фільтр 27, виконаний у вигляді зрізаного сітчастого конуса. До складу фільтрувальної зернистої засипки 26 стаціонарної фільтрувальної касети 21 входять, наприклад, фрагменти подрібнених та механічно активованих полімерних відходів поліетилентетрафталату або будь-яких інших типів полімерних відходів із розвинутою поверхнею тощо. Стаціонарна фільтрувальна касета 21 нерухомо закріплена на ребрах жорсткості 28, які виконані на внутрішній стінці 29. Перфорована труба 10, проходить через меншу основу 30 зрізаного сітчастого конуса сітчастого фільтра 27 та внутрішньою втулку 24 стаціонарної фільтрувальної касети 21. Нижня більша основа 31 зрізаного сітчастого конуса сітчастого фільтра 27 приєднана до верхньої кільцевої сітчастої кришки 23 стаціонарної фільтрувальної касети 21, а верхня менша основа 30 вказаного зрізаного сітчастого конуса сітчастого фільтра 27 приєднана до перфорованої труби 10. У нижній частині цієї перфорованої труби 10 виконано похилі тангенціальні отвори 32 від торця 33. Кут нахилу осьових ліній $O_1 - O_1$ похилих тангенціальних отворів 32 до площини перпендикулярної до вертикальної осі рівний куту нахилу α висхідної діагоналі $m - n$ поздовжнього осьового розрізу стаціонарної фільтрувальної касети 21. Осьові лінії $O_1 - O_1$ вказаних похилих тангенціальних отворів 32 розташовані по гвинтовій лінії 34, яка має напрямок підйому витків протилежний до напрямку підйому витків гвинтової лінії траєкторії руху частинок забруднення очищуваних газового чи рідинного потоку 35 у вертикальному циліндричному корпусі 1. У внутрішній втулці 24 стаціонарної фільтрувальної касети 21 виконано також похилі тангенціальні отвори 36, осі $O_2 - O_2$ яких співпадають із осями $O_1 - O_1$ похилих тангенціальних отворів 32 у перфорованій трубі 10. Між зовнішньою стінкою 37 стаціонарної фільтрувальної касети 21, зовнішньою стінкою 38 вставки 20 та внутрішньою стінкою 29 вертикального циліндричного корпусу 1, внутрішньою стінкою 39 конічного дна 2 утворений кі-

льцевий канал 40 для сповзання вниз, відділених від очищуваних газового потоку чи рідинного потоку 35, грубодисперсних частинок забруднення 41 та домішок 42, а також грубодисперсних частинок забруднення 41 та домішок 42, що сповзають із поверхні сітчастого фільтра 27 в зону розташування штуцера 3 для видалення шламу через шлюзовий затвор 4 назовні. Гідроциклон-фільтр оснащений запобіжним клапаном максимального надлишкового тиску та насосами (на рис. 3 не показано).

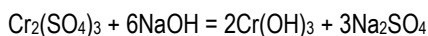
Для забезпечення проведення осадження, нейтралізації та очищення відпрацьованого електроліту установка (рис. 2) споряджена автоматизованою системою керування і функціонує наступним чином.

Приклад роботи установки для осадження, нейтралізації та очищення відпрацьованого електроліту після електрохімічного хромовання сталевих деталей.

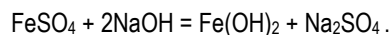
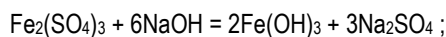
Відпрацьований електроліт із гальванічних ванн, який очищають від розчинених сполук хрому, подають по трубопроводу 5 у реактор 1, а через трубопровід 6, дозатором 7 із місткості 8 поступає відновлювальний розчин надлишку сульфату двохвалентного заліза і здійснюють електричною мішалкою 3 постійне перемішування суміші, забезпечуючи відновлення сполук шестивалентного хрому [31]



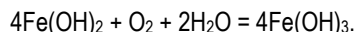
Після проходження окислювально-відновлювальної реакції трубопроводом 9 в реактор 1 через дозатор 10 із місткості 11 поступає лужний розчин при постійному перемішуванні реакційної суміші для досягнення водневого показника $\text{pH } 10 \pm 1$ з осадженням катіонів тривалентного хрому



та відповідно двох- і тривалентного заліза



Повітряним компресором із барботером 4 здійснюють насичення реакційної суміші киснем, що міститься в повітрі, забезпечуючи таким чином перетворення гідроксиду двовалентного заліза в гідроксид тривалентного заліза:



При цьому відбувається ізоморфне осадження іонів тривалентного хрому надлишком гідроксиду тривалентного заліза.

У результаті протікання хімічних реакцій утворену суспензію ізоморфного осаду $\text{Cr}(\text{OH})_3/\text{Fe}(\text{OH})_3$ із реактора 1 подають насосом 12 на фільтр 13, де відбувається відокремлення цього нерозчинного ізоморфного осаду $\text{Cr}(\text{OH})_3/\text{Fe}(\text{OH})_3$, який збирають у місткість 24. В подальшому очищений від сполук хрому та заліза розчин поступає трубопроводом 16 у реактор 14, в який, в свою чергу, через трубопровід 17 дозатором 18 із місткості 19 подають розчин-окислювач за постійного перемішування електричною мішалкою 15. Після доведення pH розчину до екологічно безпечного нейтрального рівня ($\text{pH } 6,5 \dots 8,5$) він із реактора 14 подається насосом 20 через вхідний трубопровід 22 в гідроциклон-фільтр 21, де відбувається його комбіноване очищення та фільтрування, а тверді відходи та механічні домішки (шлам)

збирають в місткість 25. Остаточо очищений розчин виходить із гідроциклон-фільтр 21 через вихідний трубопровід 23 і може в подальшому використовуватися у виробництві, забезпечуючи замкнутий цикл промислового водопостачання.

Приклад роботи установки для осадження, нейтралізації та очищення відпрацьованого електроліту плазмоелектролітичного хромовання/оксидування деталей. Оскільки під час твердого анодування та плазмоелектролітичного оксидування металів вентиляної групи використовують різноманітні електроліти – кислі, нейтральні та лужні [4, 14, 29, 33], а також плазмоелектролітичного хромовання деталей [34] тому розроблена нами технологія та установка може бути адаптована для утилізації конкретного типу електроліту шляхом вибору відповідних хімічних реагентів і режимів роботи.

В установці всі вентиля та затвор спорядженні електроприводом, а насоси – електромагнітними пускачами і слугують для забезпечення керування процесом нейтралізації та очищення електролітів в автоматизованому режимі роботи.

Більш детально розглянемо послідовність автоматизованого керування гідроциклон-фільтром (рис. 3).

1. Вихідні параметри контролю:

- напірний тиск, КПа;
- низьконапірний тиск, КПа;
- швидкість потоку, м/с.

2. Параметри контролю

- додатній перепад тиску між штуцером 14 і штуцером (5 або 7);
- додатній перепад тиску між штуцером 18 і штуцерами (5 або 7), (7 або 14);
- контроль заповнення гальванічним шламом кільцевого каналу 40 шляхом зважування маси гідроциклон-фільтра (або акустичний контроль наявності шламу в кільцевому каналі 40).

3. Параметри керування 1-го і 2-го етапів очищення

- перевищення ΔP за п.1 або за п.2 (при цьому генерується сигнал «1»).

3.1 Перший етап інтенсифікації регенерації:

- ввімкнення режиму регенерації засипки сітчастого фільтра та промивання;
- відкриття вентиля 18;
- закриття затвора 4;
- закриття вентилів 6 і 15;
- відкриття вентилів 8 і 19;
- подача чистого атмосферного повітря або рідини насосом (M_інтенсифікації);
- про завершення інтенсифікації регенерації свідчить зменшення та стабілізація ΔP між штуцерами 7 і 18;

3.2 Другий етап регенерації:

- закриття вентиля 19 і відключення насоса (M_інтенсифікації);
- відкриття вентиля 17 і включення насоса (M_промивання);
- момент завершення регенерації контролюється за станом чистого повітря або води, що виходять через штуцер 7, а також тиском між штуцерами 7 і 14;

4. Додатковий режим роботи 1-го і 2-го етапів очищення:

- одночасне проведення регенерації фільтрувальної зернистої засипки очищення, промивання сітчастого фільтра і промивання кільцевого каналу 40;

- контроль маси або акустичне визначення скупчення гальванічного шламу;
- при цьому гідроциклон-фільтр переводять в режим промивання кільцевого каналу;
- для цього відбувається закриття вентилів 6, 8, 15, 17 і відкриття шлюзового затвору 4 та вентиля 19;

5. Параметри керування 3-го етапу очищення

- стан очищення промиванням кільцевого каналу 40 визначається зважуванням гідроциклон-фільтра або акустично, а стан інтенсифікації регенерації фільтрувальної засипки та очищення сітчастого фільтра – за зменшенням від'ємного перепаду тиску ΔP (про це свідчить досягнення номінальної маси гідроциклон-фільтра та стабілізація від'ємного перепаду тиску ΔP між штуцерами 7 і 18);
- після завершення інтенсифікації регенерації фільтрувальної засипки та очищення сітчастого фільтра відбувається відключення насоса (M_інтенсифікації), закриття вентилів 8, 17 і 19, відкриття вентилів 6 і 15, часткове привідкриття шлюзового затвору 4, а гідроциклон-фільтр переходить у робочий режим.

7. Додатковий режим роботи на 3-му етапі очищення

- промивання кільцевого каналу 40 та завершення регенерації насипної фільтрувальної засипки касети (п.2 2-го етапу);
- закриття вентиля 19, відкриття вентиля 17, включення насоса (M_промивання) для остаточної регенерації і промивання кільцевого каналу;
- контроль тиску ΔP між штуцерами 7 і 14 та промивання кільцевого каналу після сигналу; зважування або акустичного контролю;
- закриття вентилів 8 і 7;
- відкриття вентилів 6 і 15;
- відключення насоса (M_промивання) і привідкриття шлюзового затвору.

8. Апаратні засоби автоматизованої системи керування

8.1 Первинні перетворювачі фізичних величин:

- датчик перепаду тиску ΔP між штуцером 14 і штуцером (5 або 7) (вимірювальний діапазон відповідно п.1 вихідних параметрів гідроциклон-фільтра);
- датчик перепаду тиску ΔP між штуцером 18 і штуцерами (5 або 7), (7 або 14) (вимірювальний діапазон відповідно п.1 вихідних параметрів гідроциклон-фільтра);
- тензоперетворювач ваги на заданий діапазон або акустичний перетворювач наявності шламу в кільцевому каналі 40;
- перетворювач швидкості потоку (вимірювальний діапазон відповідно п.1 вихідних параметрів роботи гідроциклон-фільтра).

8.2 Виконавчі елементи:

- електроприводи для керування вентилями (18, 6, 15, 8, 19, 17)
- електропровід для керування затвором (4);
- магнітні пускачі для керування насосами (M_інтенсифікації та M_промивання).

8.3 Компоненти автоматики:

- ПЛК (Програмований Логічний Контролер) SimaticS7-1200 (забезпечує обробку 14-ти дискретних вхідних сигналів і 10-ти дискретних вихідних сигналів) [35];

- СМ (Сигнальний Модуль) вводу аналогових сигналів з перетворювачів перепаду тиску ΔP і тензоперетворювача ваги (забезпечує обробку 4-х аналогових вхідних сигналів). Таким чином, вказана конфігурація ПЛК достатня для обробки всіх вхідних та вихідних сигналів під час експлуатації гідроциклон-фільтра за вищенаведеним алгоритмом функціонування.

На рис. 4 наведено конфігурацію апаратних засобів ПЛК автоматизованої системи керування гідроциклон-фільт-

ром у програмному середовищі TIA Portal (TotallyIntegrationAutomationPortal) виробництва концерну «Siemens» [36].

Апаратна конфігурація ПЛК включає:

- CPU (Central Processing Unit) CPU1214C (позиція 1 на рис. 4);
- SM (Signal Module) SM1231x4AI (позиція 2 на рис. 4);
- комунікаційне з'єднання Industrial Ethernet для програмування і обміну даними з комп'ютером (рис. 5).

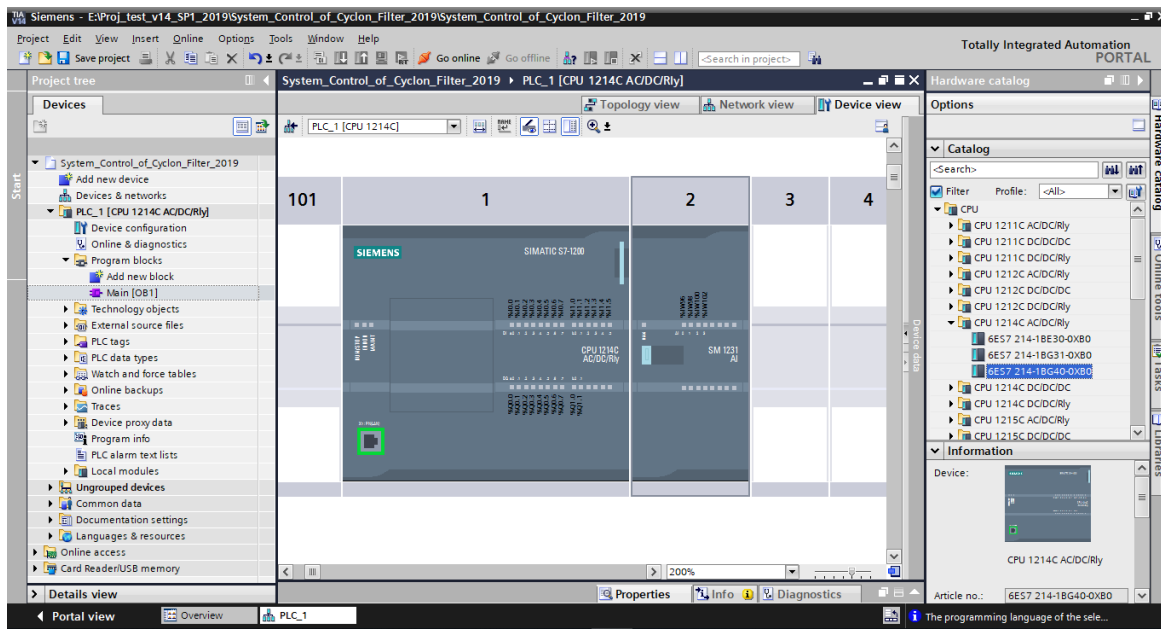


Рис. 4. Конфігурація апаратних засобів автоматизованої системи керування на основі ПЛК S7-1200

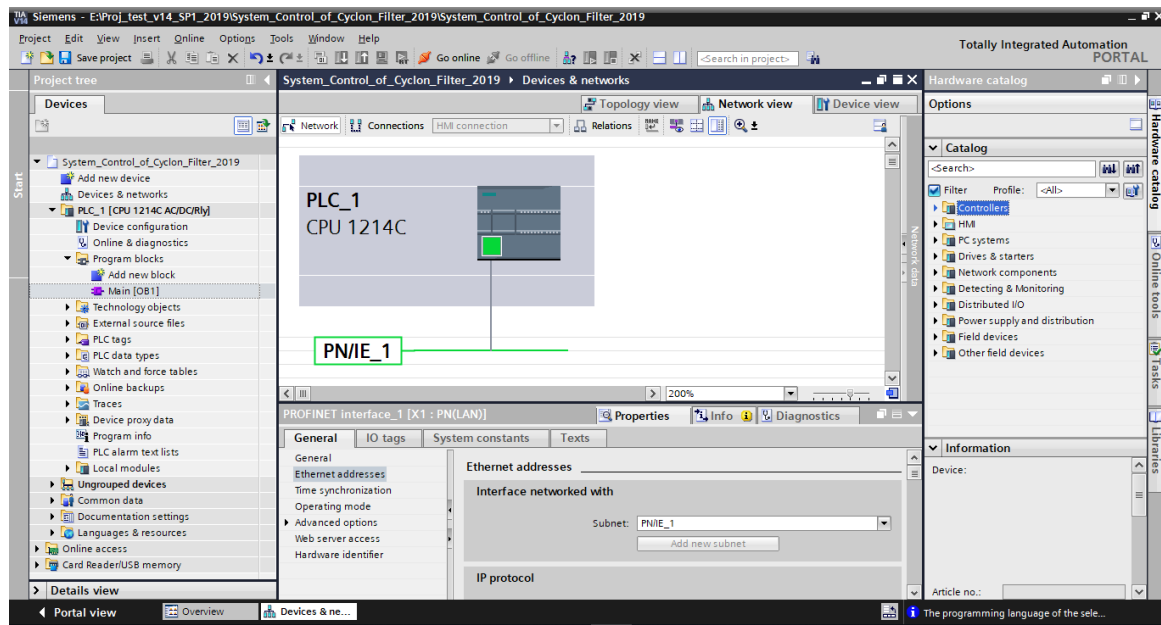


Рис. 5. Комунікаційне з'єднання Industrial Ethernet для програмування і обміну даними з комп'ютером

Прикладне програмне забезпечення ПЛК виконано на мові FBD (FunctionalBlockDiagram) [35] і реалізує функції збору даних з первинних перетворювачів фізичних величин,

обробку вимірювальних сигналів і формування сигналів керування на виконавчі елементи установки згідно алгоритму функціонування, зокрема і гідроциклон-фільтра. Крім того, може

бути розширена функціональність системи керування установкою шляхом візуалізації процесу керування на динамічних мнемосхемах з локальним та віддаленим доступом оператора (користувача) [37].

Обговорення результатів дослідження

Зростаючі вимоги щодо екологічної безпеки технологічних процесів нанесення покриттів потребують розроблення нових і вдосконалення відомих існуючих способів нейтралізації та очищення відпрацьованих електролітів гальванічних цехів для переходу до «зелених технологій».

На відміну від відомих апаратно-технологічних схем переробки відходів гальванічних виробництв [30, 31] у склад розробленої нами установки додатково введено гідроциклон-фільтр для покращення очищення та оснащено установку системою автоматизованого керування процесом осадження, нейтралізації та очищення відпрацьованих електролітів для нанесення покриттів.

Одержані відходи перероблення гальванічних виробництв доцільно повторно використовувати у різних галузях, наприклад, у будівельній індустрії [38].

Технічний результат: підвищується надійність роботи, збільшується коефіцієнт корисної дії, продуктивність та економичність установки, а також забезпечується екологічна безпека як для обслуговуючого персоналу, так і для навколишнього природного середовища.

Висновки

Проведений аналіз способів нейтралізації та очи-

щення відпрацьованих електролітів гальванічних цехів нанесення покриттів показав, що перспективним є реагентний гідрохімічний, який базується на різній здатності сполук хрому до комплексоутворення та шляхи утворення рідких і газоподібних речовин.

Застосовано мехатронний підхід і комп'ютерне моделювання під час проектування установки для осадження, нейтралізації та очищення гальванічних відходів.

Введено у склад установки нову конструкцію гідроциклон-фільтра, яка забезпечує комбіноване очищення шляхом поєднання відцентрового очищення та фільтрування рідини.

Розроблено автоматизовану систему керування, яка забезпечує ефективний та зручний у використанні контроль технологічних параметрів осадження, нейтралізації та очищення відпрацьованого електроліту гальванічних ванн.

У подальших дослідженнях планується провести оптимізацію технологічних режимів для зниження собівартості процесу нейтралізації та очищення відпрацьованого електроліту.

Подяка.

Дослідження проводилося в рамках проекту, що фінансується Міністерством освіти і науки України за рахунок видатків загального фонду державного бюджету: «Розробка екологічно чистої технології хромовання в проточному електроліті довгомірних деталей зі складною топологією поверхні», Д 8-21-П (РК 0121U109591, 2021–2022 рр.).

Список використаної літератури.

1. Zhang N., Huang C., Zhang C., Shi N. Anticorrosion Property Study on the Hard Chrome Plating Layer of Hydraulic Cylinder Rod. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 791–793. P. 394–397. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.791-793.394>.
2. Ngon D. T., Cuong L. C., Phoi N. V. Study of the Effect of Chrome Coating Layer to the Fatigue Strength of the Axial Machine Parts. *Proceedings – 3rd International Conference on Green Technology and Sustainable Development, GTSD-2016*. 2016. art. no. 7796635. P. 135–140. <https://doi.org/10.1109/GTSD.2016.40>.
3. Vinh P. N., Thien N. D., Chi C. L. Study the Effect of Chrome Coating Thickness to Fatigue Strength of the Axle-Shaped Machine Parts. *Proceedings 2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development, GTSD-2018*. 2018. art. no. 8595550. P. 221–226. <https://doi.org/10.1109/GTSD.2018.8595550>.
4. Student M. M., Pohrelyuk I. M. Modification of the Surfaces of Aluminum and Titanium Alloys Aimed at the Improvement of Their Wear Resistance and Tribological Characteristics. *Materials Science*. 2021. Vol. 57. P. 377–386. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00552-z>.
5. Influences of the current density on the performances of the chrome-plated layer in deterministic electroplating repair / Xia H., Shen X. M., Yang X. C., et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 292 (1), art. no. 012075. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/292/1/012075>.
6. Yusron R. M., Bisono R. M., Pramudia M. Effect Electrolyte Temperature and Electrode Distance to Electroplating Hard-Chrome on Medium-Carbon Steel. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1569 (4). art. no. 042007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1569/4/042007>.
7. Остапович В. В., Роп'як Л. Я., Величкович А. С. Дослідження напружено-деформованого стану вкритої хромовим покривом ділянки штока поршневого насоса двосторонньої дії в умовах позаштатного навантаження. *Методи та прилади контролю якості*. 2013. № 2 (31). С. 118–125. ULR: <https://mpky.nung.edu.ua/index.php/mpky> (дата звернення: 07.03.2021).
8. Analytical study of "crosshead - Slide rail" wear effect on pump rod stress state / Ropyak L. Y., Velychkovych A. S., Vytvytskyi V. S., Shovkoplias M. V. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1741, № 1. art. no. 012039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012039>.
9. Putri S., Pujiyanto E., Triyono J. Optimization of Electroplating Thickness Quality at Hip Joint Implant Using the Taguchi Method. *Jurnal Teknik Industri*. 2019. Vol. 20 (1). P. 45–52. <https://doi.org/10.22219/JTIUMM.Vol20.No1.45-52>.
10. Aydın Z., Aldıç G., Çimenoğlu H. An investigation on the mechanical properties of the hard chromium layer deposited by brush plating process on AISI H13 steel. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 65 (2). P. 87–92.
11. Functional Trivalent Chromium Electroplating of Internal Diameters / Kagajwala B., Hall T. D., Inman M., et al. *Products Finishing*. 2013. 1/2/2013. Digital Edition. ULR: <https://www.pfonline.com/articles/functional-trivalent-chromium-electroplating-of-internal-diameters> (дата звернення: 07.03.2021).
12. Ropiak L. Ya. Ostapovych, V.V. Optimization of process parameters of chrome plating for providing quality indicators of reciprocating pumps parts. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* (2016). Vol. 2 (5 (80)), P. 50–62.

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65719>.

13. Ropyak L. Ya., Shovkoplias M. V., Vytvytskyi V. S. Determination of machining allowance for parts with chrome coatings. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2021. № 2. Р. 117–127. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2021.242339>.

14. Защита от коррозии. Покрyтия металлические и неметаллические неорганические. Часть 1. / Ред. Р.С. Федорова. Москва : Издательство стандартов, 1990, 468 с. ISBN 5-7050-0072-3.

15. Katirci R. A chrome coating from a trivalent chromium bath containing extremely low concentration of Cr³⁺ ions. *International Journal of Surface Science and Engineering*. 2016. Vol. 10(1). P. 73–85. <https://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2016.075318>.

16. Development of a Functional Reach Compliant Trivalent Chromium Electroplating Process / Hall T. D., Snyder S. T., Taylor E. J., et al. *ECS – 2017 The Electrochemical Society, ECS Meeting Abstracts, E01-Green Electrodeposition, 4, MA2017-01*. 2017. art. no. 1045. <https://doi.org/10.1149/MA2017-01/18/1045>.

17. Electrodeposition of chromium coatings from a choline chloride based ionic liquid with the addition of water / Protsenko V. S., Bobrova L. S., Baskevich A. S., et al. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2018. Vol. 53 (5). P. 906–915.

18. Chromium valence change in trivalent chromium conversion coatings on aluminium deposited under applied potentials / Qi J., Światowska J., Skeldon P., Marcus P. *Corrosion Science*. 2020. Vol. 167. art. no. 108482. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108482>.

19. Наказ Міністерства охорони здоров'я України «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць» від 14.01.2020 р. № 52 (Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 10 лютого 2020 р. за № 156/34439). *Офіційний вісник України* від 25.02.2020 – 2020 р., № 15, С. 20, стаття 608, код акта 98079/2020. ULR: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0156-20#Text> (дата звернення: 07.03.2021).

20. Наказ Міністерства охорони здоров'я України «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних речовин у ґрунті» від 14.07.2020 р. № 1595 (Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 31 липня 2020 р. за № 722/35005). *Офіційний вісник України* від 18.08.2020 – 2020 р., № 64, С. 107, стаття 2084, код акта 100354/2020. ULR: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0722-20#Text> (дата звернення: 07.03.2021).

21. Наказ Міністерства охорони здоров'я України «Про затвердження Державних санітарних норм та правил "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною" (ДСанПіН 2.2.4-171-10» від 12.05.2010 р. № 400 (Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 01 липня 2010 р. за № 452/17747). *Офіційний вісник України* від 16.07.2010 – 2010 р., № 51, С. 99, стаття 1717, код акта 51857/2010. ULR: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text> (дата звернення: 07.03.2021).

22. Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України «Про затвердження Правил приймання стічних вод до систем централізованого водовідведення та Порядку визначення розміру плати, що справляється за понаднормативні скиди стічних вод до систем централізованого водовідведення» від 01.12.2017 р. № 316 (Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 15 січня 2018 р. за № 56/31508). *Офіційний вісник України* від 02.02.2018 – 2010 р., № 10, С. 132, стаття 383, код акта 88931/2018. ULR: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0056-18#Text> (дата звернення: 07.03.2021).

23. ДСТУ ISO 11885:2005 Визначення 33 елементів методом атомно-емісійної спектроскопії з індуктивно-зв'язаною плазмою (ISO 11885:1996, IDT). Київ : Держспоживстандарт України, 2007. ULR: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=51733 (дата звернення: 07.03.2021).

24. Пляцук Л. Д., Мельник О. С. Аналіз технологій очистки гальванічних стоків в Україні. *Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки*. 2008. № 2 С. 116–121. ULR: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/1280> (дата звернення: 07.03.2021).

25. Wastewater purification technology by twostage treatment in electrical device of a compact local installation / Chelyadyn L., Kostyshyn V., Chelyadyn V., et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3(10 (105)). P. 63–70. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206815>.

26. Мельник Е. С. Альтернативная конструкция для электрокоагуляционной обработки сточных вод гальванопроизводства, содержащих хром. *Химия и технология воды*. 2016. № 1. С. 77–87. ULR: <http://jwct.org.ua/docs/t38-n1-249-melnik-77-87.pdf> (дата звернення: 07.03.2021).

27. Екологічна компанія Е.Т.Е (Ecology Tech Energy). Очищення стічних вод від гальванічного виробництва : веб-сайт. ULR: <https://ete.net.ua/ochyshhennya-stichnyh-vod-vid-galvanichnogo-vyrobnyctva/> (дата звернення: 07.03.2021).

28. Очищення стічних вод гальванічних виробництв сорбційними методами / Большаніна С. Б., Гурець Г. М., Балабуха Д. С., Міляева Д. В. *Екологічна безпека*. 2014. № 1/2014(17). С. 114–118. ULR: http://www.kdu.edu.ua/EKB_jurnal/2014_1%2817%29/Pdf/114.pdf (дата звернення: 07.03.2021).

29. Роп'як Л. Я., Малишевська О. С. Екологічні аспекти утилізації відпрацьованого електроліту для мікродугового оксидування. *Прогресивні технології у машинобудуванні PTME-2019*: матер. доповідей VIII Міжнар. наук.-техн. конф. (4-8 лютого 2019 р.). Івано-Франківськ-Яремче : ІФНТУНГ. 2019. С. 208–209. ULR: <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/8682> (дата звернення: 07.03.2021).

30. Проценко О. В., Дмитриков В. П., Сокур М. І. Технологічна схема комплексної утилізації відходів хромо-нікелевих гальванічних виробництв. *Екологічна безпека*. 2015. № 2/2015(20) С. 91–95. ULR: [http://www.kdu.edu.ua/EKB_jurnal/2015_2\(20\)/PDF/91-95.pdf](http://www.kdu.edu.ua/EKB_jurnal/2015_2(20)/PDF/91-95.pdf) (дата звернення: 07.03.2021).

31. International application PCT, Publication Number WO2015076773, IPC C02F9/08, C02F1/72, C01G37/14, C02F101/22.

Method for cleaning industrial water and wastewater of chromium compounds. Nosovskyi O. I., Verovka O. S. Publication Date 28.05.2015, International Application No.PCT/UA2014/000034, International Filing Date 20.03.2014, Priority Data u 201313557 21.11.2013 UA. ULR: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2015076773&_cid=P11-L26LP4-89503-1 (дата звернення: 07.03.2021).

32. Пат. на винахід 123124 Україна, МПК В01D50/00, В04С9/00, В01D24/46, В01D29/62. Циклон-фільтр для очищення газів або рідин. Роп'як Л. Я., Малишевська О. С., Маковійчук М. В., Пригоровська Т. О., Величкович А. С., Шовкопляс М. В. – № а201909830, заявл. 16.09.2019, опубл. 17.02.2021, Бюл. № 7. 15 с. ULR: <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1477700/> (дата звернення: 07.03.2021).

33. Influence of the Composition of Electrolyte for Hard Anodizing of Aluminum on the Characteristics of Oxide Layer / Student M. M., Pohrelyuk I. M., Hvozdet'skyi V. M., et al. *Materials Science*. 2021. Vol. 57. P. 240–247. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00538-x>.

34 Quan C., He Y. Properties of nanocrystalline Cr coatings prepared by cathode plasma electrolytic deposition from trivalent chromium electrolyte. *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 269. P. 319–323. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.02.001>.

35. SIMATIC S7. S7-1200 Programmable Controller. System Manual: Siemens (A5E02486680-AK). – V4.2, 09/2016. 1614 p. ULR: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109741593/simatic-s7-s7-1200-programmable-controller?dti=0&lc=en-US> (дата звернення: 07.03.2021).

36. SIMATIC. STEP 7 Professional V14 SP1 System Manual: Siemens. – 04/2017. 16098 p. ULR: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109747136/step-7-professional-v14-sp1?dti=0&lc=en-US> (дата звернення: 07.03.2021).

37. Заміховський Л. М., Николайчук М. Я. Левицький І. Т. Автоматизована система частотного керування насосними агрегатами з функціями диспетчеризації. *Інтелектуальний продукт вчених, винахідників і раціоналізаторів Прикарпаття: Щорічний каталог найвагоміших винаходів, корисних моделей, промислових зразків і раціоналізаторських пропозицій*. Довід. вид. / Редакційна колегія: Б. І. Середюк, Ж. П. Табанець, Л. М. Шляхтич, Л. Б. Бабій. Івано-Франківськ, 2017. С. 77–81.

38. Cannio M., Barbieri L., Bondioli F. Chromium (VI) galvanic bath: Chemical treatments and possible recycling ways of the obtained sludges. Management of Hazardous Residues Containing Cr(VI). In: *Management of Hazardous Residues Containing Cr(VI)* / Ed: Maria José Balart Murria. Nova Science Publishers, Inc. 2011. P. 135–158. ISBN: 978-1-61668-267-5. ULR:

https://www.academia.edu/17484865/ChemInform_Abstract_Chromium_VI_Galvanic_Bath_Chemical_Treatments_and_Possible_Recycling_Ways_of_the_Obtained_Sludges (дата звернення: 07.03.2021).

Ropyak L. Ya., Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine
Nykolaychuk M. Ya., Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine
Shovkoplyas M. V., Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine
Vytyvtskyi V. S., Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas Ivano-Frankivsk, Ukraine
Romaniv M. M., Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine
Bilinskyi V. M., Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine
Automated installation for cleaning of galvanic waste

The paper considers the main types of coatings and their prevalence in the world refer to frequency of application in mechanical engineering. It is noted that the most metal coatings (i.e., electrochemical chrome coatings) and non-metallic (i.e., oxide coatings formed in different electrolytes) coatings are the most common among them. The analysis of methods and equipment for utilization of wasted electrolytes for the formation of coatings on machine parts in galvanic shops and sections is carried out. Electrolytes for electrochemical chromium plating of steels and for plasma electrolytic oxidation of aluminum alloys were selected as research objects. A systematic approach to solving the current problem of utilization of spent electrolytes of galvanic baths for coating is used. A systematic approach to solving the current problem of waste electrolytes utilization from galvanic baths is used, which is a particularly important task at the stage of transition to “green technologies” application. A technological scheme of waste electrolyte processing has been developed, which includes the precipitation, neutralization, and purification processes. A mechatronic approach and computer simulation were used to design the installation. The installation to implement the technology includes two reactors and a hydrocyclone filter connected by pipelines and equipped with pumps, liquid level indicators, pH metric equipment and an automated control system. The installation includes a new design of hydrocyclone filter, which provides combined cleaning of liquids from suspended particles of contamination by a simultaneous combination of centrifugal cleaning and filtration, as well as allows to wash its annular gap and regenerate the filter granular backfill filter cartridge. The developed technology of waste electrolytes utilization is efficient during operation and does not require expensive equipment; the process is environmentally and human friendly, and recycled products can be reused in the production cycle.

Key words: electrochemical chrome coating, plasma electrolytic oxide coating, technological process, electrolyte, mechatronics, reactor, hydrocyclone filter, green technologies.

Дата надходження до редакції: 31.05.2021

АНАЛІТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ВПЛИВУ ЙМОВІРНОСТІ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНОГО КОНТРОЛЮ НА БЕЗВІДМОВНІСТЬ САМОХІДНИХ ОБПРИСКУВАЧІВ

Любченко Ірина Сергіївна

аспірантка

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: 0000-0001-5259-1760

e-mail: lub4enko.ira@gmail.com

Роговський Іван Леонідович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: 0000-0002-6957-1616

e-mail: rogovskii@nubip.edu.ua

В статті обговорюються питання застосування чисельних методів оптимізації другого порядку в задачах стохастичного програмування, що включають функцію ймовірності впливу на показники безвідмовності самохідних обприскувачів систем параметрів вбудованого технічного контролю, таких як повнота і глибина технічного контролю.

Розроблено аналітичні моделі деяких типових структур безвідмовності самохідних обприскувачів, в яких враховуються характеристики технічного контролю за працездатністю елементів.

Представлена графічна інтерпретація залежності показників безвідмовності самохідних обприскувачів від повноти технічного контролю. Підтверджено існування впливу повноти технічного контролю на показники безвідмовності структур.

Розглянутий підхід із подібним аналізом дозволяє обґрунтовано висувати вимоги до характеристик систем технічного контролю самохідних обприскувачів.

Ключові слова: безвідмовність, обприскувач, ймовірність, контроль, параметр, елемент, працездатність.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.16>

Постановка проблеми.

Застосування чисельних методів оптимізації другого порядку в задачах встановлення впливу ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів, як стохастичного програмування, є включення функцій ймовірності. Остання може виступати в розглянутих задачах як критерій оптимізації або як функція обмеження. Відомо, що функція ймовірності не є опуклою або увігнутою по всій області визначення [1]. Як правило, функція ймовірності досліджується на квазівипуклість і використовуються властивості, що випливають з її квазівипуклості; дані властивості висвітлені [2]. Твердження про властивості квазівипуклості функції ймовірності спираються на поняття квазівигнутих та логарифмічно увігнутих ймовірнісних заходів, що розглядаються у [3]. Також, в інших роботах розглядаються властивості множин рівня функції ймовірності, наприклад, в наведених вище роботах прямо не розглядаються питання, суміжне з аналізом опуклості функцій або їх оцінкою – а саме обчислення чи оцінка значення похідних функцій ймовірності [4]. Основна складність у обчисленні похідних функції ймовірності полягає у функції Хевісайда, що входить в інтегральне уявлення функції ймовірності [5]. Таким чином, при прямому диференціюванні функції ймовірності з'являється дельта-функція Дірака, а похідна у випадку набуває вигляду поверхневого інтеграла [6]. Раніше були отримані формули для прямого обчислення похідної функції ймовірності у формі поверхневого інтеграла Рімана [7], у формі інтеграла Лебега по поверхні [8], а також у вигляді виразів, що використовують метод трансформації інтеграла Лебега [9]. Також було показано, що при деяких обмеженнях похідна представлена у вигляді суми поверхневого та об'ємного інтегралів [10]. Дані методи обчис-

лення точної похідної функції ймовірності досить складні через інтегрування по поверхні, яка може бути задана неявно.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Складнощі при прямому обчисленні точних значень функції ймовірності та її похідної зумовлюють розвиток альтернативних методів розв'язання задач стохастичного програмування, наприклад, методів часткової лінеаризації моделі [11] або методів переходу до еквівалентних детермінованих задач. Автором запропонована гладка апроксимація функції ймовірності [12], що дозволяє застосовувати інші методи розв'язання задач стохастичного програмування з імовірнісним критерієм або імовірнісними обмеженнями. Функція Хевісайда у вираженні функції ймовірності замінюється на її гладку апроксимацію – сигмоїди. Показано, що апроксимоване значення функції ймовірності сходять до точного при прагненні параметра сигмоїди до нескінченності [13]. Більш того, приватні похідні гладкої апроксимації за рівнем втрат і компонентами вектора управління сходяться до відповідних похідних вихідної функції ймовірності і мають вигляд об'ємного інтеграла, який обчислюється відносно легко. У [14] було отримано узагальнення такого підходу на випадок довільної розмірності вектора випадкових параметрів, а також запропонований спосіб застосування гладкої апроксимації функції ймовірності в задачі побудови альфа-ядра ймовірнісної міри, а також в оптимізації задачі з поліедральною функцією втрат і ймовірнісним критерієм.

В [15] показана можливість застосування гладкої апроксимації функції ймовірності до прикладних задач стохастичного програмування, раніше описаних у [16]: задачі проектування системи водопостачання в пустельній місцевості, задачі визначення площі злітно-посадкової смуги, а також за-

дачі визначення безлічі допустимих швидкостей вітру для забезпечення безпечної посадки із заданою ймовірністю. У всіх випадках були отримані рішення, близькі до оптимальних, і переважають за значенням функції ймовірності рішення, отримані за допомогою довірчого методу. Таким чином, заміна функції ймовірності на її гладку апроксимацію дозволяє отримати хорошу апроксимацію вихідного завдання як за значенням критерію, і по оптимальному управлінню. Для вирішення завдань [17] використовувався метод проєкції градієнта – чисельний метод оптимізації першого порядку. Знання других похідних гладкої апроксимації функції ймовірності дозволить використовувати чисельні методи другого порядку, що може підвищити ефективність та точність рішення.

В роботі [18] отримані вирази для других похідних гладкої апроксимації функції ймовірності. Численні експерименти показують, що одержувані другі похідні гладкої апроксимації сходяться до других похідних вихідної функції ймовірності при прагненні параметра показника експоненти в сигмоїді до нескінченності [18]. Другі похідні точної функції ймовірності оцінювалися за допомогою кінцевих різниць [19]. Для порівняння близькості апроксимованого та точного значень похідної розглянуто три приклади: з білінійною функцією втрат [20], квадратичною функцією втрат [21], а також із логарифмічною функцією втрат [22]. Доказ збіжності апроксимації других похідних до точним значенням виходять за рамки представленої роботи. Як приклад застосування алгоритму розв'язання задачі з розглянутими апроксимаціями наведено розв'язання задачі портфельної оптимізації з логарифмічною функцією втрат та ймовірним критерієм.

Метою досліджень є дослідження огляд сучасних методів логіко-ймовірнісного аналізу самохідних обприскувачів та застосування марковське моделювання зі встановлення впливу технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів.

Результати досліджень.

Розглянемо випадковий вектор $X \in R^n$ ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів з абсолютно безперервним розподілом і щільністю розподілу $f: R^n \rightarrow R^1$. Також розглянемо строго кусочно-монотонну функцію $\Phi(u, x): R^m \times R^n \rightarrow R^1$, залежить від реалізації x випадкового вектора X та вектор управління $u \in U \subset R^m$. Функція $\Phi(u, x)$ ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів називається функцією втрат і відображає втрати при вибраному векторі управління u та реалізації x випадкових параметрів вектор.

Оскільки реалізація вектора випадкових параметрів невідома на етапі вибору вектора управління u , а $\Phi(u, x)$ де-факто є випадковою функцією, вибір оптимального управління неможливий виходячи з прямого порівняння значень функції втрат при різних векторах управління ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів. Тому як критерій оптимізації використовується ймовірнісний критерій, чисельно рівний ймовірності того, що втрати не перевищать заздалегідь заданий рівень φ . Таким чином, функція ймовірності визначається як:

$$P_\varphi(u) = P\{X: \Phi(u, X) \leq \varphi\} \quad (1)$$

З фізичного сенсу функції втрат ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних

обприскувачів впливає, що оптимальне управління має доставляти максимум функції ймовірності, з чого впливає оптимізаційне завдання:

$$P_\varphi(u) \rightarrow \max_{u \in U} \quad (2)$$

У деяких випадках немає однозначного правила визначення допустимого рівня втрат ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів φ . У цій ситуації може застосовуватися підхід із фіксацією допустимої ймовірності та мінімізацією величини, яку втрати не перевершать із цією фіксованою ймовірністю. Це призводить до розгляду задачі квантильної оптимізації, тобто завдання стохастичного програмування з функцією квантилі як критерій.

Функція квантилі визначається як:

$$\varphi_\alpha(u) = \min\{\varphi: P_\varphi(u) \geq \alpha\} \quad (3)$$

а задача квантильної оптимізації формулюється як:

$$\varphi_\alpha(u) \rightarrow \min_{u \in U} \quad (4)$$

У рамках цієї статті розглядається лише функція ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів. Питання апроксимації функції квантилі та її похідних розглянуто в [23], а вирази для других похідних можуть бути отримані аналогічним чином.

Для початку наведемо основні співвідношення та визначення. Функція ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів може бути представлена таким чином:

$$\begin{aligned} P_\varphi(u) &= M\{I\{\Phi(u, X) \leq \varphi\}\} = \\ &= \int_G I\{\Phi(u, X) \leq \varphi\} f(x) dx = \\ &= \int_G \theta(\varphi - \Phi(u, X)) f(x) dx, \end{aligned} \quad (5)$$

де $G = \text{supp}(X) \subseteq R^n$ – носій розподілу вектора X ,

$I\{\Phi(u, X) \leq \varphi\}$ і $\theta(\varphi - \Phi(u, X))$ – індикаторна функція і функція Хевісайда відповідно:

$$\begin{aligned} I\{\Phi(u, X) \leq \varphi\} &= \begin{cases} 1, & \Phi(u, X) \leq \varphi \\ 0, & \Phi(u, X) > \varphi \end{cases} \\ \theta(\varphi - \Phi(u, X)) &= \begin{cases} 1, & \varphi - \Phi(u, X) \geq 0 \\ 0, & \varphi - \Phi(u, X) < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

Основна ідея апроксимації зводиться до заміни функції Хевісайда в поданні функції ймовірності її гладку апроксимацію – сигмоїди:

$$S_\theta(y) = \frac{1}{1+e^{-\theta y}} \quad (7)$$

де параметр θ визначає крутість кривої на околиці нуля і є великим позитивним числом. Таким чином, апроксимація функції ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів набуває вигляду:

$$P_\varphi^\theta(u) = \int_G S_\theta(\varphi - \Phi(u, X)) f(x) dx \quad (8)$$

Для компактного запису похідних такої апроксимації введемо позначення для функції – похідної сигмоїди:

$$S'_\theta(x) = \theta S_\theta(x)(1 - S_\theta(x)) \quad (9)$$

Тоді приватні похідні компонентів вектора управління ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвід-

мовність самохідних обприскувачів u_i при $i = \overline{1, m}$ і приватна похідна за рівнем втрат φ мають вигляд:

$$\frac{\partial P_{\varphi}^{\theta}(u)}{\partial u_i} = - \int_G S'_{\theta}(\varphi - \Phi(u, x)) \cdot \Phi'_{u_i}(u, x) \cdot f(x) dx \quad (10)$$

$$\frac{\partial P_{\varphi}^{\theta}(u)}{\partial \varphi} = \int_G S'_{\theta}(\varphi - \Phi(u, x)) f(x) dx \quad (11)$$

Співвідношення (11) фактично визначає щільність розподілу втрат ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів при заданому управлінні u . Показано, що для будь-кого $i = \overline{1, m}$ при $\theta \rightarrow \infty$ вірні такі твердження:

$$S_{\theta}(x) \xrightarrow{n.l.} \Theta(y), P_{\varphi}^{\theta}(u) \rightarrow P_{\varphi}(u),$$

$$\frac{\partial P_{\varphi}^{\theta}(u)}{\partial u_i} \rightarrow \frac{\partial P_{\varphi}(u)}{\partial u_i}, \frac{\partial P_{\varphi}^{\theta}(u)}{\partial \varphi} \rightarrow \frac{\partial P_{\varphi}(u)}{\partial \varphi} \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 P_{\varphi}^{\theta}(u)}{\partial u_i \partial u_j} = \int_G S''_{\theta}(\varphi - \Phi(u, x)) \cdot \Phi'_{u_i}(u, x) \cdot \Phi'_{u_j}(u, x) \cdot f(x) dx -$$

$$- \int_G S'_{\theta}(\varphi - \Phi(u, x)) \cdot \Phi''_{u_i u_j}(u, x) \cdot f(x) dx \quad (14)$$

Важливим окремим випадком є випадок лінійної або білінійної функції втрат ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів.

Для компактного запису других похідних функції ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів введемо позначення для другої похідної сигмоїди:

$$S''_{\theta}(x) = \theta^2 S(x)(1 - S(x))(1 - 2S(x)) \quad (13)$$

Тоді друга змішана приватна похідна функції ймовірності компонентів управління ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів u_i і u_j $i = \overline{1, m}, j = \overline{1, m}$ набуде вигляду:

При цьому другі похідні функції втрат ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів будуть рівні нулю, і друга змішана приватна похідна набуде більш простого вигляду:

$$\frac{\partial^2 P_{\varphi}^{\theta}(u)}{\partial u_i \partial u_j} = \int_G S''_{\theta}(\varphi - \Phi(u, x)) \cdot \Phi'_{u_i}(u, x) \cdot \Phi'_{u_j}(u, x) \cdot f(x) dx \quad (15)$$

Наведені результати розрахунків функції ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів, її гладкої апроксимації, а також їх перших та других похідних. Похідні точної функції ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів оцінювалися за допомогою кінцевих різниць, а її вихідні значення – за допомогою чисельного інтегрування засобами бібліотеки SciPy мови Python. Значення апроксимацій функції ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів та її похідних, що являють собою інтеграли відповідно до формул (10), (14), (15), обчислювалися з допомогою методу Монте-Карло на 8000 реалізацій.

Розглянемо приклад із однією випадковою величиною, одномірним управлінням та білінійною функцією втрат ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів:

$$\Phi(u, X) = 1 + u + X + uX \quad (16)$$

Нехай значення цільового рівня втрат ймовірності

зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів φ рівне 2, а випадкова величина X має нормальний розподіл: $X \sim N(1, 1)$. У прикладі проводиться порівняння точних і апроксимованих значень функції ймовірності, її першої другої похідних, обчислених відповідними способами, за різних значень параметра сигмоїди θ . Результати порівняння представлені рис. 1-3.

Як видно з рисунків 1-3, апроксимація функції ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів та її похідні досить швидко сходяться до точних значень. При цьому при фіксованому значенні параметра θ відносні похибки похідних зростають зі збільшенням порядку диференціювання форма кривої апроксимованої функції починає сильніше залежати від вибірки, через яку відбувається розрахунок інтегралів шляхом Монте-Карло, тобто, у міру збільшення розміру вибірки очікується загасання коливань значень апроксимованої функції другої похідної. Доказ цієї збіжності не предмет дослідження цієї статті.

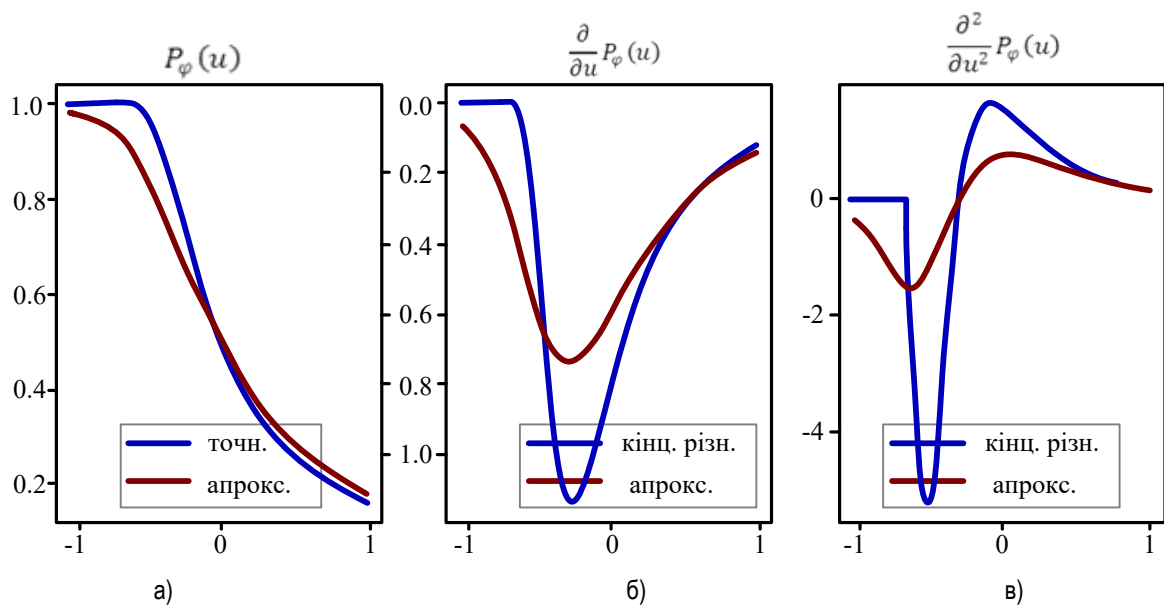


Рис. 1. Порівняння точних та апроксимованих значень функцій ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів при параметрі сигмоїди 2 та білінійної функції втрат: а) функції ймовірності; б) першою похідною; в) другою похідною

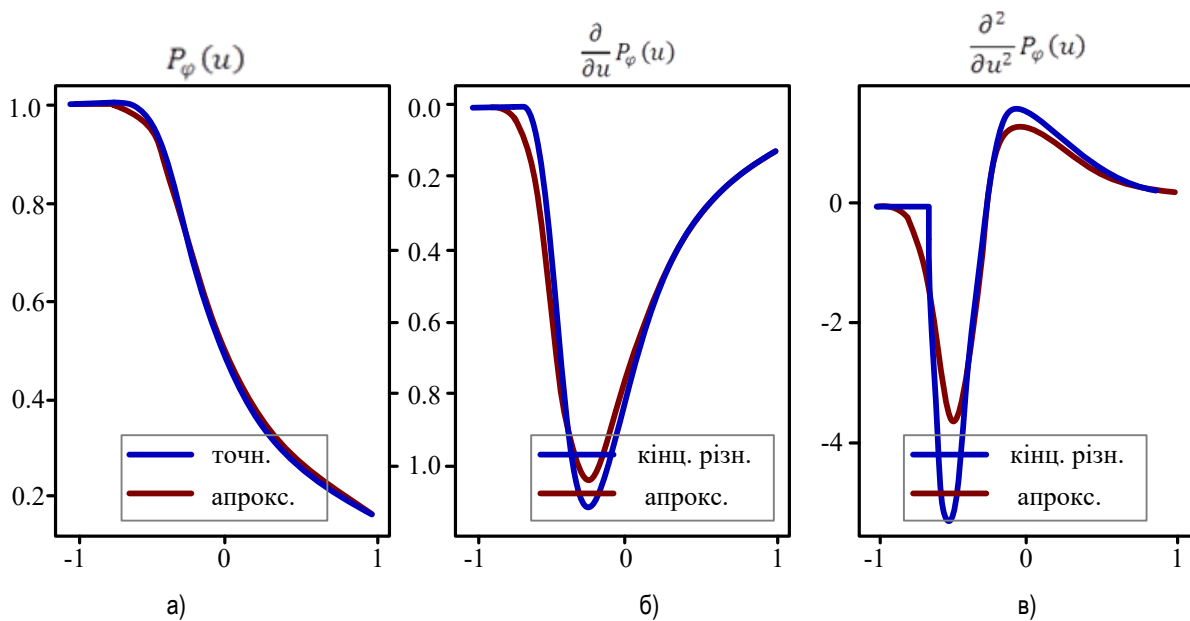


Рис. 2. Порівняння точних та апроксимованих значень функцій ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів при параметрі сигмоїди 5 та білінійної функції втрат: а) функції ймовірності; б) першою похідною; в) другою похідною

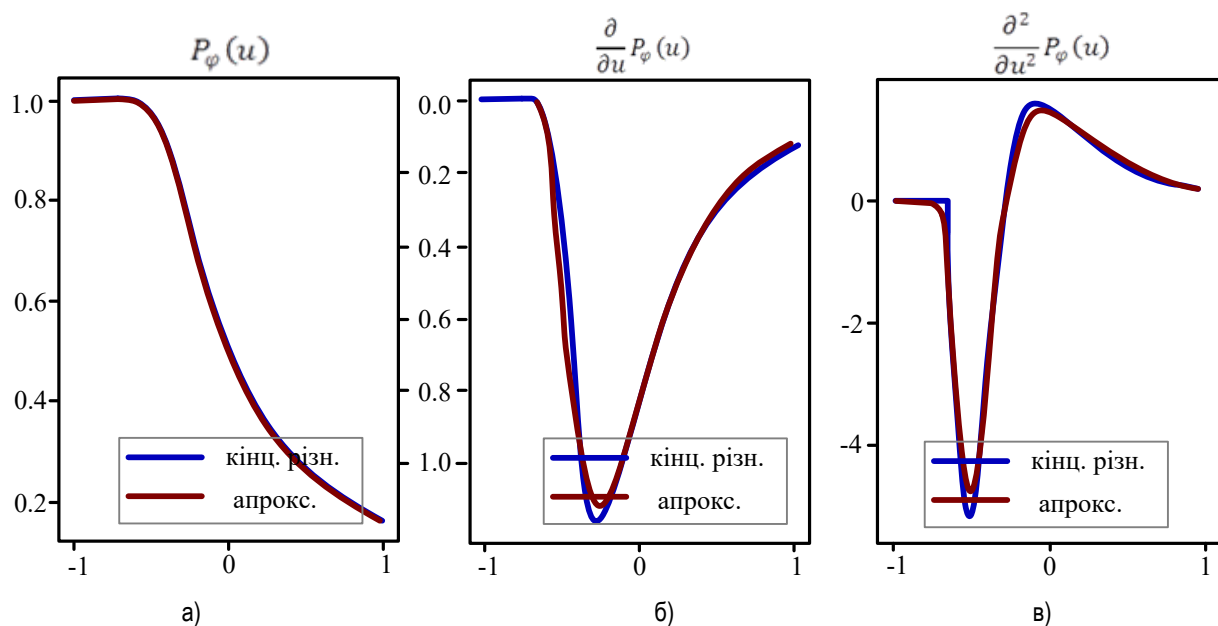


Рис. 3. Порівняння точних та апроксимованих значень функцій ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів при параметрі сигмоїди 10 та білінійної функції втрат: а) функції ймовірності; б) першою похідною; в) другою похідною

Розглянемо приклад із квадратичною функцією втрат. Нехай

$$\Phi(u, X) = 1 + u + X + (X - u)^2 \quad (17)$$

Значення цільового рівня втрат та розподіл випадкової величини ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів X беремо аналогічно попередньому прикладу: $\varphi = 2$ $X \sim N(1, 1)$. Як і в першому випадку, порівнюємо точні та апроксимовані значення функції ймовірності, її першої другої похідних при значенні параметра сигмоїди $\theta = 10$.

Завдання формування ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів з логарифмічною функцією втрат ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів, критерієм у формі математичного очікування та рівномірним розподілом ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів. Як функцію втрат ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів розглянемо логарифм:

$$\Phi(u, X) = \ln(C_0(1 + (1 - u_1 - u_2)b_0 + u_1X_1 + u_2X_2)) \quad (18)$$

Ймовірнісний критерій набуде вигляду:

$$P_\varphi(u) = P\{X: \Phi(u, X) \leq \varphi\} \quad (19)$$

Ризиковість розподілена рівномірно:

$$X_1 \sim U(-1, 1 + 2m_1), X_2 \sim U(-1, 1 + 2m_2) \quad (20)$$

Параметр C_0 для простоти приймемо рівним 1. Значення інших параметрів поставимо наступним чином:

$$\varphi = 0.5, b_0 = 0.05, m_1 = 0.1, m_2 = 0.2 \quad (21)$$

Результати побудови поверхонь точної та апроксимованої ймовірнісних функцій ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів при $\theta = 50$ представлені на рисунку 4. При розрахунках передбачалося, що розрахунки обмежені областю, де $u_1 + u_2 \leq 1$. Також були побудовані поверхні другої змішаної частної похідної управління ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів для точної і апроксимованої функцій ймовірності (фрагменти поверхонь представлені на рисунку 5).

Для прискорення розрахунків вихідна поверхня для точної функції ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів будувалася по грубій сітці з поділом відрізка $[0, 1]$ з кожної змінної на 15 частин. Це призводить до нестійкості оцінок змішаної похідної приватної за допомогою кінцевих різниць. Тим не менш, друга змішана частина похідна гладкої апроксимації адекватно відображає форму поверхні, а глибина зростає зі збільшенням параметра сигмоїди. Порівняння поверхонь для значень параметра сигмоїди 25 та 50 представлено на рисунку 6.

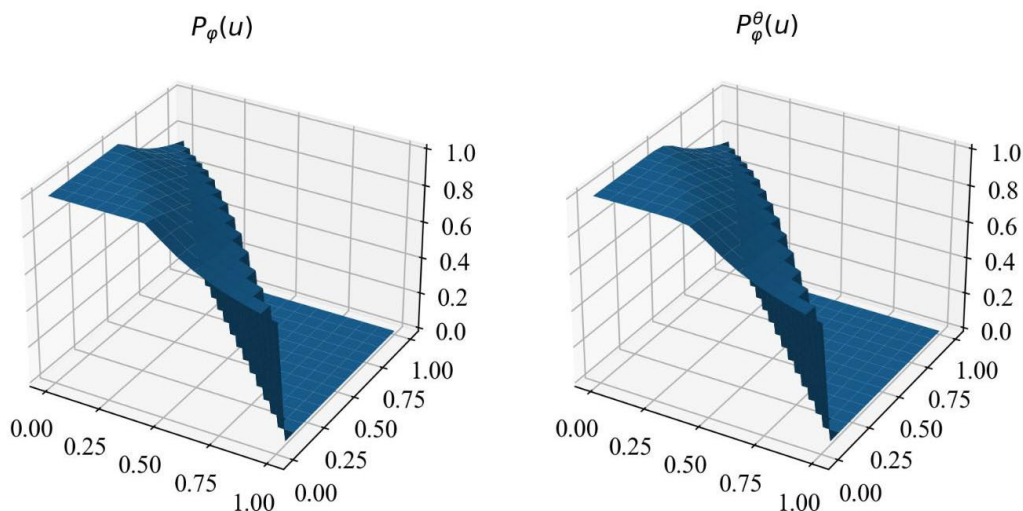


Рис. 4. Порівняння поверхонь точної (ліворуч) та апроксимованої (праворуч) імовірнісних функцій ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів

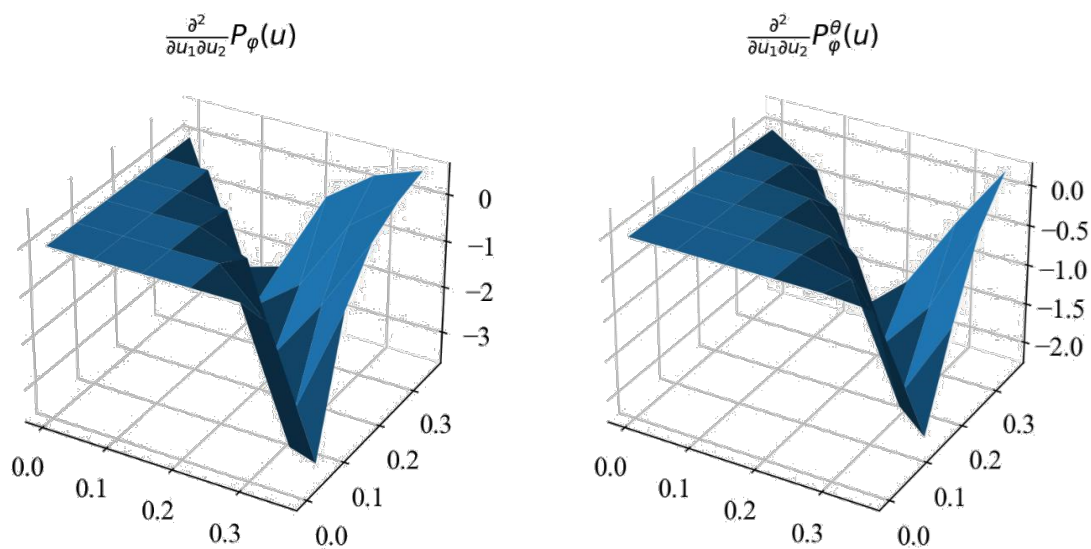


Рис. 5. Порівняння фрагментів поверхонь других змішаних приватних похідних точної (ліворуч) та апроксимованої (праворуч) імовірнісних функцій ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів

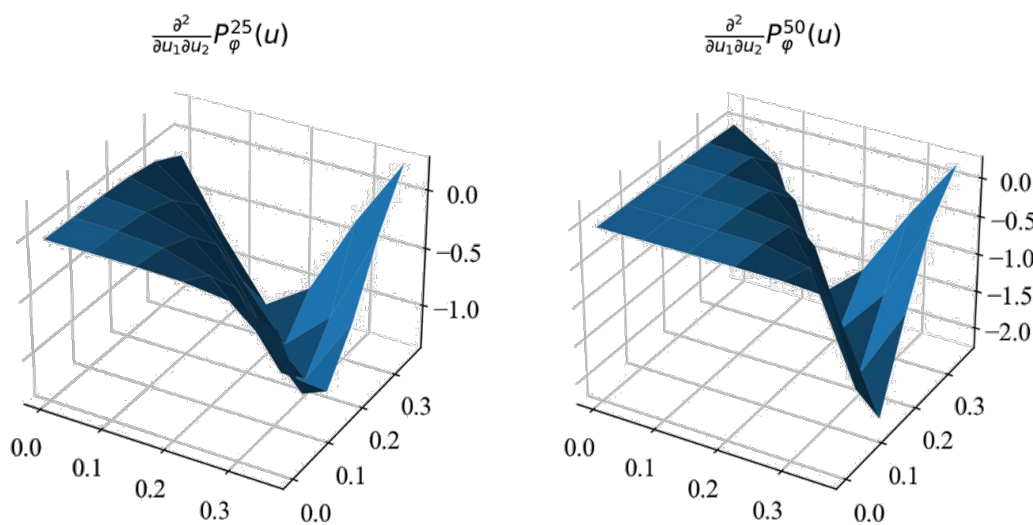


Рис. 6. Порівняння фрагментів поверхонь ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів других змішаних частних похідних гладкої апроксимації для параметрів сигмоїди 25 (ліворуч) та 50 (праворуч)

Розв'язання задачі ймовірним критерієм, логарифмічною функцією та рівномірним розподілом ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів:

$$\Phi(u, X) = \ln(C_0(1 + (1 - u_1 - u_2)b_0 + u_1X_2 + u_2X_2)) \quad (22)$$

$$X_1 \sim U(-1, 1 + 2m_1), X_2 \sim U(-1, 1 + 2m_2) \quad (23)$$

$$C_0 = 1, \varphi = 0.1, b_0 = 0.05, m_1 = 0.1, m_2 = 0.25 \quad (24)$$

Завдання максимізації функції ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів формулюється як:

$$P_\varphi(u) = P\{X: \Phi(u, X) \leq \varphi\} \rightarrow \max_{u \in U} u \quad (25)$$

Пропонується вирішити наближену до (25) задачу, в якій точна функція ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів замінена на гладку апроксимацію. Зазначимо, що поверхня цієї функції ймовірності буде дзеркальним відображенням поверхні, зображеної на рисунку 5, оскільки функції ймовірності знак нерівності змінений на протилежний. Задамо значення параметра сигмоїди $\theta = 50$ та кількість реалізацій для методу Монте-Карло дорівнює 15000.

Для вирішення задачі використовується модифікація методу Ньютона. В якості початкового наближення візьмемо точку $u^{[0]} = (0.25, 0.25)$. Згідно класичного методу Ньютона, чергове наближення точки оптимуму визначається через наближене перебування нуля градієнта цільової функції, тобто, напрям зростання чи зменшення цільової функції не враховується. У модифікації нове наближення оптимуму кожному кроці вибирається як найкраще за значенням критерію з трьох наближень: отриманого методом Ньютона, отриманого під час руху з кроком, протилежним методу Ньютона, і навіть отриманого методом градієнтного спуску. Нове наближення оптимуму методом Ньютона обчислюється як:

$$u^{[i+1]} = u^{[i]} - H^{-1}(u^{[i]}) \cdot \nabla P_\varphi^\theta(u^{[i]}) \quad (26)$$

де $H^{-1}(u^{[i]})$ – матриця, зворотна Гесіану функції $P_\varphi^\theta(\cdot)$, обчислена у поточній точці $u^{[i]}$.

При вирішенні враховуємо обмеження на невід'ємність змінних та обмеження на суму компонентів вектора управління ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів $u_1 + u_2 \leq 1$. При наближенні поточного рішення до межі області допустимих рішень обмежується крок алгоритму до досягнення відповідного кордону. При 19 досягненні межі області допустимих рішень крок алгоритму замінюється на проекцію отриманого кроку алгоритму межу досягнутого обмеження. Результати роботи алгоритму рішення представлені на рисунку 7.

Результати роботи алгоритму рішення представлені на рисунку 7.

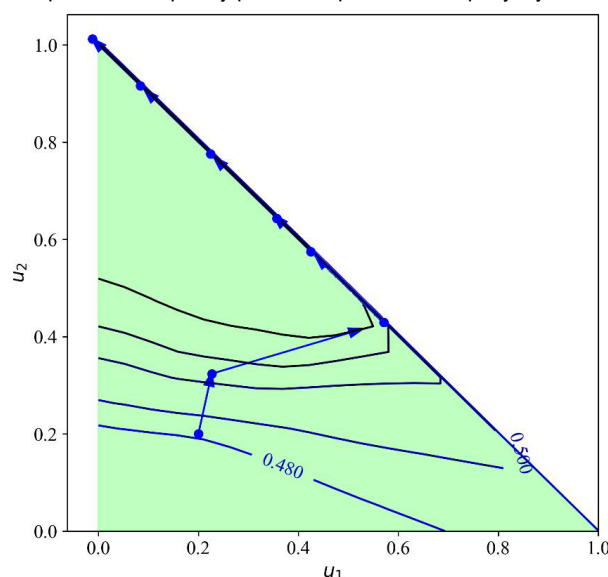


Рис. 7. Ілюстрація покрокової роботи алгоритму досягнення оптимального управління ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів

На рисунку 7 чорними та синіми лініями показані рівні функції ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів, стрілками – переходи від керування на поточному кроці до керування на наступному кроці. З рисунку видно, що алгоритм сходиться у разі за вісім кроків, а оптимальним управлінням є точка $[0, 1]$.

Висновки

В наведеній статті отримані аналітичні положення для других похідних гладкої апроксимації функції ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів компонентів вектора управління.

Наведені приклади демонструють, що ці похідні добре апроксимують відповідні похідні точної функції ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів, аналітичне обчислення яких дуже утруднене. Знання других похідних дозволяє застосовувати чисельні методи другого порядку до розв'язання задач стохастичного програмування з ймовірнісним критерієм чи обмеженням у вигляді функції ймовірності. У цьому випадку вихідна функція ймовірності зміни параметрів технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів замінюється на свою гладку апроксимацію.

Список використаної літератури.

1. Najafi, P., Asoodar, M., Marzban, A., Hormozi, M. 2015. Reliability analysis of agricultural machinery: A case study of sugarcane chopper harvester. *AgricEngInt: CIGR Journal* March 17(1): 158–165
2. Gurcanli, E., Bilir, S., Sevim, M. 2015. Activity based risk assessment and safety cost estimation for residential building construction projects. *Safety Science* 80: 1–12.
3. Khamidullina, E.A., Timofeeva, S.S., Smirnov, G.I. 2017. Accidents in coal mining from perspective of risk theory. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 262: 012210.
4. Aven, T. 2016. Risk assessment and risk management: review of recent advances on their foundation. [European Journal of Operational Research](#) 253(1): 1–13.
5. Tyutrin, S. 2019. Improving reliability of parts of mounted mower according to monitoring results by fatigue gauges from tin foil. *Engineering for rural development* 18: 22–27.

6. Зубко В.М. Технологічна і техніко-економічна оцінка машинних агрегатів при проведенні догляду за посівами при вирощуванні сільськогосподарських культур / В. М. Зубко, О. В. Дубровіна // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – К., 2013. – Вип. 185, ч. 1. – С. 352-363.
7. Voinalovych, O., Hnatiuk, O., Rogovskii, I., Pokutnii, O. 2019. Probability of traumatic situations in mechanized processes in agriculture using mathematical apparatus of Markov chain method. *Engineering for rural development* 18: 563–569.
8. Rogovskii, I., Titova, L., Novitskii, A., Rebenko, V. 2019. Research of vibroacoustic diagnostics of fuel system of engines of combine harvesters. *Engineering for rural development* 18: 291–298.
9. Shih-Heng, T., Ming-Hsiang, S., Wen-Pei, S. 2018. Development of digital image correlation method to analyse crack variations of masonry wall. *Sadhana* 6: 767–779.
10. Gyansah, L., Ansah, A. 2020. Fatigue crack initiation analysis in 1060 steel. *Research journal of applied sciences engineering and technology* 4(2): 319–325.
11. Nykyforchyn, H., Lunarska, E., Tsyrlunyk, O. 2019. Environmentally assisted “in-bulk” steel degradation of long term service gas trunkline. *Engineering Failure Analysis* 17: 624-632.
12. Corinne, B., José, R. 2017. Estimating the Hurst parameter. *Statistical Inference for Stochastic Processes*. Springer Verlag, 10(1): 49–73.
13. Kypris, O., Nlebedim, I., Jiles, D. 2016. Measuring stress variation with depth using Barkhausen signal. [Journal of Magnetism and Magnetic Materials – Science Direct](#) 407: 377–395.
14. Erokhin, M., Pastukhov, A., Kazantsev, S. 2019. Operability assessment of drive shafts of John Deere tractors in operational parameters. *Engineering for rural development* 18: 28–33.
15. Xi, L., Songlin, Z. 2019. Changes in mechanical properties of vehicle components after strengthening under low-amplitude loads below the fatigue limit. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 32(10): 847–855.
16. Rejovitzky, E., Altus, E. 2013. On single damage variable models for fatigue. *International Journal of Damage Mechanics* 22(2) 2: 268–284.
17. Pisarenko, G., Voinalovych, O., Rogovskii, I., Motrich, M. 2019. Probability of boundary exhaustion of resources as factor of operational safety for agricultural aggregates. *Engineering for rural development* 18: 291–298.
18. Sánchez-Hermosilla, J., Rincón, V., Páez, F. 2011. Field evaluation of a self-propelled sprayer and effects of the application rate on spray deposition and losses to the ground. *Pest Management Science* 67(8): 942–947.
19. Kalinichenko, D., Rogovskii, I. 2017. Modeling technology in centralized technical maintenance of combine harvesters. *ТЕКА* 17(3): 93–102.
20. Zou, F., Kang, J., Xiao, M., Ji, G. 2017. Hydrostatic driving system for self-propelled sprayer. *Engineering Journal* 26(3): 12–18.
21. Rogovskii, I. 2020. Algorithmically determine the frequency of recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research* 11(1): 155–162.
22. Chen, Y., Mao, E., Li, W., Chen, J. 2020. Design and experiment of a high-clearance self-propelled sprayer chassis. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 13(2): 71–80.
23. Любченко І. С. Аналітичні положення впливу повноти технічного контролю на безвідмовність самохідних обприскувачів / І. С. Любченко, І. Л. Роговський // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: механізація та автоматизація виробничих процесів. – 2021. – Вип. 1(43). – С. 14-21. <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.1.3>.

Lyubchenko I. S., National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Ukraine)

Rogovskii I. L., National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Ukraine)

Analytical provisions of influence of probability of changing the parameters of technical control on failurelessness of self-propelled sprayers

The article discusses the application of numerical methods of second-order optimization in stochastic programming problems, which include the probability function of the impact on the failure rates of self-propelled sprayers systems built-in technical control, such as completeness and depth of technical control.

Analytical models of some typical failure-free structures of self-propelled sprayers have been developed, which take into account the characteristics of technical control over the efficiency of the elements.

A graphical interpretation of the dependence of the reliability of self-propelled sprayers on the completeness of technical control is presented. The existence of the influence of completeness of technical control on the indicators of failure of structures is confirmed.

The considered approach with a similar analysis allows to reasonably make requirements to the characteristics of technical control systems of self-propelled sprayers.

Key words: faultlessness, sprayer, probability, control, parameter, element, efficiency.

Дата надходження до редакції: 31.05.2021