

ISSN 2664-262X

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Центральноукраїнський національний технічний університет

**ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.
ТЕХНІЧНІ НАУКИ**

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

**В и п у с к 8(39)
Частина I**

Кропивницький • 2023

ISSN 2664-262X

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

**CENTRAL UKRAINIAN SCIENTIFIC BULLETIN.
TECHNICAL SCIENCES**

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

**Issue 8(39)
Part I**

Kropyvnytskyi • 2023

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

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

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

Рекомендовано до друку Вченою радою Центральноукраїнського національного технічного університету, протокол від 30 жовтня 2023 року № 2.

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

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

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

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

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

Науковий вісник заснований у 1997 році.

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

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

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

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

DOI: 10.32515/2664-262X

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 539.319

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.3-9](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.3-9)

В. І. Калініченко, ст. наук. співр., канд. техн. наук, **А. В. Рутковський**, ст. наук. співр., канд. техн. наук

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України, м. Київ, Україна
e-mail: coating@ipp.kiev.ua, rut2000@ukr.net

С.І. Маркович, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: markob0@ukr.net

Мікроструктура поверхневого шару титанового сплаву модифікованого вакуумним іонним азотуванням в імпульсному режимі

Проведено металографічне дослідження мікроструктури модифікованих поверхонь титанових сплавів зі специфічною структурою та глибиною дифузійного шару, заповненої азотом. Встановлено що азотування (до 900°C) в тліючому розряді титану VT1-0 та VT1-00 дозволяє значно підвищити мікротвердість за рахунок властивостей азоту та його сполук з титаном, зберігаючи при цьому вихідні механічні властивості матеріалу основного матеріалу. Зміна параметрів процесу азотування (температура, тиск, середовище зберігання та година азотування), що призводить до зміни фізико-механічних характеристик, структури, складу, фазового та хімічного складу поверхні азотованого шару: мікротвердість поверхні до 10500 МПа; товщина азотованого шару до 500 мікрон; товщина нітридного шару до 25 мікрон; різниця зсуву фаз TiN, Ti₂N, Tiα(N); різний градієнт твердості по глибині, що дозволяє оптимізувати потужність поверхні кулі в конкретних умовах експлуатації.

мікроструктура, титанові сплави, модифікована поверхня, азотування, мікротвердість

Постановка проблеми. Механічна міцність та довговічність елементів конструкцій забезпечується правильним вибором матеріалів, із яких вони виготовлені, та спеціальними функціональними властивостями поверхневого шару, що забезпечуються шляхом нанесення покриттів або за рахунок зміни структурного стану поверхневих шарів матеріалу за допомогою їх модифікації. Застосування титанових сплавів забезпечує унікальні властивості, серед яких висока питома міцність, корозійна стійкість і досить висока температура плавлення. Однак, застосування даних матеріалів обмежує їх невисока твердість, надзвичайно низька зносостійкість, висока схильність до налипання, великий коефіцієнт тертя в парі практично з усіма матеріалами, висока хімічна активність під час нагрівання вище 500°C та чутливість до концентраторів напружень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для зниження недоліків титанових сплавів використовують різноманітні технологічні процеси зміцнення шляхом модифікації поверхневих шарів [1,2]: імплантацією іонами різних металів [3]; поверхневою обробкою концентрованими потоками енергії [4]; плазовими потоками [5]; поверхнево-пластичним деформуванням [6]; ультразвуковою обробкою [7]; лазерною обробкою [8,9]; дифузійним насиченням [10] та хіміко-термічною обробкою [11]. З усіх методів модифікації найбільшого поширення набув такий метод ХТО як

азотування однак цьому виникає тривалий високотемпературний нагрів, що викликає крихкість одержуваних азотованих шарів, призводить до зміни структури металу та зниження характеристик міцності. Актуальним є розвиток методів модифікації поверхні з мінімальним або низьким термічним впливом, зокрема, метода вакуумного іонного азотування в імпульсному режимі [12, 13, 14]. Така модифікація поверхні підвищує довговічність, границю витривалості та зносостійкість деталей, тому дослідження впливу параметрів процесу на мікроструктуру є актуальною задачею.

Постановка завдання. Провести металографічні дослідження мікроструктури модифікованих поверхонь з визначенням структури та глибини насичення дифузійного шару азотом

Виклад основного матеріалу. Мікросліфи (рис.1) для металографічних досліджень виготовлялись на установці «Alpha & Beta» (виробник ТМ BUEHLER) за стандартною методикою (не допускаючи нагартування та перегріву) з подальшим виявленням мікроструктури методом хімічного травлення в травнику: HNO_3 : HF : H_2O (7 мл. : 2 мл. : 50 мл.).

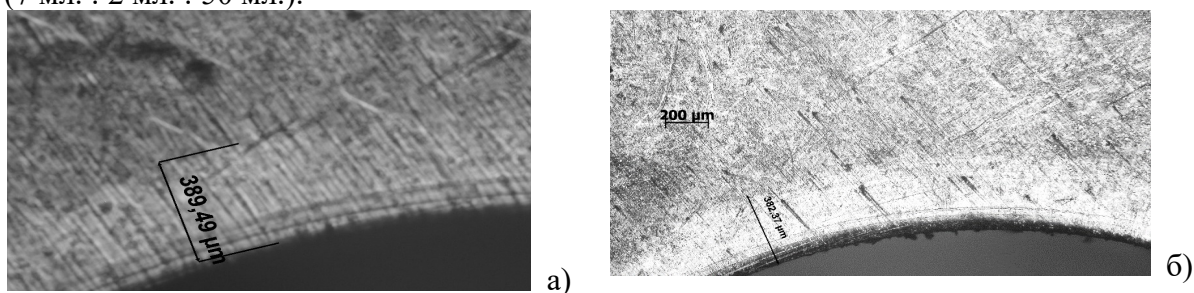


Рисунок 1 – Мікросліфи (а, б) для металографічних досліджень виготовлялись на установці «Alpha & Beta» (виробник ТМ BUEHLER) за стандартною методикою

Джерело: розроблено авторами

Металографічні дослідження зразків проводили в поздовжньому перетині по товщині на оптичному інвертованому мікроскопі «AXIOVERT 40 MAT» з фіксацією мікроструктур цифровою фотокамерою AXIОCAM 305 в програмі «ZEN core v3.1 при збільшеннях в діапазоні 100x...1000x. Типова макро- та мікроструктура зразка №1 із титанного сплаву VT1-0 в поздовжньому перетині по товщині листа представлена відповідно на рис. 2 та рис. 3. Досліджуваний зразок №1 характеризується рівновісною поліедричною структурою α -фази з переважно дрібнодисперсними вклученнями та незначною кількістю крупних вклучень розміром 5-7 мкм в зернах α -фази. В осьовій зоні по товщині листа спостерігається ліквідаційна смуга (рис. 2).

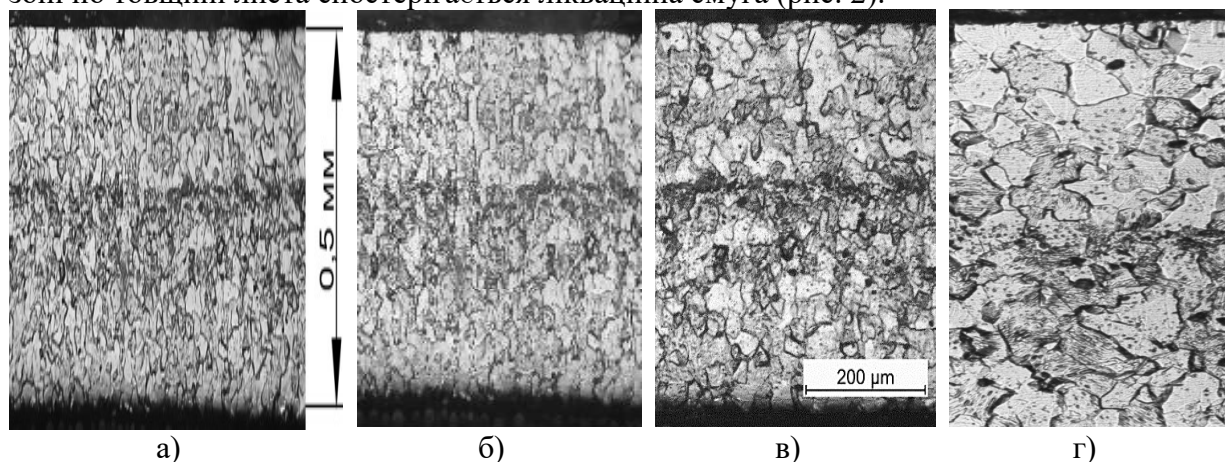


Рисунок 2 – Макроструктура зразка №1 із титанного сплаву VT1-0 в поздовжньому перетині по товщині листа

Джерело: розроблено авторами

Як показали дослідження (рис. 3), товщина нітридного шару при вакуумному іонному азотуванні в імпульсному режимі титанового сплаву VT1-0 складає не більше $15 \div 20$ мкм, під яким знаходиться зона внутрішнього азотування меншої твердості, яка поступово зменшується по експоненційній залежності до твердості основи.

Структура матеріалу основи при низькотемпературному азотуванні не змінюється. На поверхні утворюється азотований шар з різною за товщиною нітридною зоною, яка залежить від режиму азотування і слабо травився травником.

Типова мікроструктура зразка №2 в поздовжньому перетині по товщині листа при різних збільшеннях представлена на рис. 3.

Мікроструктура зразка №2 (рис. 4), як і зразка №1 (рис. 3), представляє собою рівноважну поліедричну структуру α -фази з ліквідаційною смугою в осевій зоні (по товщині листа), але, на відміну від зразка №1 (рис. 2), характеризується значно більшою щільністю дрібнодисперсних, і, особливо, крупних включень (розміром 15-20 мкм) в зернах α -фази.

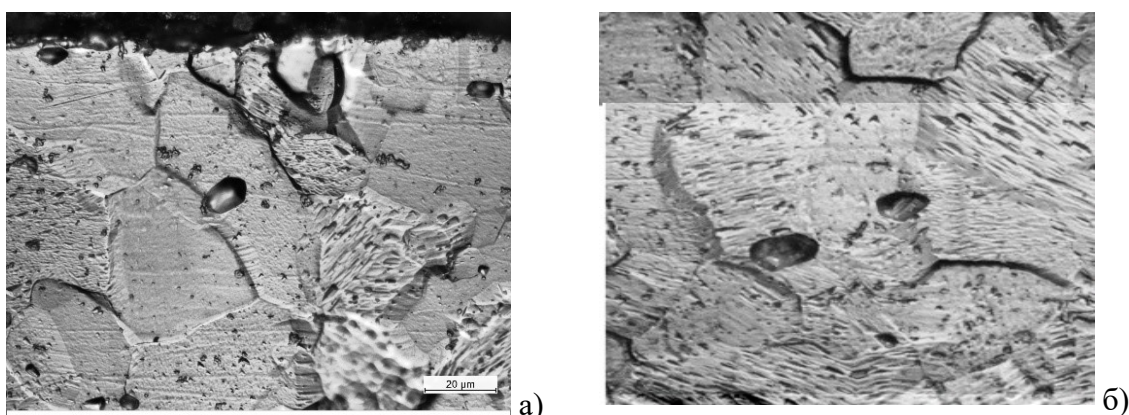


Рисунок 3 – Типова мікроструктура зразка №1 із титанового сплаву VT1-0 в поздовжньому перетині по товщині листа а) - мікроструктура біля лицьової поверхні листа; б) - мікроструктура біля тильної поверхні листа

Джерело: розроблено авторами

Дослідження мікроструктури зразків із титанового сплаву VT1-0 та VT1-00 до азотування (рис. 5, рис.7) та після азотування (рис. 6, рис. 8) в тліючому розряді проводилося на мікроскопі «MeF-3» (фірма "Reichert", Австрія). Для більш детального порівняльного аналізу був проведений дюрметричний аналіз. Вимірювання мікротвердості покриттів проводили на мікротвердомірі "Micromet-II" (фірма Buchler, Швейцарія).

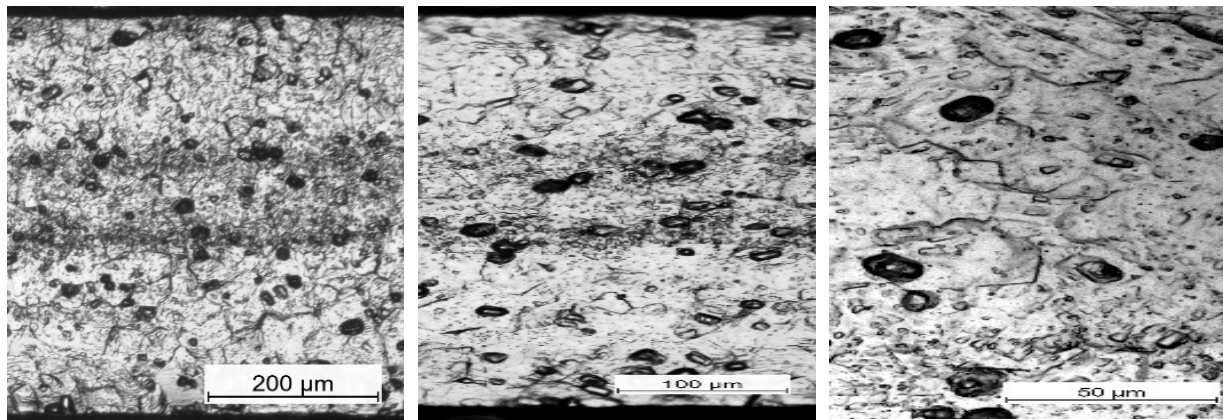
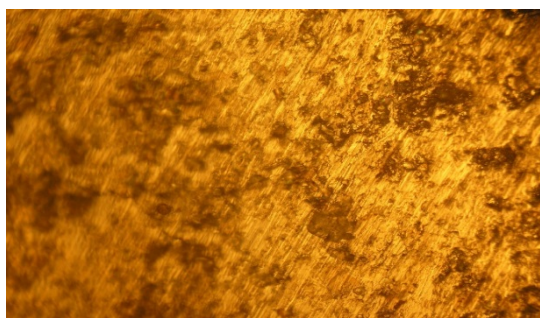
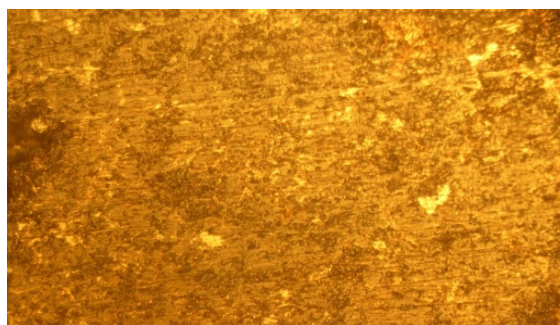


Рисунок 4 – Типова мікроструктура зразка №2 в поздовжньому перетині по товщині листа при різних збільшеннях

Джерело: розроблено авторами



а)

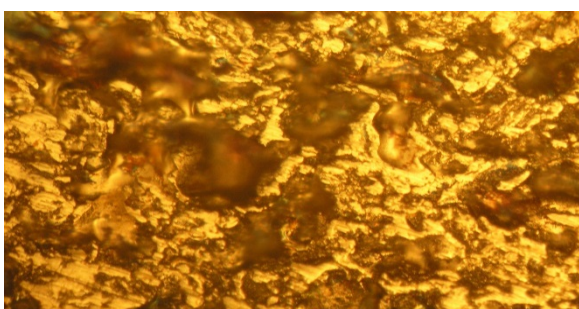


б)

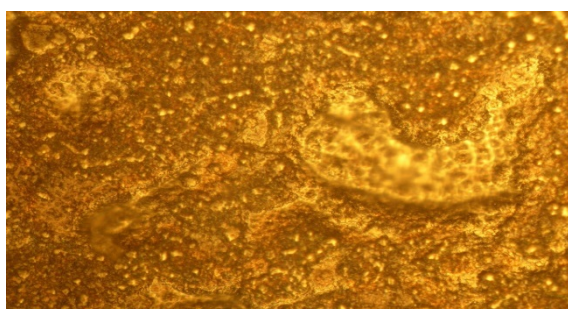
Рисунок 5 – Мікроструктура поверхні зразка №1 із титанового сплаву VT1-0 до азотування (а) та після (б) x 400

Джерело: розроблено авторами

Товщина нітридного шару складає 100...150 мкм. Мікротвердість верхнього шару – HV0,05 10540±1000 МПа, нижнього і середнього – HV0,05 10510±1010 МПа



а)

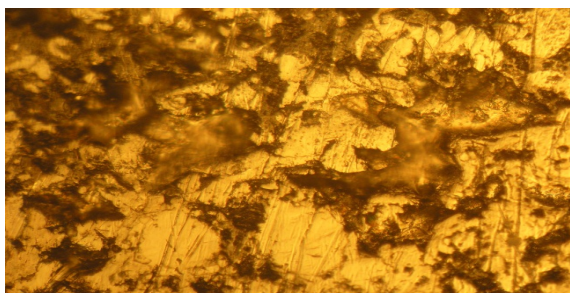


б)

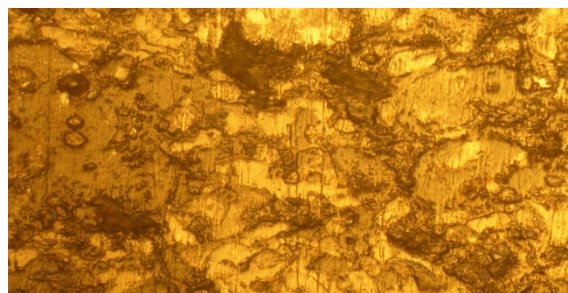
Рисунок 6 – Мікроструктура поверхні зразка №2 із титанового сплаву VT1-0 до азотування (а) та після (б) x 400

Джерело: розроблено авторами

Товщина нітридного шару 90...120 мкм, Мікротвердість верхнього шару - HV0,05 12290±580 МПа, нижнього і середнього - HV0,05 9900±570 МПа HV0,05 9850±580



а)

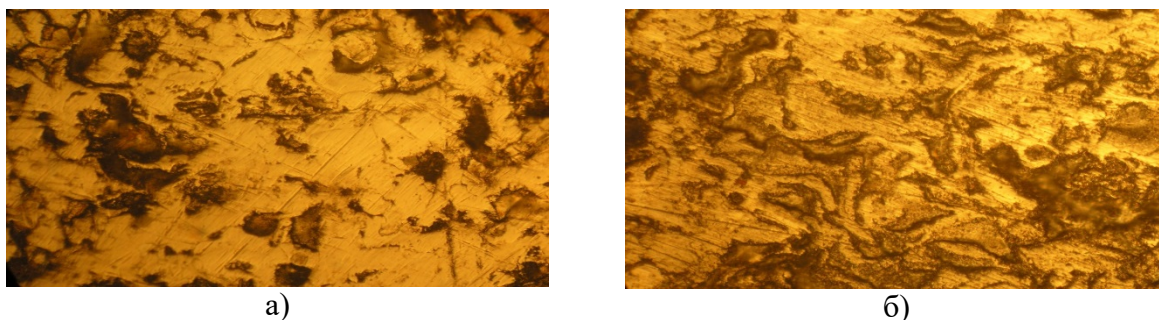


б)

Рисунок 7 – Мікроструктура поверхні зразка №1 із титанового сплаву VT1-00 до азотування (а) та після (б) x 400

Джерело: розроблено авторами

Товщина нітридного шару 95...125 мкм. Мікротвердість поверхні після азотування HV0,05 8600±1340МПа, зустрічаються включення твердістю HV0,05 13000-20000 МПа.



а) б)
Рисунок 8 – Мікроструктура поверхні зразка №2 із титанового сплаву VT1-0 до азотування (а) та після (б)

Джерело: розроблено авторами

Товщина нітридного шару 85...105 мкм. Мікротвердість поверхні після азотування HV0,05 8500 ± 1310 МПа, зустрічаються включення твердістю HV0,05 12500-18000 МПа.

Висновки. Азотування (до 900°C) в тліючому розряді титану VT1-0 та VT1-0 дозволяє значно підвищити мікротвердість за рахунок властивостей азоту та його сполук з титаном, зберігаючи при цьому вихідні механічні властивості матеріалу основи.

1. Зміна параметрів процесу азотування (температура, тиску, складу насичуючого середовища і часу азотування) викликає зміну фізико-механічних характеристик, структури, товщини, фазового і хімічного складу поверхневого азотованого шару: мікротвердість поверхні до 10500 МПа; товщину азотованого шару до 500 мкм; товщину нітридного шару до 25 мкм; різне співвідношення фаз TiN, Ti₂N, Tiα(N); різний градієнт твердості по глибині, що дозволяє оптимізувати властивості поверхневого шару в конкретних умовах експлуатації.

Список літератури

1. Ляшенко Б.А., Рутковский А.В., Мирненко В.И. Поверхностное упрочнение титановых сплавов для перспективных разработок. *Артиллерийское и стрелковое вооружение*. 2004. №2. С. 50–53.
2. Nazmy M., Staubli M. Alloy modification of γ TiAl for improved mechanical properties (Поліпшення механічних властивостей сплаву γ TiAl шляхом модифікації). *Scr. met. Et mater.* 1994. 31, №7. P. 829-833.
3. Шаркеев Ю.П., Кукареко В.А., Ерошенко А.Ю. и др. Ионная имплантация как метод повышения циклической долговечности титана в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях. *Перспективные материалы*. 2011. №12. С. 136 – 142.
4. Иванов Ю.Ф., Тересов А.Д., Громов В.Е., Будовских Е.А., Клопотов А.А. Структурно-фазовые состояния наноструктурированных поверхностных слоев титана VT1-0 после комбинированной электронно-ионно-плазменной обработки. *Решетневские чтения*. 2014. Т. 1, С. 291-293.
5. Гогаев К.О., Радченко О.К. Деформування титанових сплавів прокатуванням. *Металознавство та обробка металів*. 2001. №4. С. 25–29.
6. Шалапко Ю.І., Гончаров В.В. Підвищення антифрикційних властивостей титанового сплаву OT4 при лазерному опромінуванні поверхні. *Вісн. Технол. ун-ту Поділля*. 1999. № 6. С. 177–178.
7. Yue T.M., Cheung T.M., Man H.C. The effects of laser surface treatment on the corrosion properties of Ti-6Al-4V alloy in Hank's solution. *J. Mater. Sci. Lett.* 2000. 19, №3. P. 205–208.
8. Gurrappa I. Effect of aluminizing on the oxidation of the titanium alloy, IMI 834 (Влияние алюминирования на окисление титанового сплава IMI 834). *Oxid. Metals*. 2001. 56, №1-2. P. 73-87.
9. Федірко В., Яськів О., Притула А. Азотування і борування титанових сплавів - перспективи комбінованого оброблення. *Машинознавство*. 2003. №4. С. 23–26.
10. Федорак Р.М. Дифузійне залізнення та цементация титану. *Металознавство та обробка металів*. 1998. №4. С. 52–55.
11. Ляшенко Б.А. О достоинствах технологии вакуумного азотирования. *Оборудование и инструмент*. 2005. №12. С. 20-21.

12. Рутковский А. В., Маркович С.И., Михайлюта С.С. Аналіз напружено-деформованого стану іонноазотованих зразків із покриттям в умовах ізотермічної та термоциклічної повзучості. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 6(37), ч. I. С. 3-9
13. Рутковский А.В., Маркович С.И., Михайлюта С.С. Теплостійкість іонноазотованих алюмінієвих сплавів при ізотермічному та термоциклічному впливі. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. Вип. 3(34). С. 72-81

Referencis

1. Ljashenko, B.A., Rutkovskij, A.V. & Mirnenko, V.I. (2004). Poverhnostnoe uprochnenie titanovykh splavov dlja perspektivnykh razrabotok [Surface hardening of titanium alloys for advanced developments]. *Artillerijskoe i strelkovoje vooruzhenie – Artillery and small arms*, 2, 50–53 [in Russian].
2. Nazmy, M. & Staubli, M. (1994). Alloy modification of γ TiAl for improved mechanical properties. *Scr. met. Et mater*, Vol. 31, №7. P. 829-833 [in English].
3. Sharkeev, Ju.P., Kukareko, V.A., Eroshenko, A.Ju. et al. (2011). Ionnaja implantacija kak metod povyshenija ciklicheskoj dolgovechnosti titana v krupnozernistom i ul'tramelkozernistom sostojanijah [Ion implantation as a method for increasing the cyclic durability of titanium in coarse-grained and ultrafine-grained states]. *Perspektivnye materialy – Promising materials*, 12, 136 – 142 [in Russian].
4. Ivanov, Ju.F., Teresov, A.D., Gromov, V.E., Budovskih, E.A. & Klopotov, A.A. (2014). Strukturno-fazovye sostojanija nanostrukturirovannykh poverhnostnykh sloev titana VT1-0 posle kombinirovannoj jelektronno-ionno-plazmennoj obrabotki [Structural-phase states of nanostructured surface layers of titanium VT1-0 after combined electron-ion-plasma treatment]. *Reshetnevskie chtenija – Reshetnev readings*, Vol. 1, S. 291-293 [in Russian].
5. Hohaiev, K.O. & Radchenko, O.K. (2001). Deformuvannia tytanovykh splaviv prokatuvanniam [Deformation of rolled titanium alloys]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv – Metal science and processing of metals*, 4, 25–29 [in Ukrainian].
6. Shalapko, Yu.I. & Honcharov, V.V. (1999). Pidvyshchennia antyfryktsiinykh vlastyvoستي tytanovoho splavu OT4 pry lazernomu oprominiuvanni poverkhni [Goncharov V.V. Increasing the antifriction properties of the OT4 titanium alloy during laser irradiation of the surface]. *Visn. Tekhnol. un–tu Podillia – Visn. Technol. Podillia University*, 6, 177–178 [in Ukrainian].
7. Yue, T.M., Cheung, T.M. & Man, H.C. (2000). The effects of laser surface treatment on the corrosion properties of Ti-6Al-4V alloy in Hank's solution. *J. Mater. Sci. Lett.* 19, №3, P. 205–208 [in English].
8. Gurrappa, I. (2001). Effect of aluminizing on the oxidation of the titanium alloy, IMI 834. *Oxid. Metals*. 56, №1-2, P. 73-87 [in English].
9. Fedirko, V., Yaskiv, O. & Prytula, A. (2003). Azotuvannia i boruvannia tytanovykh splaviv - perspektyvy kombinovanoho obrobлення [Nitriding and boronizing of titanium alloys - prospects for combined processing]. *Mashynoznavstvo – Mechanical engineering*, 4, 23–26 [in Ukrainian].
10. Fedorak, R.M. (1998). Dyfuziine zaliznennia ta tsementatsiia tytanu [Diffusion fertilization and cementation of titanium]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv – Metallurgy and metal processing*, 4, 52–55 [in Ukrainian].
11. Liashenko, B.A. (2005). O dostoinstvakh tekhnolohyy vakuumnoho azotyrovanyia [About the advantages of vacuum nitriding technology]. *Oborudovanye y ynstrument – Equipment and tools*, 12, 20-21 [in Russian].
12. Rutkovskiy, A.V., Markovych, S.I. & Mykhailiuta, S.S. (2022). Analiz napruzhenno-deformovanoho stanu ionnoazotovanykh zrazkiv iz pokryttiam v umovakh izotermichnoi ta termotsyklichnoi povzuchosti [Analysis of the stress-strain state of ion-nitrogenized coated samples under isothermal and thermocyclic creep conditions]. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*, Vol. 6(37), part. I, 3-9 [in Ukrainian].
13. Rutkovskiy, A.V., Markovych, S.I. & Mykhailiuta, S.S. (2020). Teplostiikist ionnoazotovanykh aliuminiievnykh splaviv pry izotermichnomu ta termotsyklichnomu vplyvi [Heat resistance of ion-nitrogenized aluminum alloys under isothermal and thermocyclic exposure]. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*, Vol. 3(34), 72-81 [in Ukrainian].

Vitalii Kalinichenko, PhD tech. sci, Senior Researcher, **Anatoly Rutkovskiy**, PhD tech. sci, Senior Researcher
National Academy of sciences of Ukraine G.S. Pisarenko institute for problems of strength, Kyiv, Ukraine

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

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

The Microstructure of the Surface Layer of the Titanium Alloy Modified by Vacuum Ion Nitriding in the Pulse Mode

The mechanical strength and durability of structural elements is ensured by the correct selection of the materials from which they are made and the special functional properties of the surface layer, which are provided by applying coatings or by changing the structural state of the surface layers of the material by means of their modification.

The use of titanium alloys provides unique properties, including high specific strength, corrosion resistance and a fairly high melting point. However, the use of these materials is limited by their low hardness, extremely low wear resistance, high tendency to sticking, high coefficient of friction in pairs with almost all materials, high chemical activity during heating above 500°C and sensitivity to stress concentrators. To reduce the disadvantages of titanium alloys, various technological processes of strengthening are used by modifying the surface layers: by implantation of ions of various metals; surface treatment with concentrated energy flows; plasma flows; surface plastic deformation; ultrasonic treatment; laser processing; diffusion saturation and chemical-thermal treatment. Of all the modification methods, such a method of HTO as nitriding has become the most widespread, however, it involves long-term high-temperature heating, which causes fragility of the obtained nitrided layers, leads to a change in the metal structure and a decrease in strength characteristics.

Task statement: conduct metallographic studies of the microstructure of modified surfaces with determination of the structure and depth of saturation of the diffusion layer with nitrogen

Microsands for metallographic studies were produced on the "Alpha & Beta" installation (manufacturer of TM BUEHLER) according to the standard method (preventing tempering and overheating) with subsequent detection of the microstructure by chemical etching in a herbarium: HNO₃ : HF : H₂O (7 ml. : 2 ml. : 50 ml.). Metalohrafichni doslidzhennya zrazkiv provodyly v pozdovzhn'omu peretyni po tovshchyni na optychnomu invertovanomu mikroskopi «AXIOVERT 40 MAT» z fiksatsiyeyu mikrostruktur tsyfrovoyu fotokameroyu AXIOCAM 305 v prohrami «ZEN core v3.1» Yak pokazaly doslidzhennya, tovshchyna nitrydnoho sharu pry vakuumnomu ionnomu azotuvanni v impul'snomu rezhymi tytanovoho splavu VT1-0 skladaye ne bil'she 15÷20 mkm, pid yakym znakhodyt'sya zona vnutrishn'oho azotuvannya menshoyi tverdosti, yaka postupovo zmeshuyet'sya po eksponentsiyuy zalezhnosti do tverdosti osnovy.

Metallographic studies of the samples were carried out in a longitudinal cross-section by thickness on an optical inverted microscope "AXIOVERT 40 MAT" with fixation of microstructures by a digital camera AXIOCAM 305 in the program "ZEN core v3.1". As the studies showed, the thickness of the nitride layer during vacuum ion nitriding in the pulse mode of titanium alloy VT1-0 is no more than 15÷20 µm, under which there is a zone of internal nitriding of lower hardness, which gradually decreases exponentially depending on the hardness of the base. The structure of the base material does not change during low-temperature nitriding. A nitrided layer is formed on the surface with a nitride zone of varying thickness, which depends on the mode of nitriding and is weakly etched by the herbarium. The microstructure of the samples is an equiaxed polyhedral structure of the α-phase with a liquation band in the axial zone. Microhardness was determined under a load of 50, 100, and 200 g. The holding time under the load was 10 seconds. Microhardness was measured on the sandpapers in the radial direction of the segment with a step of 0.05 mm. The load depended on the dispersion and thickness of the reinforced layer.

Conclusions. Nitriding (up to 900°C) in the glow discharge of titanium VT1-0 and VT1-00 allows to significantly increase the microhardness due to the properties of nitrogen and its compounds with titanium, while preserving the original mechanical properties of the base material. A change in the parameters of the nitriding process (temperature, pressure, composition of the saturating medium and nitriding time) causes a change in the physical and mechanical characteristics, structure, thickness, phase and chemical composition of the surface nitriding layer: microhardness of the surface up to 10500 MPa; the thickness of the nitrided layer is up to 500 microns; the thickness of the nitride layer is up to 25 microns; phase shift difference TiN, Ti₂N, Ti(N); different gradient of hardness in depth, which allows to optimize the power of the surface of the ball in specific conditions of operation.

microstructure, titanium alloy, modified surface, nitriding, microhardness

Одержано (Received) 03.07.2023

Прорецензовано (Reviewed) 03.08.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

УДК 539.3: 357.312: 546.28 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.10-19](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.10-19)

Л.А. Тарандушка, проф., д-р техн. наук, В.С. Ковтуненко, доц., канд. фіз.-мат. наук
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна
e-mail: tarandushkal@ukr.net, kovtvics@ukr.net

Будова груп атомів пари системи As-S для створення перспективних матеріалів для автомобільної промисловості

Фізичними способами експериментально встановлено види ізоморфних типів 2-х¹⁹ і 3-х атомних груп системи As-S: ланцюгові та трикутні. Наведено аналіз їх будови на границях перших двох координаційних шарів як для центральних атомів сірки, так і для центральних атомів миш'яку. Відображена перспектива створення у групах ширшого кола різних картин атомів ближнього порядку порівняно із конденсованими фазами матеріалів As-S. Обчислені параметри довжин хімічних зв'язків, їх енергії та кути для груп, які корелюють із експериментом. Результати дослідження можуть бути корисними для вдосконалення процесу виготовлення палива для автомобілів.
малі групи, ближній порядок, халькогеніди, першопринципні методи, енергія хімічних зв'язків, довжини атомних ланцюгів, міжланцюгові кути

Постановка проблеми. Методами моделювання атомних груп із різними хімічними зв'язками приділена велика кількість наукових робіт. Проте, менше уваги приділяється вивченню груп речовин з ковалентним зв'язком. Але такі зв'язки відіграють суттєву роль для розвитку таких практичних напрямів матеріалознавства, як формування наносистем, каталітичний синтез, напилення тонких захисних шарів тощо.

Фізичні вивчення парів As-S не поширені і приділяються аналізу їх спектральної будови. Але спектральна будова вказує хімічну наявність залишків парової фази. Атомний склад груп встановити складно. Дослідження будови парових потоків є складним в реалізації. Перспективним способом вивчення атомної структури парів є комп'ютерне моделювання. Це дозволяє виявити багато проблемних питань сучасної фізики ковалентних матеріалів. В той же час, такі способи дають можливість знайти характеристики хімічного атомного зв'язку, що впливають на стійкість ковалентних груп та встановити ефективність спільного використання спектральних методів та квантово-механічних.

Щодо групи As-S спектральні результати вказують [1-2], що у разі випарювання таких матеріалів, то пара міститиме лише сірку, миш'як та атомні групи As_mS_n ($m=0-4$, $n=0-8$). Разом з тим в парі виявлено комбінації двох- і трьохатомних складових. Проте для груп чотирьох – семи одиниць немає майже половини із ймовірних комплексів. Щодо груп восьми – дев'яти одиниць у потоці утворюється тільки деякі із наявних. Отже, фундаментальні характеристики хімічного поєднання сірки і миш'яку в атомні структури повинні прослідковуватись для двох- і трьохатомних груп As-S.

Тому ми намагаємось встановити закономірності хімічного поєднання атомів в дво-, трикомпонентних групах As_mS_n і головні види ближнього ув'язування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх досліджень та публікацій. Експериментальні дослідження структури парової фази матеріалів As-S

дуже обмежені і переважно стосуються вивченню їх мас-спектрів. Але мас-спектри показують лише хімічний склад частинок пари. Атомну ж будову кластерів пари із цих даних визначити неможливо. Досить трудомісткі і прямі дифракційні (зокрема, електронграфічні) способи аналізу будови парових потоків. З метою подальшого вдосконалення вивчення атомної структури пари полягає у використанні комп'ютерного моделювання неекспериментальними квантовими способами різних груп. Це дозволяє розв'язати багато нерозв'язаних актуальних проблем сучасної нанофізики ковалентних матеріалів. Зокрема, вони можуть виявити ті структурні та енергетичні параметри хімічного ув'язування атомів, які визначають стабільність ковалентних кластерів, та виявити ефективність поєднання методів мас-спектроскопії з квантово-механічними розрахунками.

Щодо групи As-S експериментальні спектрометричні результати свідчать [1] про вміст окремих одиниць сірки і миш'яку в парі груп As_mS_n ($m=0-4$, $n=0-8$). А паровий потік складається з усіх можливих одно-, дво- і трьохатомних частинок. Для груп із чотирьох – семи частинок в парі відсутня майже половина вірогідних комплексів. Щодо восьми – дев'яти атомів у паровій фазі утворюються лише окремі із них. Тому базові принципи і особливості процесів хімічного сполучення частинок сірки та миш'яку у різні атомні утворення найбільш прозоро мають прослідковуватися в найпростіших дво- та трьохатомних кластерах As-S. Відповідно з цим, у даній роботі аналізуються закономірності хімічного сполучення частинок в невеликих групах AsS і головні типи ближнього положення в атомній структурі.

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз закономірностей хімічного сполучення частинок у невеликих групах AsS і головні види ближнього положення атомної структури.

Виклад основного матеріалу. Відповідно формування хімічного сполучення частинок сірки ми зосередилися на валентних електронах останніх сфер. У незбудженому положенні сірка двоховалентна і має хімічні сполучення, що в просторі знаходяться під кутом приблизно 90 градусів між зв'язками.

Валентна сфера сірки містить вільний 3d-стан, енергія якого подібна до стану зовнішнього. Отже, мала частина енергії переводить електрон з нижнього стану у верхній. В таких умовах зменшення енергії буде компенсуватись надлишком утворених нових ковалентних зв'язків. У вказаному стані атом сірки матиме чотири незв'язаних електрони, які вірогідно перейдуть для утворення 4-х ковалентних зв'язків. Та валентність 4 частинки сірки будуть тільки за створення хімічних сполучень з електронегативнішими частинками. Причиною цього є, що для валентності 4 на зовнішній сфері частинки сірки теоретично повинно перебувати більше більше 8 електронів, що неможливо. Коли формуються хімічні зв'язки з електронегативнішими частинками, електрони окремих пар рухаються в бік таких частинок, в цей час на валентному стані частинок сірки майже немає електронів, через те, що частинки миш'яку мають нижчу електронегативність, ніж частинки сірки, то матимемо на увазі, що в атомних групах цієї системи сірка у головному положенні проявляє тільки валентність 2.

В той же час, за результатами [3] у різних утвореннях отримання хімічних сполук реалізується через 4-х sp^3 -комбінованих молекулярних сфер частинок сірки (половина задіяні в реалізації хімічного сполучення, а решта – утримують неподілені групи електронів). Через це частинки сірки в невеликих групах цієї системи вірогідно будуть двовалентними, але тривимірною моделлю хімічних сполук виявиться тетраедричною із міжланцюговим кутом приблизно 109 градусів.

У IV періоді таблиці Менделєєва, де перебуває миш'як, разом із атомними

сферами $4s$ і $4p$ насичується і підрівень $3d$. Енергія для частинок миш'яку менша цих рівнів, і через це його 5 вільних електронів знаходяться на крайніх орбітах. Не задіяний в хімічних механізмах $3d$ -підрівень не має вільних електронів [4-6]. Внаслідок цього в невеликих групах цієї системи миш'як буває валентністю 3 через вільні електрони з кутами біля 90 градусів у ковалентних сполуках.

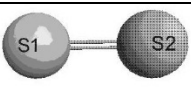
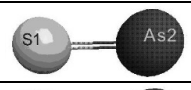


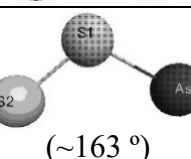
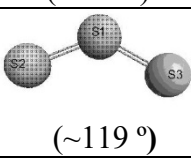
Подібно атомам сірки часто відбувається sp^3 -комбінація сфер миш'яку [3]. Одна сфера містить неподілену пару електронів. Решта три – задіяні у створенні ковалентного сполучення. Отже, для частинок миш'яку в невеликих групах цієї системи можлива реалізація валентності 3. Проте із подібною до конфігурації правильної піраміди розміщення хімічних сполучень.

1-ша координаційна сфера атомів сірки.

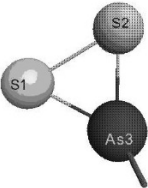
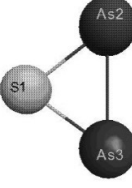
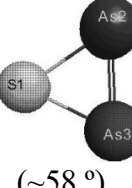
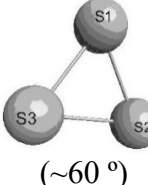
У групах пари досліджуваної сполуки ближніми частинками сірки будуть чи частинки сірки, чи миш'яку. Найпростішою групою є утворення молекула з двох атомів сірки і першим видом координаційної сфери. Координаційна сфера центрального атому обумовлена утворенням подвійного хімічного сполучення, що має міжатомну відстань $0,191$ нм через перетин $3p_x$ і $3p_y$ атомних сфер ближніх частинок сірки. Цей вид координаційної сфери утворюється до крайніх частинок низки груп з трьох атомів сірки.

Подвоєне ковалентне сполучення частинок сірки з $3p$ -електронами утворюватимуть також з миш'яком з використанням його $4p$ -електронів. Найпростішими групами цього виду є AsS внаслідок реалізації мінімального енергетичного стану. За такого стану частинка миш'яку в цьому утворенні матиме одну незаповнену валентність. Подібний вид 1-ї координаційної сфери утвориться також для останніх частинок сірки чи миш'яку в різноманітних трьохатомних ланцюгових групах.

Таблиця 1 – Типи та параметри структур першої координаційної сфери атомів сірки

№	Тип КС (кут між зв'язками)	Кластери з таким типом КС (кількість ЦА з такою КС у кластері)	Радіуси КС r_1 , нм	КЧ та сусіди	ВЦ А	Енергія зв'язків, еВ (їх порядок)
1	2	3	4	5	6	7
1		S_2 (2), S_3 -1 (2)	0,191- 0,192	1S	2,0 – 2,1	3,4 – 3,5; 4,5 (1,7 – 2,0)
2		AsS (1), AsS_2 -1 (2), As_2S -4(1)	0,206 - 0,212	1As	1,9 – 2,2	3,0 - 3,9 (1,4 – 2,2)
3		AsS_2 -3 (2), As_2S -3 (1)	0,213 - 0,220	1As	1,4 – 1,8	2,5 (1,2 – 1,4)
4		AsS_2 -4 (1)	0,200	1As	1,8	~2,4 (1,5)
5	 (~163 °)	AsS_2 -4 (1)	0,200; 0,233	1S; 1As	2,5	~2,4 (1,5); ~1,6 (1,0)
6	 (~119 °)	S_3 -1 (1)	0,192 0,192	2S	3,4	~3,4 (1,7)

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7
7	 (~61 °)	AsS ₂ -2 (2)	0,214; 0,224	1S; 1As	2,2	~2,7 (1,1); ~1,9 (1,0)
8	 (~66 °)	As ₂ S-1 (1)	0,225	2As	2,1	~2,4 (1,1)
9	 (~58 °)	As ₂ S-2 (1)	0,233	2As	1,9	~2,4 (0,9)
10	 (~60 °)	S ₃ -2 (3)	0,209; 0,209	2S	2,1	~2,2 (1,1)

Джерело: розроблено [7]

Групи із центральним атомом сірки, що має одне одинарне ковалентне сполучення, потребують приблизно на 2-3 еВ більше енергії формування. Через це їх у парі значно менше. Так групи – низкоподібної форми, у яких частинки сірки перебувають в кінці та утворюють сполучення сірка-сірка чи сірка-миш'як. Найпростішим утворенням цього виду буде низка сірка-миш'як-сірка. У цьому утворенні частинки сірки розглядаються як основні, що приєднують частинку миш'яку. Валентності цих частинок сірки приблизно 1,5. Найвірогідніше, що утворення сірка-миш'як-сірка розглядатиметься як накладання утворень S=As-S- і -S-As=S. На користь цього факту впливає менша довжина утворення As-S у таких групах у кореляції із стабільним значенням. Зокрема, обчислення дають підставу вважати наявність у такої групи ще одного сполучення між крайніми частинками із величиною сполучення приблизно 0,3 нм.

Подібний до такого вид 1-ї координаційної сфери формують у низках сірка-сірка-миш'як, останні частинки сірки та ближнім до сірки. Зокрема валентність останньої приблизно 1,8, а середньої у низці частинки сірки – 2,5. Отже, це утворення ймовірно є наслідком накладання утворень S=S-As- і -S-S=As-, доказом чого є менша, ніж рівноважна, відстань сполучення S-S – 0,2 нм, – і наявність ще одного сполучення між крайніми частинками із сполученням 0,3 нм.

У 1-у координаційну сферу частинок сірки ймовірно включаються два однакові однойменні чи різні частинки. Подібна координаційна сфера зазначена в таблиці 1, що відповідає групам AsS₂-4. Такий вид координаційної сфери утворюється одним сполученням сірка-сірка, спричиненим накладанням із сполученням сірка=сірка та

додаванням довшого сполучення сірка-миш'як. Причиною цього є те, що у цій групі сполучення сірка-миш'як повинно мати π -вид, внаслідок того, що p_x -рівень центрального атома сірки уже задіяний у сильнішому σ -сполученні сірка-сірка. Доказом цього для центрального атома сірки є подібна до лінійної форми групи AsS_2-4 , з кутом між сполученнями 163 градусів.

Подібним до двох ближніх центральних атомів сірки є низкоподібна молекула S_3-1 , що має два подвоєнні сполучення з валентним кутом 119 градусів. Енергетичний стан в такому утворенні подібний енергії формування груп S_2 .

Унікальний вид 1-ї координаційної сфери формується для груп AsS_2-2 у трикутно-подібною будовою. Енергії і енергетичні стани таких зв'язок більші у порівнянні з низкоподібними утвореннями.

Подібний вид будови 1-ї координаційної сфери зустрічається не лише в однакових частинках сірки, а й у різних. Підтвердженням наведеного є утворення As_2S-1 , валентність всіх частинок якого приблизно 2 , що означає, що два миш'яки залишаються вільними. Рівень усіх сполучень такий же, як в одиночному ковалентному сполученні. Такому утворенню відповідає інша група As_2S-2 , ближній порядок його відрізняється від першого. Більшими є з'єднання миш'як-сірка, а центральні атомні кути сірки – менші. Обґрунтуванням цього є реалізація у групі As_2S-2 суцільної зв'язки частинок миш'яку і подвоєного сполучення між його частинками, а в групі As_2S-1 – одиночного зв'язку. Енергетичні стани таких утворень майже подібні.

Першокоординаційний атом сірки, ймовірно, перебуває в трикутноподібній формі і має два однакових атомів сірки, як і в групі S_3-2 . Рівні одиничних хімічних сполучень у таких утвореннях подібні до рівня різноманітних форм сірки. Така 1-а координаційна сфера для центрального атома сірки подібна до низкоподібною групи S_3-1 . Проте такі утворення відрізняються величинами просторового сполучення частинок.

1-а координаційна сфера атомів миш'яку.

У групах утворення $As-S$ ближніми центральним атомам миш'яку можливі різноманітні частинки. Найпростішим об'єднанням у ньому є структура As_2 . У ньому першокоординаційний центральний атом спричинений формуванням потроєного ковалентного сполучення з віддаллю між атомами $0,212$ нм через накладання трьох p -сфер найближчих частинок As . Подібний вид 1-ї координаційної сфери не зустрічається в інших групах пари матеріалів цієї сполуки.

Частинки миш'яку через свої $4p$ -електрони формують подвоєне ковалентне сполучення з сіркою і миш'яком. Найпростішим утворенням є група AsS [8]. У нього центральний атом миш'яку перебуває в стані незаповненої валентності. Подібний вид -1 координаційної сфери можливий і для крайніх частинок миш'яку у різних групах (група As_2S-3).

У низкоподібних групах крайні частинки миш'яку можуть утворювати одне одновимірне ковалентне сполучення. Свідченням зазначеного може бути група AsS_2 . Але крайні частинки сірки такого виду координаційної сфери відрізняються від крайніх миш'яків сполуки $As-S$ рівнем $1,0$. Отже, на подібні частинки ефект накладання не сильно впливає, а видовження сполучення $As-S$ спричинене збільшеним відмежуванням частинок миш'яку від сфери ковалентного сполучення $As-S$. Подібне відбувається і для 1-ї координаційної сфери з одинарного сполучення $As-As$.

Подібний вид будови координаційної сфери миш'яку із залученням найближчих центральних атомів є утворення AsS_2-3 . Подібне утворення має два рівні хімічні сполучення $As-S$ та накладання $As=S$ та кутом приблизно 100 градусів, що є свідченням, що сполучення $As-S$ утворюються іншими $4p$ -сферами центрального атому миш'яку.



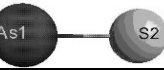
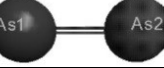

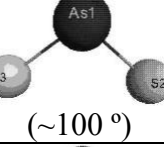
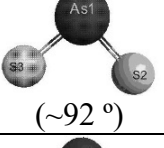
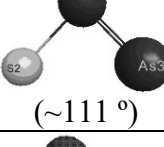
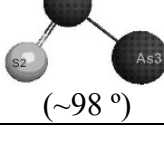
Подібною координаційною сферою є утворення з подвійними хімічними

зв'язками As=S протяжністю 0,212 нм. Зокрема, для групи AsS₂-1 властивий є рівень сполучень As=S 1,4, збільшена довжина, кут приблизно 92 градуси і суттєвий вплив крайніх частинок сірки.

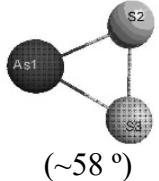
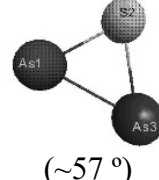
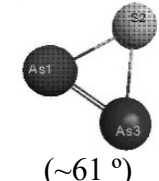
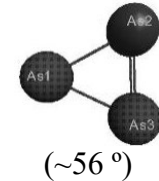
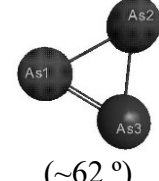
2-а координаційна сфера.

Головні види та просторові величини 2-ї координаційної сфери утворень AsS є в таблиці 3. Подібні координаційні сфери спостерігаються тільки у шести трьохатомних ланцюгових утвореннях, що мають одномірні та двомірні хімічні сполучення. Центральні атоми сірки перебувають на краях низок і їх найближчими частинками є подібні частинки сірки в утвореннях S₃-1, AsS₂-1, AsS₂-3 і частинки миш'яку в утвореннях AsS₂-4, As₂S-3 і As₂S-4. Отже, в крайніх трьох утвореннях для 2-ї координаційної сфери середніми можливі також частинки миш'яку. Відзначаємо, що строго ковалентного сполучення з іншими ближніми частинками на великих утвореннях цієї сполуки немає, та обчислення вказують на існування деякої взаємодії подібних частинок та об'єднання їхніх групових сфер з рівнем сполученням від 0,3 до 0,6.

Таблиця 2 – Типи та параметри структур першої координаційної сфери атомів миш'яку

№	Тип КС (кут між зв'язками)	Кластери з таким типом КС (кількість ЦА з такою КС)	Радіуси КС r ₁ , нм	КЧ та сусіди	ВЦА	Енергія зв'язків, еВ (їх порядок)
1	2	3	4	5	6	7
1		As ₂ (2)	0,212	1As	2,6	3,9 (2,6)
2		AsS (1)	0,206	1S	2,2	3,9 (2,2)
3		AsS ₂ -4 (1)	0,233	1S	1,3	~1,6 (1,0)
4		As ₂ S-3 (1)	0,228	1As	1,9	~2,8 (1,5)
5		As ₂ S-4 (1)	0,256	1As	1,0	~1,5 (0,7)
6		AsS ₂ -3 (1)	0,220	2S	2,3	2,5 (1,2)
7		AsS ₂ -1(1)	0,212	2S	2,9	3,3 (1,4)
8		As ₂ S-3 (1)	0,213 0,228	1S 1As	2,9	~2,5 (1,4); ~2,8 (1,5)
9		As ₂ S-4 (1)	0,212 0,256	1S 1As	2,9	~3,0 (1,6); ~1,5 (0,7)

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5	6	7
10	 (~58 °)	AsS ₂ -2 (1)	0,224	2S;	2,1	~1,9 (1,0)
11	 (~57 °)	As ₂ S-1 (2)	0,225 0,246	1S 1As	2,2	~2,4 (1,1); ~1,5 (1,0)
12	 (~61 °)	As ₂ S-2 (2)	0,233 0,224	1S 1As	2,8	~2,4 (0,9); ~1,6 (1,8)
13	 (~56 °)	As ₃ (1)	0,245	2As	2,0	~1,6 (1,0)
14	 (~62 °)	As ₃ (2)	0,245 0,227	2As	2,6	~1,6 (1,0); ~2,8 (1,6)

Джерело: розроблено [7]

Таблиця 3 – Типи та параметри структур другої координаційної сфери

№	Центральний атом	Кластер з даним типом КС (кількість ЦА з такою КС у кластері)	Радіуси КС r_1 , нм	КЧ та сусіди	ВЦА	Порядок зв'язків
1	S	S ₃ -1 (2)	0,330	1S	2,1	0,4
2	S	AsS ₂ -1 (2)	0,306	1S	2,0	0,6
3	S	AsS ₂ -3 (2)	0,338	1S	2,2	0,3
4	S	AsS ₂ -4 (1)	0,428	1As	1,8	0,3
5	S	As ₂ S-3 (1)	0,364	1As	1,4	0,4
6	S	As ₂ S-4 (1)	0,355	1As	1,8	0,3
7	As	AsS ₂ -4 (1)	0,428	1S	1,3	0,3
8	As	As ₂ S-3 (1)	0,364	1S	1,9	0,4
9	As	As ₂ S-4 (1)	0,355	1S	1,0	0,3

Джерело: розроблено [7]

Величини, наведені у таблицях 1 і 2, свідчать про суттєвий вплив семи різних ковалентних хімічних сполучень на 1-у координаційну сферу групи As_nS_m (таблиця 4; K – величина утворень з таким сполученням та медіальні експериментальні величини протяжності сполучень і енергетичний рівень конденсованих фаз матеріалів даної сполуки).

Таблиця 4 – Параметри хімічних зв'язків малих кластерів матеріалів As-S

Зв'язок	K	Довжини, нм	Середня довжина, нм	Порядки зв'язків	Середній порядок	Енергії зв'язків, еВ	Середня енергія, еВ
S-S	3	0,200 – 0,214	0,205 (0,208)	1,1 – 1,5	1,2	2,2 – 2,6	2,4 (2,7)
S=S	2	0,191 – 0,192	0,191 (0,190)	1,7 – 2,0	1,9	3,4; 4,5	- (4,4)
As-As	3	0,245 – 0,256	0,250 (0,245)	0,7 – 1,0	0,9	1,7 – 1,8	1,8 (2,0)
As=As	3	0,224 – 0,228	0,226	1,5 – 1,8	1,6	2,4 – 2,8	2,6
As≡As	1	0,212	0,212 (0,210)	2,6	2,6	3,9	3,9 (4,0)
As-S	6	0,213 – 0,233	0,225 (0,225)	0,9 – 1,4	1,1	1,6 – 2,5	2,1 (2,6)
As=S	3	0,203 – 0,212	0,209	1,4 – 2,2	1,7	2,8 – 3,9	3,3

Джерело: розроблено [7]

Обчислення положення $M = 1$ показують рівень енергетичного стану 3,5 еВ. Варто зазначити, що при $M = 3$ досліджуваного сполучення обчислення корелюють з експериментальним рівнем 4,5 еВ. У джерелах [9-11] зазначено величини енергетичного стану 4,0 – 4,5 еВ, що суттєво наближене експерименту та обчисленням. Отже, до атомних утворень S_2 проявляється стан $M = 3$ із енергетичним станом S=S 4,4 еВ, а у низкоподібних утвореннях S_3 утворюється два хімічні утворення S=S 3,5 еВ.

З'єднання As-S і As=S проявляються в інших утвореннях, що перебувають в одинарній, подвійній і тримірній фазах, що позначитись на енергетичних станах досліджуваних сполучень.

Висновки. За допомогою математичного моделювання уточнено величини просторової структури та обчислено енергетичні стани формування різноманітних фаз дво- та трьохатомних утворень пари матеріалів сполучення As-S. Такі стани можна диференціювати на дві структури: низкоподібні і трикутноподібні. Аналіз будови близького порядку подібних утворень вказує на ймовірність формування різних структур 1-ї і 2-ї координаційної сфер: десять видів ближчого сусідства центральних атомів сірки, чотирнадцять видів ближчого сусідства центральних атомів миш'яку та дев'ять видів конфігурації розташування інших частинок. 1-а координаційна сфера груп утворюється ковалентними хімічними з'єднаннями всіляких відношень від одновимірних до тривимірних з протяжностями, що корелюють з експериментальними. У низкоподібних об'єднаннях кути між ланцюгами сірки складають 120 чи 160 градусів, в ланцюгах миш'яку – в межах 90-110 градусів. Усі валентні кути тривимірних об'єднань близькі до 60 градусів. Отже, в невеликих об'єднаннях цієї системи в границях ближнього сусідства утворюється різноманітніший набір атомних конфігурацій на відміну від конденсованих утворень досліджуваної сполуки. Разом з тим, обчислені сполуки малих груп, енергетичні стани диференційованих хімічних з'єднань корелюють з експериментом.

Список літератури

1. Мас-спектри парових потоків при випаровуванні матеріалів системи As-S та їх роль у формуванні аморфних плівок / А.В. Далекорей, Ш.Ш. Демеш, В.С. Ковтуненко, Р.О. Мешко. *Науковий вісник Ужгородського університету (Сер. Фізика)*. 2012. No. 31: 79.
2. The formation energies of the clusters of As-S materials vapor phase / A.V. Dalekorey, V.P. Ivanytsky, V.S. Kovtunencko, R.O. Meshko. *JOURNAL OF OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS*, 18, No. 3-4: p. 301-309 (2016).
3. Іваницький В.П. Механізми формування стохастично неоднорідної структури аморфних халькогенідів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора фіз.-мат. наук: Харків, 2008. 34 с.
4. Молекулярний паровий аналіз тонких аморфних плівок As_xS_{100-x} : склоподібні напівпровідники для оптоелектроніки / А.А. Попеску та ін. *Ed. House "Shtynytsa"*, Chisinau, 1997. P. 98-107.
5. White K., Kumar B., Rai Amarendra K. Effect of deposition rate on structure and properties of As_2S_3 films, *Thin Solid Films*. 1988. 161. P. 139.
6. D. Ralf Steudel. Properties of Sulfur-Sulfur Bonds . *Angewandte Chemie International Edition*. 1975. 14. No. 10. P. 655 [in Germany].
7. Ковтуненко В.С. Структура дво- та триатомових кластерів парової фази матеріалів системи As-S . *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології: зб. наук. пр.* 2016. Т. 14, № 2. С. 221-234.
8. Захаров В.П., Герасименко В.С. Структурні особливості напівпровідників в аморфному стані : монографія. Академія наук Української РСР; Інститут проблем матеріалознавства. Київ: Наукова думка, 1976. 280 с.
9. Chern G.C., Zauks J., McGhie A.R. Spin-coated amorphous chalcogenide films: thermal properties. *J. Applied Physics*. 1983. Vol.54. №8. P.4596-4601.
10. Martin T.P. Arsenic sulfide clusters. *Solid state communications*. 1983. Vol.47, №2. P.111-114.
11. Popescu A. Structure modelling of chalcogenide vitreous films by computational chemistry program. *Moldavian Journal of the Physical Sciences*. 2002. № 2. P. 130-138.

References

1. Dalekorei, A.V., Demesh, Sh.Sh., Kovtunencko, V.S. & Meshko, R.O. (2012). Mas-spectry parovykh potokiv pry vyparovuvanni materialiv systemy As-S ta yih rol' u formuvanni amorphnykh plivok [As-S vapor mass spectra and their role in formation of amorphous films] . *Naukovyi visnyk Uzhhorods'koho universytetu (Ser. Fyzyka) – Scientific Bulletin of Uzhhorod University (Physics Series)*, No. 31: 79 [in Ukrainian].
2. Dalekorey, A.V., Ivanytsky, V.P., Kovtunencko, V.S. & Meshko, R.O. (2016). The formation energies of the clusters of As-S materials vapor phase . *JOURNAL OF OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS*, 18, No. 3-4. P. 301-309 [in Hungary].
3. Ivanytskyi, V.P. (2008). Mekhanizmy formuvannia stokhastychno neodnorodnoi struktury amorfnykh khal'kohenidiv [Mechanisms of stochastically heterogeneous structure formation of amorphous chalcogenides]. Extended abstract of Doctor's thesis . Kharkiv [in Ukrainian].
4. Popescu, A.A., Dolhyer, V.T., Vataman, I.I., Buzdugan, A.I., & Yndrychan, K.M. (1997). Molekuljarnij phazovij analiz tonkich plenok amorphnich As_xS_{100-x} : Stekloobraznije poluprovodniki dlja optoelektroniki . *Ed. House "Shtynytsa"*, Chisinau. P. 98-107 [in Moldova].
5. White K., Kumar B., Rai Amarendra K. (1988). Effect of deposition rate on structure and properties of As_2S_3 films, *Thin Solid Films*, 161, P.139 [in English].
6. Ralf Steudel D. (1975). Properties of Sulfur-Sulfur Bonds . *Angewandte Chemie International Edition*. 14, No. 10, P. 655 [in Germany].
7. Kovtunencko, V.S. (2016). Struktura dvo- ta tryatomovykh klasteriv parovoyi fazy materialiv systemy As-S [The structure of diatomic and triatomic clusters of the vapor phase of the materials of the system As-S] . *Nanosystemy, nanomaterialy, nanotekhnologiji: zb. nauk. pr. – Nanosystems, nanomaterials, nanotechnologies: coll. of science works*, Vol. 14, № 2. P. 221-234 [in Ukrainian].
8. Zakharov, V.P. & Gerasimenko, V.S. (1976). Strukturnije osobennosti poluprovodnikov v amorphnom sostojanii [Structural features of semiconductors in the amorphous state]. *Akademiya nauk Ukrayins'koyi RSR, Instytut problem materialoznavstva*. Kiyv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
9. Chern, G.C., Zauks, J. & McGhie, A.R. (1983). Spin-coated amorphous chalcogenide films: thermal properties. *J. Applied Physics*. Vol. 54. №8, P. 4596-4601 [in English].
10. Martin, T.P. (1983). Arsenic sulfide clusters. *Solid state communications*. Vol.47, № 2. P.111-114 [in

- Belgium].
11. Popescu, A. (2002). Structure modelling of chalcogenide vitreous films by computational chemistry program. *Moldavian J. of physical sciences*. №2. P. 130-138 [in Moldova].

Ludmyla Tarandushka, Prof., DSc., **Viktor Kovtunenکو**, Assoc. Prof., PhD phys.-math. sci.
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

The Structure of Groups of Atoms of the As-S System Vapor for the Creation of Promising Materials for the Automotive Industry

Quantum mechanical simulation methods was found two kinds of different isomorphic forms of two- and three-atom clusters of As-S system vapor phase materials: chain and triangular. Nature of their structure was analyzed within the first two coordination spheres as central atoms for sulfur and arsenic. It is shown the possibility of realization in small clusters of a broader spectrum of different short-range order atomic configurations, compared with the condensed phase materials As-S. The calculated length of the different chemical bonds, their energy and bond angles for the clusters are in good agreement with the experimental data. The results of the research can be useful for improving the process of manufacturing fuel for cars.

With the help of mathematical modeling, the values of the spatial structure were specified and the energy states of the formation of various phases of di- and triatomic formations of the pair of As-S compound materials were calculated.

Such states can be differentiated into two structures: row-like and triangular-like. Analysis of the close-order structure of similar formations indicates the probability of formation of different structures of the 1st and 2nd coordination spheres: ten types of close proximity of central sulfur atoms, fourteen types of close proximity of central arsenic atoms, and nine types of configuration of the location of other particles.

The 1st coordination sphere of groups is formed by covalent chemical compounds of all kinds of relations from one-dimensional to three-dimensional with lengths correlating with experimental ones. In base-like compounds, the angles between sulfur chains are 120 or 160 degrees, in arsenic chains - within 90-110 degrees. All bond angles of three-dimensional bonds are close to 60 degrees.

In small associations of this system, a more diverse set of atomic configurations is formed in the boundaries of the close neighborhood, in contrast to the condensed formations of the studied compound. At the same time, calculated compounds of small groups, energy states of differentiated chemical compounds correlate with experiment.

small groups, short-range order, chalcogenides, first-principle methods, energy of chemical bonds, lengths of atomic chains, interchain angles

Одержано (Received) 02.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 21.10.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

УДК 621.432

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.20-27](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.20-27)**В.М. Гвоздецький**, ст. наук. співр., канд. техн. наук*Фізико-механічний інститут НАН України, м. Львів, Україна***С.І. Маркович**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна***Х.Р.Задорожна**, наук. співр., канд. техн. наук, **М.М. Студент**, ст. наук. співр., д-р техн. наук*Фізико-механічний інститут НАН України, м. Львів, Україна**e-mail: gvodetcki@gmail.com, e-mail: markob0@ukr.net, e-mail: 880988@ukr.net, e-mail: student.phmi@gmail.com*

Дослідження впливу температури електроліту при імпульсному анодуванні на властивості поверхневих шарів технічного алюмінію

Імпульсне анодування формує оксидні шари на алюмінієвих сплавах, що дозволяє отримати поверхневі шари з високою твердістю (до 2000 HV), низьким коефіцієнтом тертя, високою адгезією до металевої основи та низькою екологічною небезпекою. Проведено дослідження впливу температури імпульсного анодування на структуру та зносостійкість анодованих шарів. Встановлено, що більше молекул води та сірки в анодованому шарі, то менша його мікротвердість та абразивна зносостійкість. Мінімальний знос анодованого шару, а значить найвищу його зносостійкість, зафіксовано для шарів, синтезованих за температури анодування -8°C , а максимальний знос та найменшу зносостійкість за температури анодування -5°C . Висока зносостійкість анодованих шарів, синтезованих за температур електроліту від -8 до $+10^{\circ}\text{C}$ за умов тертя без мащення зумовлена наявністю кристалічної води в анодованому шарі.

алюмінієві сплави, температура імпульсного анодування, структура, твердість, зносостійкість

Постановка проблеми. Алюмінієві сплави широко використовують у промисловості завдяки їх високій конструкційній міцності та ливарним властивостям, низькій питомій вазі та температурі плавлення, проте алюмінієві сплави характеризуються низькою абразивною зносостійкістю, що суттєво стримує їх широке використання в технологічних середовищах, особливо за наявності в них абразивних часточок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для покращення твердості й абразивної зносостійкості застосовують методи гальванічного хромування, термічного напилення, плазмово-електролітичного оксидування (ПЕО) [1-3] і твердого анодування (НА) [4]. Використання канцерогенних та екологічно шкідливих електролітів під час впровадження методу хромування робить його екологічно небезпечним [5]. Отримання алюмінієвих сплавів дозволяє зберегти поверхневі шари з високою твердістю (до 2000 HV), низьким коефіцієнтом тертя, високою адгезією до металевої основи та низькою екологічною небезпекою. Метод синтезу НАL досить дешевий і технологічно простий. Тому він широко використовується в промисловості. Однак через суттєві недоліки (низька твердість ≤ 500 HV і зносостійкість) його широке застосування для поверхневого зміцнення різних елементів обмежене [6, 7]. Тверде анодування, реалізоване в режимі імпульсних струмів, має суттєві переваги порівняно з твердим анодуванням за постійного струму. Суть методу імпульсного анодування полягає в

періодичній зміні густини струму. Впродовж періоду з низькою густиною струму тепло, що утворюється на поверхні анодованого зразка, ефективно розсіюється, тоді як під час періоду високої густини струму інтенсифікується процес утворення оксиду. Тому підвищення міцності та стійкості до стирання анодованих шарів на алюмінієвих сплавах є актуальною проблемою [8, 9].

Постановка завдання. Провести дослідження впливу температури електроліту при імпульсному анодуванні на властивості поверхневих шарів технічного алюмінію.

Виклад основного матеріалу. Формування анодованого шару. Процес імпульсного жорсткого анодування проводили у 20% водному розчині H_2SO_4 за густини струму $1,4 \text{ A/дм}^2$ з частотою 100 Гц з шпаруватістю (СК) 75% (рис. 1).

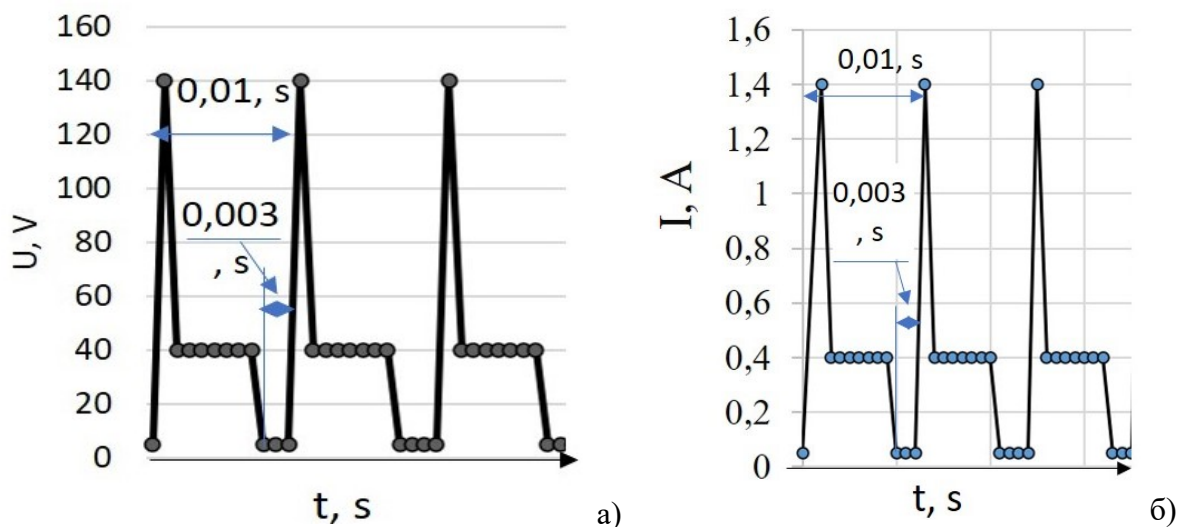


Рисунок 1 – Зміна густини струму А) та напруги б) робочого циклу (DC) в процесі імпульсного холодного анодування

Джерело: розроблено авторами

Температуру електроліту під час формування шарів підтримували на рівні, $-5^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$, $0^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}$, $+5^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}$, $+10^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}$. Тривалість синтезу становила 60 хв. Принципова схема установки для створення шарів наведена на рис. 2. З технічного алюмінію (0,05 Cu; 0,05 Mn; 0,05 Mg; 0,05 Ti; решта Al) виготовлено зразки для анодування у вигляді пластин розміром $20\times 20\times 5$ мм. Перед анодуванням зразки знежирювали у водному розчині суміші (CaO + MgO) і промивали холодною та теплою водою з наступним освітленням у водному розчині азотної кислоти ($400 \text{ г/л } HNO_3$) протягом 30 с. та промиванням у дистильованій воді. Для атестації шарів, отриманих методом анодування, використовували дві характеристики: мікротвердість HV, виміряну на приладі ПМТ-3 при навантаженні 50 г, та абразивну зносостійкість методом фіксованого абразиву $1/W$, визначену за втратою маси W зразки, отримані на електронних аналітичних вагах типу KERN ABJ 220 4M з точністю $2\cdot 10^{-4} \text{ г}$.

Дослідження абразивної зносостійкості проводили згідно розробленої методики [10].

Структуру та мікрорентгено спектральний аналіз твердих анодованих шарів досліджували на електронному мікроскопі EVO 40 XVP із системою мікроаналізу INCA Energy 350. Для фазового аналізу синтезованих шарів використовували рентгенівський дифрактометр BRUKER D8 DISCOVER.

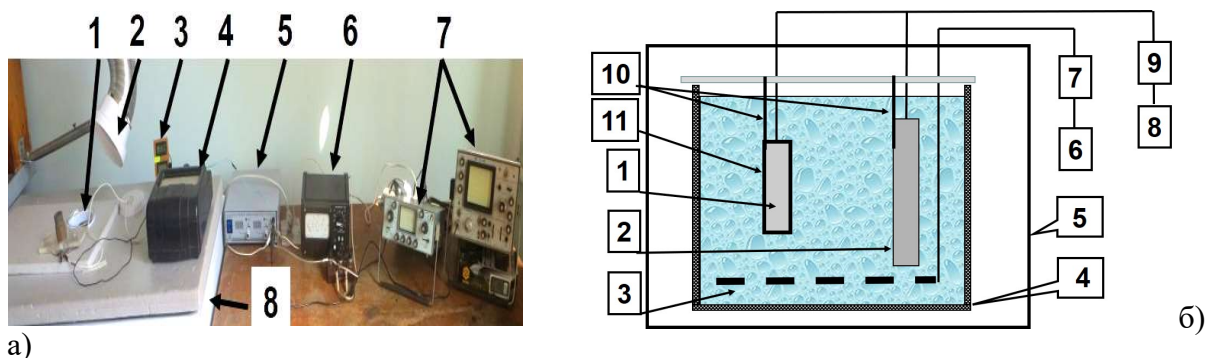


Рисунок 2 – Обладнання для анодування – (а) 1 - ємність з електролітом, 2 - витяжна, 3 – прилад контролю температури електроліту, 5 – джерело живлення для підтримання густини струму 5 A/дм^2 між зразком та електродом, 6 – блок регулювання частоти імпульсів, 7 – прилади контролю напруги та частоти імпульсів на зразку, 8 - камера для стабілізації температурного режиму процесу анодування у діапазоні $-4 \dots 0^\circ\text{C}$, та принципова схема установки (б) 1 – зразок для анодування; 2 – електрод; 3 – барботер; 4 – ємність з електролітом (20 % водний розчин H_2SO_4); 5 – камера для стабілізації температурного режиму процесу анодування у діапазоні $-4-0^\circ\text{C}$; 6 – компресор; 7 – блок регулювання продуктивності барботера та компресора; 8 – джерело живлення для підтримання густини струму 5 A/дм^2 між зразком та електродом; 9 – блок регулювання та контролю потужності джерела живлення, 10 – кріплення електрода та зразка, 11 – анодний шар

Джерело: розроблено авторами

Результати досліджень. Анодовані шари містять у своєму складі молекули води і чим вища температура анодування, тим більша їх кількість. Очевидно, що верхні шари анодованого шару містять більше молекул води, внаслідок тривалішого контакту з електролітом.

За низьких температур менше -5°C внаслідок низької швидкості електрохімічних процесів синтезуються оксидні шари із пониженою мікротвердістю та товщиною. Фазовим аналізом при цьому зафіксовано синтез оксидного шару на основі алюмінію із вмістом двох фаз: синтез анодованого шару починається з утворення гідратованого оксиду алюмінію $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ зі структурою Pbnm, ($a= 4.40 \text{ \AA}$, $b= 9.39 \text{ \AA}$, $c= 2.84 \text{ \AA}$) – беміту, яка містить одну молекулу води та фази $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ – зі структурою P21/n ($a= 8.624 \text{ \AA}$, $b= 5.060 \text{ \AA}$, $c= 9.700 \text{ \AA}$) – гібситу, яка містить три молекули води.

Із підвищенням температури анодування швидкість електрохімічних процесів зростає, що зумовлює зростання товщини анодованого шару (рис. 3), так і його мікротвердості рис. 19. За температури 0°C , та -5°C анодований шар містять лише одну фазу - $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, (беміт) з однією молекулою води. За температури анодування $+5^\circ\text{C}$ та -8°C анодований шар знову формується у вигляді двох фаз - $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (гібситу). та $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (беміту) а за температури $+10^\circ\text{C}$ лише $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (гібситу).

Результати оцінювання товщини імпульсним твердим анодуванням шару (ІТАШ) в залежності від температури електроліту T під час анодування, наведені на рисунку 4а. Оскільки за температури нижчої -10°C електроліт перетворюється в гелеподібну субстанцію, в якій електрохімічні реакції практично припиняються, то розпочали синтез ІТАШ за температури -5°C . Проте внаслідок синтезу за $T = -5^\circ\text{C}$ і потім і вищої (аж до 0°C) середнє значення товщини ІТАШ зростало від 83 мкм до 110 мкм . За подальшого підвищення температури електроліту товщина ІТАШ зменшувалася і за температури електроліту $+10^\circ\text{C}$ становила 80 мкм . Такий характер зміни товщини анодованого шару від температури синтезу пояснили двома протиборними процесами, які відбуваються під час анодування. Із зростанням температури електроліту перш за все інтенсифікується процес синтезу ІТАШ, а отже товщина отриманого шару мала би постійно зростати зі зростанням температури синтезу. Проте зростання температури електроліту інтенсифікує також поверхневе

розчинення анодованого шару, яке спрямоване на зменшення товщини анодованого шару. І коли швидкість розчинення анодованого шару починає перевищувати швидкість його синтезу, то його товщина починає зменшуватися.

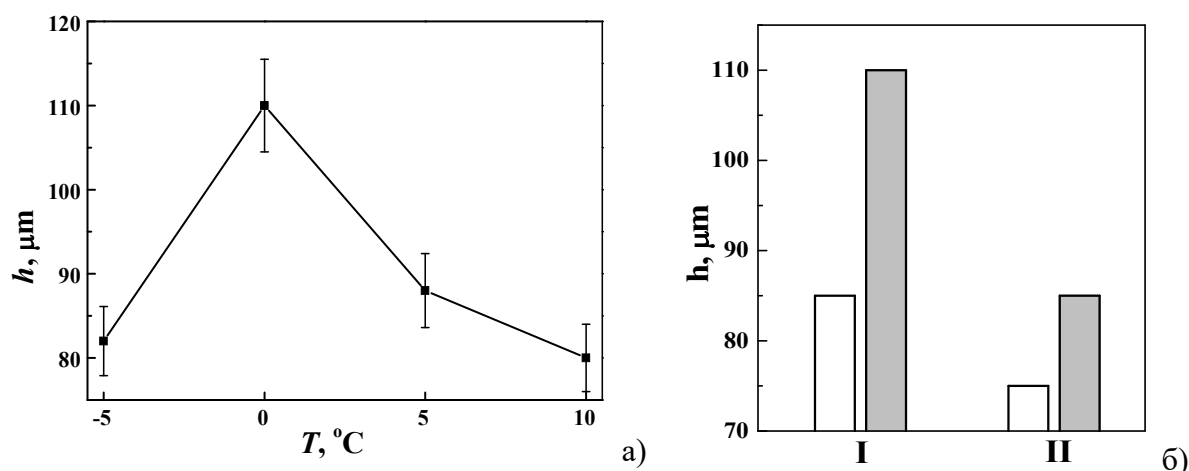


Рисунок 3 – (а) Вплив температури електроліту T під час імпульсного твердого анодування тривалістю 1 година на товщину h синтезованих ІТАШ та (б) вплив режиму синтезу твердого анодованих шарів (ТАШ) за постійного (білі стовпчики) та імпульсного (сірі стовпчики) струмів на товщину анодованих шарів h , отриманих за температури $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (I) та $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (II)

Джерело: розроблено авторами

Отримана закономірність зміни товщини ІТАШ від температури електроліту однозначно підтвердила закономірність зниження швидкості росту ІТАШ за температури понад 0°C через перевищення швидкості процесу електрохімічного розчинення синтезованого шару (внаслідок взаємодії з наявною в електроліті кислотою) над його швидкістю синтезу. Отже, оскільки чим нижча температура синтезу, тим менш інтенсивно анодовані шари розчиняються через взаємодію з кислотою, то і дослідники, і виробники віддають перевагу низькій температурі процесу анодування. Її вибір оптимізують таким чином, щоб температура синтезу, з одного боку, забезпечувала би все ще достатньо високу швидкість росту ІТАШ, а, з другого, – мінімізувала би шкідливий ефект розчинення синтезованого шару через його роз'їдання кислотою.

Застосування імпульсного твердого анодування дає змогу додаткове підвищити товщину синтезованого шару h відносно отриманого з використанням традиційного твердого анодування за стабільного струму. Як показано на рисунку 4 за імпульсного режиму синтезу анодованого шару його товщину можна підвищити на 15-20% за обох температур електроліту: і за пониженої, а саме -5°C , рисунок 4б (I), і за підвищеної, а саме $+5^{\circ}\text{C}$, рисунок 10б (II). Але при цьому в обох синтезованих шарах (ТАШ та ІТАШ) підвищення температури електроліту зменшувало товщину анодованого шару (на 55 % за синтезу в режимі ТА, і на 75% за синтезу у режимі ІТА, рисунок 4, білі і сірі стовпчики відповідно).

Отже з підвищенням температури електроліту понад $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ товщина анодованого шару зменшувалася незалежно від використаного режиму синтезу (за постійного чи за імпульсного струмів). В обох випадках попри інтенсифікацію обох електрохімічних процесів зменшення товщини анодованого шару за температури $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ зумовлено його розчинення ніж синтезом.

Найвищу мікротвердість та, відповідно, абразивну зносостійкість $1/W$ зафіксували для ІТАШ із однією молекулою води $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (беміт), синтезованого за температури електроліту -5°C . Саме з її появою у структурі анодованого шару

пов'язали максимальний ефект зміцнення. Однак, з підвищенням температури електроліту під час імпульсного анодування мікротвердість і абразивна зносостійкість ІТАШ знижувалися. Це пов'язали з формуванням в анодованих шарах оксиду алюмінію $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ з більшою кількістю молекул води та структурою гібситу.

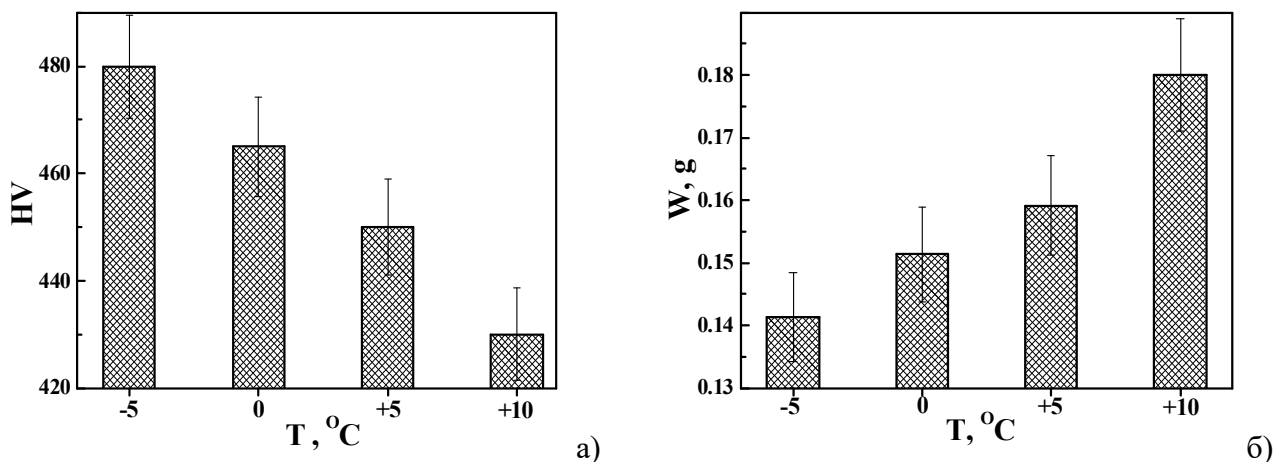


Рисунок 4 – Вплив температури електроліту під час синтезу імпульсно-анодованих шарів на поверхні алюмінієвого сплаву 1011 на їх (а) мікротвердість HV та (б) втрату маси W після випробувань на абразивну зносостійкість в умовах із закріпленням абразивом

Джерело: розроблено авторами

На основі представлених на рисунку 4 результатів вважали, що встановлені закономірності зміни мікротвердості та абразивної зносостійкості ІТАШ, пов'язані з особливостями дегідратації анодованих шарів, синтезованих за різної температури електроліту. Крім того відзначили, що закономірність зміни обох цих показників від температури синтезу корелює також із зміною вмісту сірки в анодованих шарах, як це показано на рисунку 5 за результатами оцінювання вмісту сірки в анодованих шарах на основі їх рентгенофазового аналізу.

Визначено зростання вмісту сірки у складі ІТАШ в міру зростання температури їх синтезу. Максимально високий її вміст (5,7 мас. %) виявили в ІТАШ, синтезованому за температури $+10^\circ C$, а за температур анодування в діапазоні від -5 до $0^\circ C$ зафіксували її найнижчий вміст (4,75 мас. %).

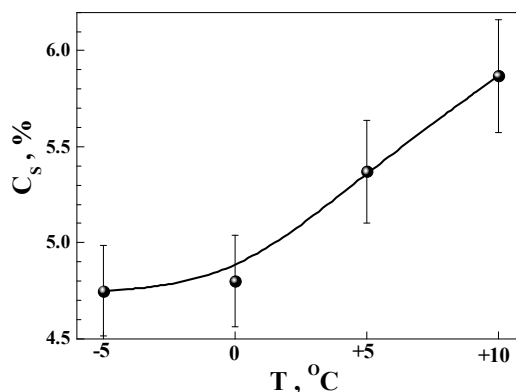


Рисунок 5 – Вплив температури електроліту T під час імпульсного твердого анодування алюмінієвого сплаву 1011 на вміст сірки CS, визначений за результатами рентгенофазового аналізу на поверхні синтезованого шару ІТАШ

Джерело: розроблено авторами

Отже мінімальний знос та, відповідно, найвищу зносостійкість зафіксовано для анодованого шару, синтезованого за температури -5°C . Проаналізувавши отримані результати, підсумували, що мікротвердість HV та абразивна зносостійкість 1/W ІТАШ були вищими, за меншої кількості молекул води, що входила до складу оксидів алюмінію, та нижчого вмісту сірки, що досягалося синтезом ІТАШ за мінусової температури електроліту.

Висновки:

1. Що більше молекул води та сірки в анодованому шарі, то менша його мікротвердість та абразивна зносостійкість.

2. Мінімальний знос анодованого шару, а значить найвищу його зносостійкість, зафіксовано для шарів, синтезованих за температури анодування -8°C , а максимальний знос та найменшу зносостійкість за температури анодування -5°C .

3. Висока зносостійкість анодованих шарів, синтезованих за температур електроліту від -8 до $+10^{\circ}\text{C}$ за умов тертя без мащення зумовлена наявністю кристалічної води в анодованому шарі.

Список літератури

1. Cr_2O_3 Sealing of Anodized Aluminium Alloy by Heat Treatment / Junghoon Lee, Yonghwan Kim, Heuiun Jang, Uoochang Jung and Wonsub Chung. *Procedia Engineering*. 2011. 10. P. 2803–2808.
2. Оцінка розподілу включень і дефектів плазмоелектролітних і лазерно модифікованих покриттів на алюмінієвих сплавах / І.Б. Івасенко та ін. *Наукові нотатки: міжвуз. зб.*, 2019. Вип. №66. С. 135–140.
3. Електрохімічне окислення алюмінію і його сплавів: метод. вказівки до лаб. роб. для студентів спеціальності «Технічна електрохімія» денної та заочної форм навчання / уклад.: О.І. Пилипенко. Х. : НТУ «ХП», 2016. 36 с
4. Shih H., Tzou S. Study of anodic oxidation of aluminum in mixed acid using a pulsed current. *Surface and Coatings Technology*. 2000. 124. P. 278–285.
5. Хімічна корозія та захист металів : навчальний посібник / П. І. Стоєв та ін. Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. 216 с
6. Anodic aluminum oxide films formed in mixed electrolytes of oxalic and sulfuric acid and their optical constants / Li-Rong Zhao, Jian Wang, Yan Li, Cheng-Wei Wang, Wei-Min Liu. *Physica B.: Condensed Matter*. 2010. 405. №11. P.456-460
7. Alloy in the hard anodizing process / P. Kwolek, K. Krupa, A. Obłój, P. Kocurek, M. Wierzińska, J. Sieni. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2018. 27. P. 3268–3275
8. Вплив складу електроліту на характеристики синтезованого під час твердого анодування алюмінію оксидного шару / М.М. Студент та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр.* 2021. Вип. 4 (35). С. 63–69.
9. Зносостійкість та корозійна тривкість ПЕО шарів на покритті зі сплаву Д16 / Г. Г. Веселівська та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2017. Вип. 47, ч. 2. С. 31-37.
10. Багатофункціональні електродугові покриття : монографія / М. М. Студент та ін. Львів : Простір-М, 2018. 335 с.

Referencis

1. Junghoon Lee, Yonghwan Kim, Heuiun Jang, Uoochang Jung and Wonsub Chung (2011). Cr_2O_3 Sealing of Anodized Aluminium Alloy by Heat Treatment. *Procedia Engineering*, 10, P. 2803–2808 [in English]
2. Ivasenko, I.B., Zadorozhna, Kh.R., Posuvailo, V.M. et al. (2019). Otsinka rozpodilu vkluchenn i defektiv plazmoelektrolitnykh i lazerno modyfikovanykh pokryttiv na aliuminiievykh splavakh [Evaluation of the distribution of inclusions and defects of plasma-electrolyte and laser-modified coatings on aluminum alloys] . *Naukovi notatky : Mizhvuzivskyi zbirnyk – Scientific notes: interuniversity. coll, Vol. 66*, 135–140 [in Ukrainian]
3. Pylypenko, O.I. (Eds.). (2016). Elektrokhimichne oksyduvannia aliuminiuu i yoho splaviv : Metodychni vkazivky do laboratornoi roboty dlia studentiv spetsialnosti «Tekhnichna elektrokhimiiia» dennoi ta zaочноi form navchannia [Electrochemical oxidation of aluminum and its alloys: method. directions to

- the lab. do for full-time and part-time students of the "Technical Electrochemistry" specialty] . Kharkiv : NTU «KhPI» [in Ukrainian]
4. Shih, H. & Tzou, S. (2000). Study of anodic oxidation of aluminum in mixed acid using a pulsed current. *Surface and Coatings Technology*. 124, P. 278–285 [in English]
 5. Stoiev, P.I., Lytovchenko, S.V., Hirka, I.O. & Hrytsyna, V.T. (2019). *Khimichna koroziiia ta zakhyst metaliv* [Chemical corrosion and protection of metals]. Kharkiv : KhNU imeni V. N. Karazina [in Ukrainian]
 6. Li-Rong Zhao, Jian Wang, Yan Li, Cheng-Wei Wang, Wei-Min Liu. (2010). Anodic aluminum oxide films formed in mixed electrolytes of oxalic and sulfuric acid and their optical constants / *Physica B: Condensed Matter*, 405, №11, P.456-460 [in English]
 7. Kwolek P., Krupa K., Obłój A., Kocurek P., Wierzbńska M. & Sieni J.. (2018). Alloy in the hard anodizing process / *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27, P. 3268–3275 [in English]
 8. Student, M.M., Hvozdettskyi, V.M., Veselivska, H.H. et al. (2021). Vplyv skladu elektrolitu na kharakterystyky syntezovanoho pid chas tverdoho anoduvannia aliuminiuu oksydnoho sharu [Influence of the electrolyte composition on the characteristics of the oxide layer synthesized during hard anodization of aluminum]. *Tsentrálnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences, Issue 4 (35)*, 63–69 [in Ukrainian]
 9. Veselivska, H.H., Sirak, Ya.Ya., Hvozdettskyi, V.M. et al. (2017). Znosostiikist ta koroziiina tryvkist PEO shariv na pokrytti zi splavu D16 [Wear resistance and corrosion resistance of PEO layers on D16 alloy coating] . *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn : zahalnoderzh. mizhvid. nauk.-tekhn. zb – Design, production and operation of agricultural machines: general government. between science and technology coll, Issue 47, part. 2*, 31-37 [in Ukrainian]
 10. Student, M.M., Pokhmurska, H.V. & Hvozdettskyi, V.M. et al. (2018). *Bahatofunktsionalni elektroduhovi pokryttia* [Багатофункціональні електродугові покриття]. Lviv : Prostir-M [in Ukrainian]

Volodymyr Hvozdetskii, Senior Researcher, PhD tech. sci.

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

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

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Khrystyna Zadorozhna, PhD tech. sci., Senior Researcher, **Mykhajlo Student**, DSc., Senior Researcher

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

Study of the Influence of the Temperature of the Electrolyte During Pulse Anodization on the Properties of the Surface Layers of Technical Aluminum

Aluminum alloys are characterized by low abrasive wear resistance, which significantly restricts their wide use in technological environments, especially if they contain abrasive particles. The method of pulse anodizing, which consists in periodically changing the current density, allows to improve the hardness and abrasive wear resistance. However, the influence of temperature on these processes has not been sufficiently studied.

The process of pulsed hard anodizing was carried out in a 20% aqueous H₂SO₄ solution at a current density of 1.4 A/dm² with a frequency of 100 Hz and a sparsity of 75%. The temperature of the electrolyte during the formation of layers was maintained at -5±1°C, 0°C±1, +5°C±1, +10°C±1. The duration of synthesis was 60 minutes.

At low temperatures of less than -5°C due to the low speed of electrochemical processes, oxide layers with reduced microhardness and thickness are synthesized. At the same time, the phase analysis recorded the synthesis of an oxide layer based on aluminum with the content of two phases: the synthesis of the anodized layer begins with the formation of hydrated aluminum oxide Al₂O₃·H₂O. As the anodizing temperature increases, the rate of electrochemical processes increases, which leads to an increase in the thickness of the anodized layer and its microhardness. At temperatures of 0°C and -5°C, the anodized layer contains only one phase - Al₂O₃·H₂O, (boehmite) with one water molecule. At anodizing temperatures of +5°C and -8°C, the anodized layer is formed again in the form of two phases - Al₂O₃·3H₂O (gibbsite) and Al₂O₃·H₂O (boehmite) and at a temperature of +10°C only Al₂O₃·3H₂O (gibbsite). At a temperature lower than -10°C, the electrolyte turns into a gel-like substance in which electrochemical reactions practically stop, so the synthesis of a pulsed solid anodized layer at a temperature of -5°C was started. However, as a result of the synthesis at T = -5 °C and then even higher (up to 0°C), the average thickness of the pulsed hard anodized layer increased from 83 μm to 110 μm. With further increase in the temperature of the electrolyte, the thickness decreased and at an electrolyte temperature of +10 °C it was 80 μm. Such a change in the thickness of the anodized layer depending on the synthesis temperature was explained by two opposing processes that occur during anodization. As the temperature of the electrolyte increases, the process of synthesis of the layer intensifies first of all, and therefore

the thickness of the obtained layer should constantly increase with the increase of the synthesis temperature. However, an increase in the temperature of the electrolyte also intensifies the surface dissolution of the anodized layer, which is aimed at reducing the thickness of the anodized layer. And when the rate of dissolution of the anodized layer begins to exceed the rate of its synthesis, its thickness begins to decrease.

Conclusions: 1) The more water and sulfur molecules in the anodized layer, the lower its microhardness and abrasive wear resistance. 2) The minimum wear of the anodized layer, which means the highest wear resistance, was recorded for layers synthesized at an anodization temperature of -8°C , and the maximum wear and lowest wear resistance at an anodization temperature of -5°C . 3) High wear resistance of anodized layers synthesized at electrolyte temperatures from -8 to $+10^{\circ}\text{C}$ under conditions of friction without lubrication is caused by the presence of crystalline water in the anodized layer.

aluminum alloys, pulse anodizing temperature, structure, hardness, wear resistance

Одержано (Received) 03.07.2023

Прорецензовано (Reviewed) 23.09.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.9.048.4

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.28-36](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.28-36)

А.О. Сергєєв, асп., В.М. Боков, проф., канд. техн. наук, В.М. Шмельов, доц., канд. техн. наук

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

Багатомодульна електроерозійна головка розмірної обробки дугою

Запропоновано концепцію багатомодульної електроерозійної головки розмірної обробки дугою, що включає склад, загальний технічний опис та схеми підключення модулів. Показано, що використання електроерозійної головки розмірної обробки дугою зі станцією робочої рідини та джерелом живлення технологічним струмом на базі настільного свердлувального верстата дозволяє розширити її технологічні можливості за рахунок використання багатомодульного принципу обробки без суттєвого підвищення вартості обладнання.

електроерозійна головка, розмірна обробка дугою, настільний свердлувальний верстат, станція робочої рідини, джерело живлення технологічним струмом

Постановка проблеми. В сучасних умовах на ремонтних заводах та майстернях існує потреба обробки різних деталей із важкооброблюваних матеріалів, наприклад, із сталі Г13, загартованих сталей та твердих сплавів. Для обробки отворів різної форми поперечного перерізу та порожнин, а також поверхонь тіл обертання в таких деталях, як правило використовують електроерозійні методи обробки, зокрема електроімпульсну обробку.

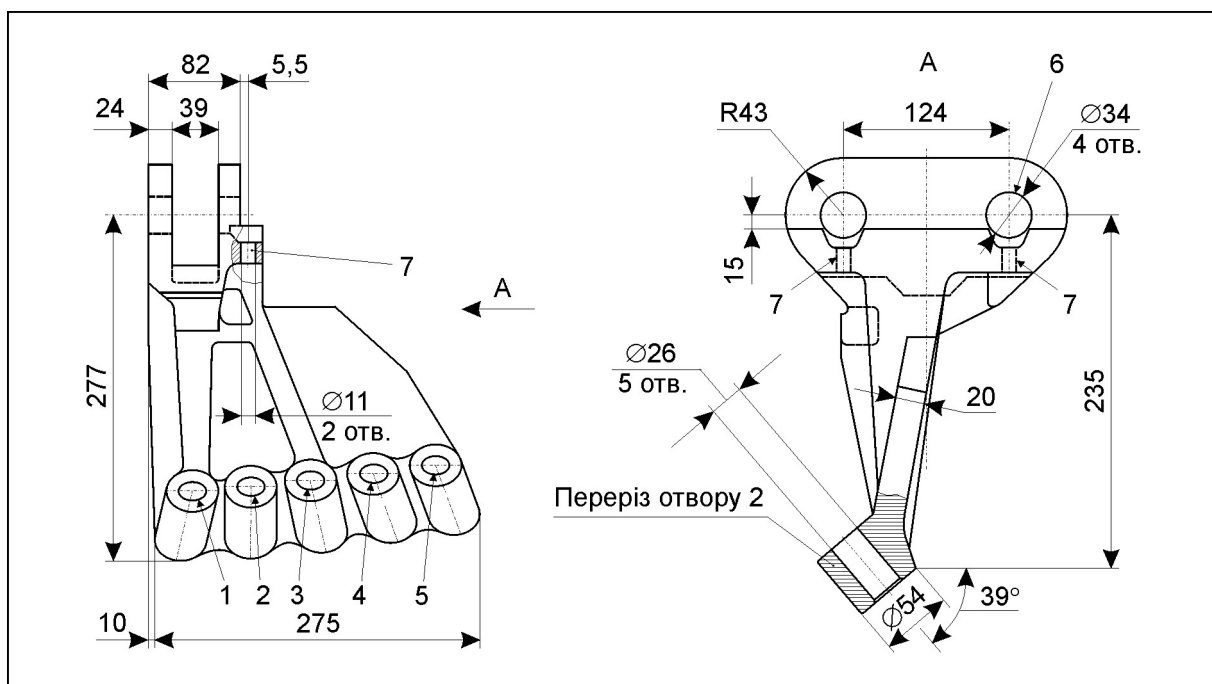
При реалізації електроімпульсної обробки процес супроводжується обов'язковими паузами, які негативно впливають на продуктивність обробки. Крім того, електроімпульсні верстати багато коштовні та призначені для виконання обмеженого виду робіт. Так, вони не здатні обробляти отвори та порожнини безпосередньо на великогабаритному виробу, що суттєво обмежує їх технологічні можливості. Саме тому для виконання ремонтних робіт електроімпульсні верстати застосовуються крайне рідко.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За роботами [1, с. 1-2; 2, с. 4-5; 3, с. 3; 4, с. 3-4; 5, с. 7] відомий спосіб розмірної обробки електричною дугою (РОД). Сутність РОД полягає в тому, що обробку здійснюють електричною дугою, яка горить поміж електродом-інструментом та електродом-заготовкою в поперечному потоці рідини при динамічному тиску потоку в зоні обробки не менше 1...2 кПа. Відмінною особливістю способу РОД, порівняно з електроімпульсною обробкою, є значно більш висока продуктивність обробки (приблизно на порядок та більше). Так, максимальне досягнуте значення продуктивності обробки способом РОД складає:

- для сталі 45 – 27300 мм³/хв.;
- для твердого сплаву ВК15 – 3700 мм³/хв.;
- для титанового сплаву ВТ3-1 – 8100 мм³/хв.;
- для нержавіючої сталі 1Х18Н9Т – 36000 мм³/хв.

В роботі [6] наводиться опис та технічні характеристики стаціонарних електроерозійних верстатів, що реалізують спосіб РОД. Типовий верстат РОД включає в себе: власне верстат, станцію робочої рідини, станцію гідроприводу, джерело живлення постійним технологічним струмом (звичайно, зварювальний випрямляч) та пульт керування. Саме тому, дані верстати масивні, складні у виготовленні, займають велику площу та багато коштовні, а для виконання ремонтних робіт використовуються лише деякі з них.

Так, колійний ремонтно-механічний завод ВАТ «ТРАНСМАШ», м. Дніпро, спеціалізується по ремонту колійних машин для формування шару гравію при прокладанні нової колії. Крім того, завод виготовляє багато різного інструмента для складання та розбирання рейок. В колійній машині для формування шару гравію робочими елементами є лапи, які закріплені на довгому замкнутому ланцюгу, що складається з окремих ланок. За формою лапа схожа на руку людини (рис. 1).



1...5 – отвори для встановлення твердосплавних «пальців»; 6 – чотири отвори, які підлягають розточуванню (шляхом прошивання на верстаті «Дуга 8Д») з діаметра 34 мм на діаметр 40 мм;
7 – два наскрізних отвори, що підлягають прошиванню на верстаті «Дуга 8Д»

Рисунок 1 – Креслення деталі «Лапа»

Джерело: креслення ВАТ «ТРАНСМАШ» [6, с. 191]

Лапи та ланки ланцюгів працюють в умовах інтенсивного абразивного зносу, тому отвори для кріплення лап до ланок ланцюга із круглих ($\varnothing 34$ мм) з часом перетворюються на овальні. Ремонт ланок полягає в розточуванні отворів до $\varnothing 40$ мм. Проблемним питанням на заводі є, власне механічне розточування цих отворів, бо і лапи, і ланки виготовляються із важкооброблюваної сталі 110Г13Л. Застосування твердосплавного інструмента суттєво обмежено тим, що в процесі механічної обробки інструмент працює «на удар» та руйнується. Проблема розточування даних отворів була вирішена, коли завод придбав стаціонарний електроерозійний копіювально-прошивний верстат «Дуга 8Д» (рис. 2, а), що реалізує процес РОД. Порівняно з механічною обробкою твердосплавним інструментом, продуктивність обробки зросла у

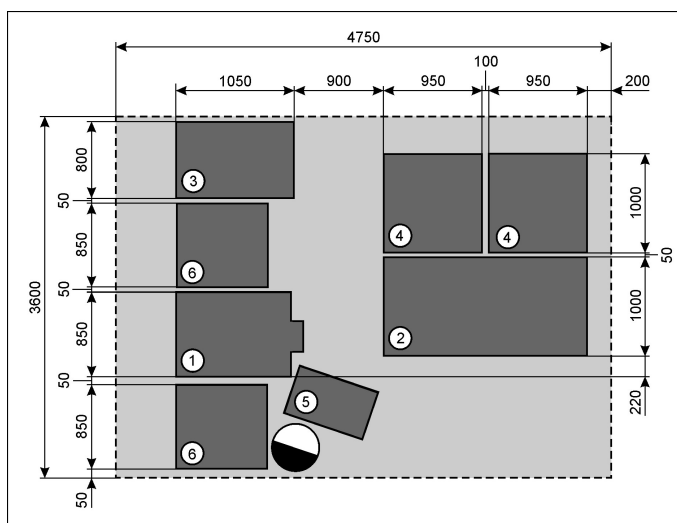
2 – 3 рази. Саме тому даний вид ремонту завод робить вже 19 років. Але вартість верстата та площа установки (17,1 м²) достатньо великі (рис. 2, б).

Крім того, для ремонтних робіт використовуються переносні електроерозійні машини та головки, що реалізують процес РОД

Так за роботою [6, с. 120-139] відома переносна електроерозійна машина «Дуга 23М» (рис. 3), що реалізує процес РОД. Вона використовується на судноремонтному заводі для прошивання отворів Ø25 мм на вертикальній циліндричній поверхні великогабаритної деталі, що виготовлена із листової маломагнітної сталі 45Г17Ю3, товщиною 6 – 8 мм. З метою забезпечення мобільності користування, основні елементи машини та прилади поміщені у перевізний контейнер (рис. 4).



а

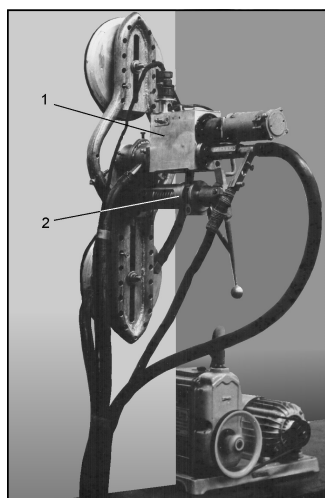


б

1 – верстат; 2 – станція робочої рідини; 3 – станція гідроприводу; 4 – зварювальний випрямляч; 5 – пульт керування; 6 – дві підставки

Рисунок 2 – Оператор ВАТ «ТРАНСМАШ» прошиває отвори діаметром 40 мм а деталі «Лапа» на електроерозійному верстаті «Дуга 8Д», що реалізує процес РОД: а – загальний вид верстата; б – план-схема установки

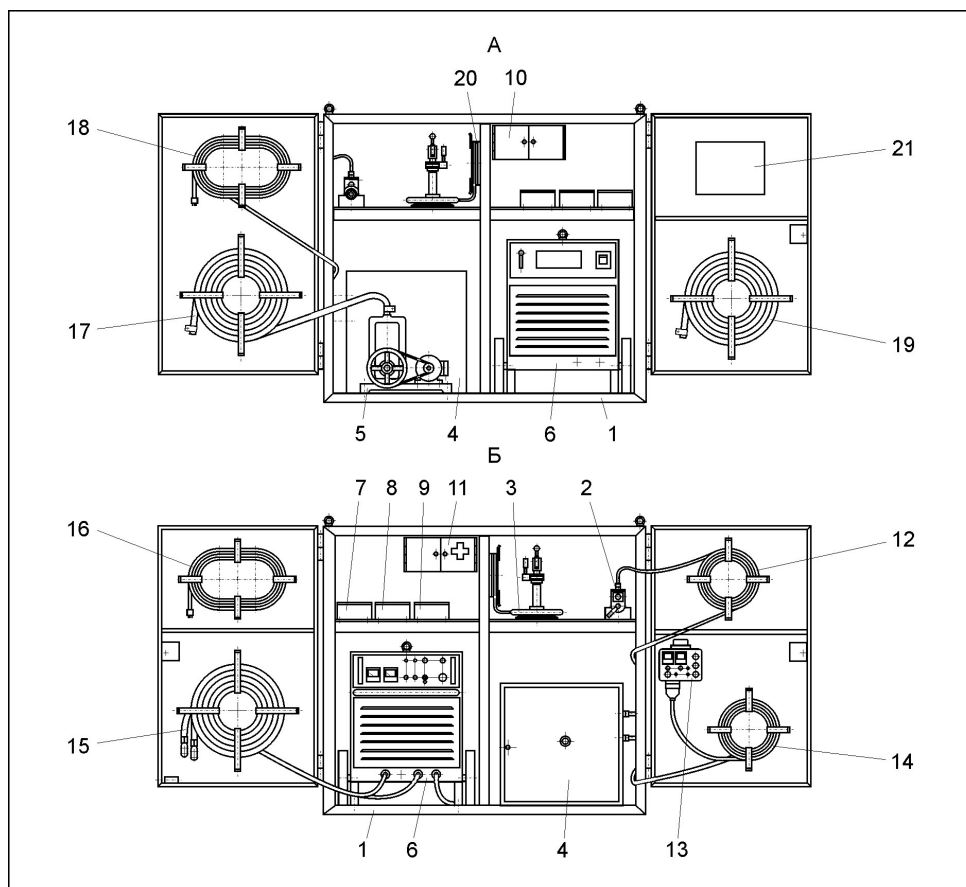
Джерело: розробка автора Бокова В.М.



1 – інструментальна головка з електромеханічним приводом; 2 – механізм позиціонування електрода-інструмента

Рисунок 3 – Переносна електроерозійна машина «Дуга 23М» в робочому стані [6]

Джерело: розробка автора Бокова В. М.



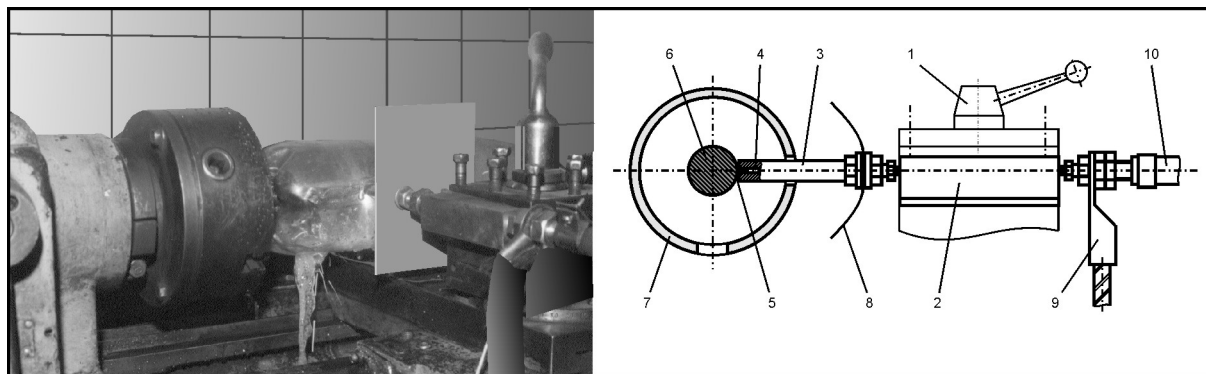
- 1 – контейнер; 2 – інструментальна головка; 3 – механізм позиціонування електрода-інструмента; 4 – електрошафа; 5 – вакуумний насос; 6 – зварювальний випрямляч; 7 – ящик з технологічним інструментом; 8 – ящик з запасними та змінними деталями машини, що швидко зношуються; 9 – ящик з графітовими електродами-інструментами; 10 – шафа для техдокументації; 11 – аптечка; 12 – електрокабель живлення електродвигуна механізму переміщення штока; 13 – переносний пульт керування; 14 – електрокабель переносного блоку керування; 15 – два електрокабеля живлення машини технологічним струмом; 16 – рукав дренажу робочої рідини; 17 – рукав вакуумнаосу; 18 – електрокабель живлення установки (~380 В); 19 – рукав для нагнітання робочої рідини; 20 – електрокабель заземлення; 21 – інструкція щодо експлуатації установки та правилам техніки безпеки

Рисунок 4 – Перевізний контейнер з відкритими передніми (вид А) та задніми (вид Б) дверцями
Джерело: розробка автора Бокова В. М. [6]

Прикладом застосування електроерозійної головки «Дуга 40» (рис. 5) для РОД тіл обертання може служити робота [6, с. 168-183]. Дана головка змонтована на токарному верстаті 16К20 замість різця. Обробка здійснюється переважно графітовими циліндричними електродами-інструментами 3. Робочою рідиною є технічна вода, але краще змащувальна охолоджувальна рідина, яка подається крізь центральний отвір 4 в електроді-інструменті 3 під технологічним тиском. Для запобігання попадання робочої рідини в струминному режимі на оператора, робоча зона головки закрыта прозорою камерою 7. Головка постачається автономною станцією робочої рідини та джерелом живлення постійним технологічним струмом. Головка має ручний привод осьової та радіальної подачі електрода-інструмента 3.

За роботою [6, с. 187] відома електроерозійна головка розмірної обробки дугою зі станцією робочої рідини та джерелом живлення технологічним струмом на базі настільного свердлувального верстата (рис. 6). Вона проста за конструкцією, не

потребує модернізації базового верстата, використовує ручний привод подачі електрода-інструмента, мало коштовна та займає малу площу.



1 – різцетримач; 2 – електродотримач; 3 – електрод-інструмент; 4 – центральний отвір в електроді-інструменті; 5 – торцевий зазор; 6 – електрод-заготовка (тіло обертання); 7 – прозора камера; 8 – екран; 9 – струмовідвід; 10 – напірний рукав робочої рідини

Рисунок 5 – Електроерозійна головка «Дуга 40» до токарного верстата для РОД тіл обертання:

а – головка в дії; б - схема

Джерело: розробка автора Бокова В.М.

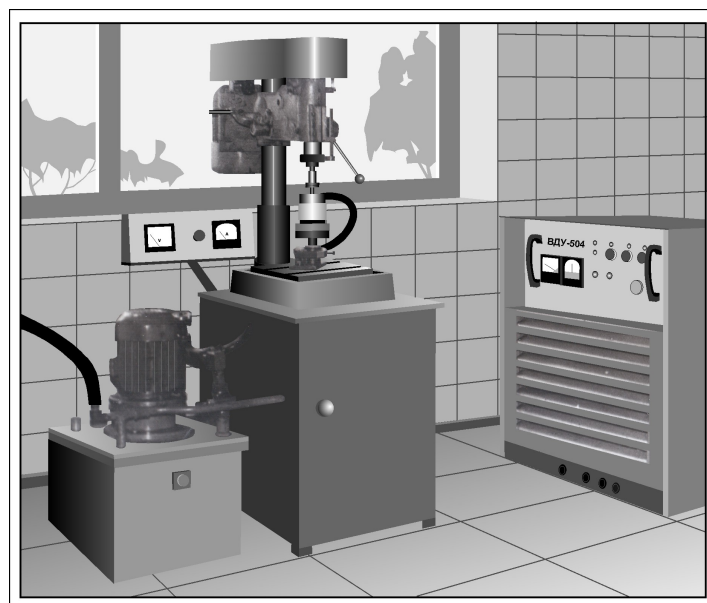


Рисунок 6 – Електроерозійна прошивна головка, що створена на базі настільного свердлувального верстата

Джерело: розробка автора Бокова В.М.

Однак відома головка має вузьке технологічне призначення. Вона застосовується переважно для обробки отворів та порожнин у відносно невеликих деталях. В той же час є потреба в обробці дугою тіл обертання із важкооброблюваних матеріалів (наприклад, із сталі Г13, загартованих сталей, твердих сплавів тощо), обробці отворів в великогабаритних деталях, зокрема із товстолистової сталі. Саме тому застосування головки на ремонтних заводах та майстернях обмежено.

Постановка завдання. Із викладеного вище виходить, що для умов ремонтних заводів та майстерень доцільно мати електроерозійне обладнання з широкими

технологічними можливостями. Крім того, воно повинно бути простим у виготовленні, займати невелику площу та мало коштувати.

В цьому зв'язку, певний практичний інтерес являє можливість застосування багатомодульного обладнання. Така можливість не була об'єктом дослідження.

Метою дослідження є розширення технологічних можливостей головки без суттєвого підвищення її вартості за рахунок застосування багатомодульного обладнання.

Для досягнення поставленої мети необхідно розробити концепцію електроерозійної багатомодульної головки розмірної обробки дугою, що включає склад, загальний технічний опис та схеми підключення модулів.

Виклад основного матеріалу. Загальним для усіх розглянутих вище електроерозійних головок та переносних машин є те, що всі вони мають станцію робочої рідини та джерело живлення технологічним струмом. Якщо прийняти до уваги, що для умов ремонтних заводів та майстерень найбільш підходить електроерозійна головка, що створена на базі настільного свердлувального верстата (рис. 7), то взявши її за основу та зробивши її багатомодульною, можна досягнути поставленої мети.

Таким чином, концептуально задача вирішується у відомій електроерозійній головці розмірної обробки дугою (модуль 1) зі станцією робочої рідини та джерелом живлення технологічним струмом на базі настільного свердлувального верстата за рахунок того, що стіл для верстата виконано у вигляді контейнера, в якому зберігаються один або два додаткові мобільні модулі іншого технологічного призначення, наприклад модуль 2 для розмірної обробки дугою тіл обертання, що встановлюється на токарний верстат замість різця, та модуль 3 для розмірної обробки дугою отворів у великогабаритних деталях, що виконано автономно у вигляді переносної електроерозійної машини, причому усі модулі живляться від однієї станції робочої рідини та одного джерела живлення технологічним струмом, але працюють не одночасно.

Пояснення щодо підключення багатомодульної електроерозійної головки наводиться на рисунку 7.

Електроерозійна головка 1, як модуль М1, призначена переважно для розмірної обробки дугою отворів та порожнин у відносно невеликих деталях. Вона працює на базі настільного свердлувального верстата 2. Стіл для верстата 2 виконано у вигляді контейнера 3, в якому зберігаються два додаткові мобільні модулі іншого технологічного призначення, наприклад модуль М2 для розмірної обробки дугою тіл обертання, що встановлюється на токарний верстат 4 замість різця у вигляді електроерозійної головки (на кресленні показано умовно), та модуль М3 для розмірної обробки дугою отворів у великогабаритних деталях 5, що виконано автономно у вигляді переносної електроерозійної машини (на кресленні показано умовно). Крім того, в контейнері 3 монтується станція робочої рідини 6 та джерело живлення технологічним струмом 7.

Для розмірної обробки дугою отворів та порожнин у відносно невеликих деталях, електроерозійну головку 1, як модуль М1, підключають до станції робочої рідини 6 та джерела живлення технологічним струмом 7 так, як показано на фіг. 1. При цьому кран К2, що стоїть на магістралі 8, в якій робоча рідина знаходиться під технологічним тиском (звичайно від 0,3 до 1,5 МПа), закривають, кран К1 відкривають, а рубильник Р, що керує силовим струмом, вмикають. При обробці дугою робоча рідина рухається за замкнутою траєкторією: бак – напірні магістралі 8, 9, 10, 11, 12 –

герметична камера модуля М1 – зливні магістралі 13, 14, 15, 16 – фільтр для відокремлювання продуктів ерозії від робочої рідини (на кресленні не показано) – бак.

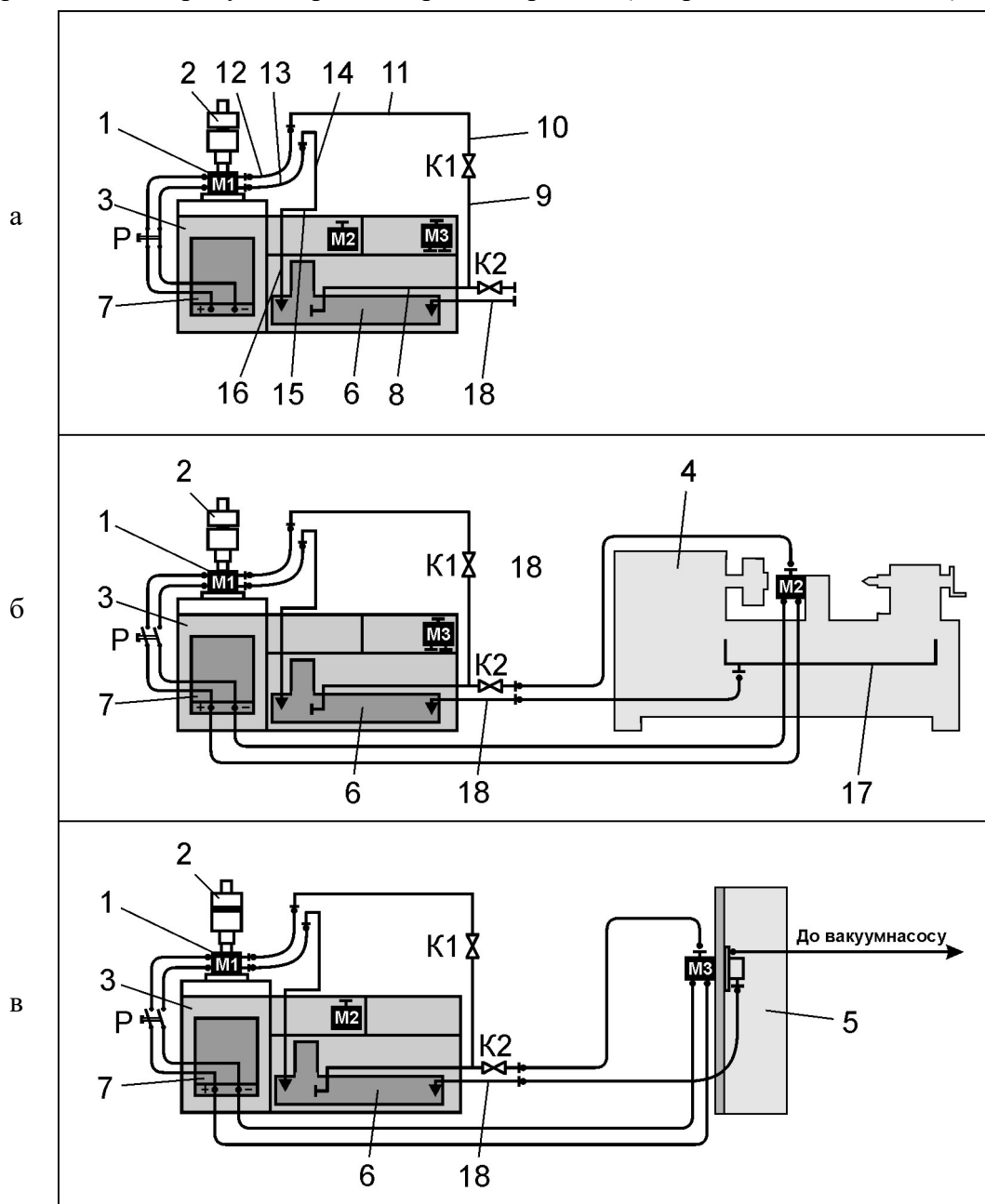


Рисунок 7 – Схеми підключення багатомодульної електроерозійної головки, що пропонується, до станції робочої рідини та джерела живлення технологічним струмом: а – коли працює тільки модуль 1, а модуль 2 та модуль 3 відключені; б – коли працює тільки модуль 2, а модуль 1 та модуль 3 відключені; в – коли працює тільки модуль 3, а модуль 1 та модуль 2 відключені

Джерело: розробка авторів

Для розмірної обробки дугою тіл обертання, із контейнера 3 виймають модуль М2, встановлюють його на токарний верстат замість різця і підключають до станції робочої рідини 6 та джерела живлення технологічним струмом 7 так, як показано на фіг. 2. При цьому кран К1 закривають, кран К2 відкривають, а рубильник Р вимикають.

Вилучення відпрацьованої робочої рідини з піддону 17 токарного верстата в бак здійснюється через зливну магістраль 18.

Для розмірної обробки дугою отворів у великогабаритної деталі 5, із контейнера 3 виймають модуль МЗ, встановлюють його на деталі 5 за допомогою вакуумних захватів (на кресленні не показано) і підключають до станції робочої рідини 6 та джерела живлення технологічним струмом 7 так, як показано на фіг. 3. При цьому кран К1 закривають, кран К2 відкривають, а рубильник Р вимикають.

Як бачимо, усі три модулі живляться від однієї станції робочої рідини 6 та одного джерела живлення 7, але працюють не одночасно.

Слід відмітити, якщо усі три модуля мають ручну подачу електрода-інструмента, вони можуть використовувати один переносний малогабаритний пульт керування (на кресленнях не показано).

Висновки. Розроблено концепцію електроерозійної багатомодульної головки розмірної обробки дугою, що включає склад, загальний технічний опис та схеми підключення модулів. Показано, що використання електроерозійної головки розмірної обробки дугою зі станцією робочої рідини та джерелом живлення технологічним струмом на базі настільного свердлувального верстата дозволяє розширити її технологічні можливості за рахунок використання багатомодульного принципу обробки без суттєвого підвищення вартості обладнання.

Список літератури

1. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.03.07 . Київ, 1999. 36 с.
2. Боков В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою: монографія. Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2002 . 300 с.
3. Боков В.М., Попова М.І. Обробка отворів електричною дугою: монографія. Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2014 . 160 с.
4. Боков В. М., Сіса О. Ф. Оброблюваність матеріалів електричною дугою: монографія . Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2013 . 172 с.
5. Боков В. М. Фізичні процеси спец технологій. Експериментальні дослідження : навч. посіб. Кропивницький: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2022 . 625 с.
6. Боков В. М. Технологія розмірної обробки дугою. Історичний нарис, верстати . Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2020. 316 с.

References

1. Nosulenko, V.I. (1999). Rozmirna obrobka metaliv elektrychnoiu duhoiu [Dimensional processing of metals with an electric arc] : *Extended abstract of doctor's thesis* . Kyiv [in Ukrainian].
2. Bokov, V.M. (2002). *Rozmirne formoutvorennia poverkhon elektrychnoiu duhoiu [Dimensional shaping of surfaces by an electric arc]*. Kirovohrad: Polihrafichno-vydavnychiy tsentr TOV «Imeks LTD» [in Ukrainian].
3. Bokov, V.M. & Popova, M.I. (2014). *Obrobka otvoriv elektrychnoiu duhoiu [Treatment of holes with an electric arc]*. Kirovohrad: Polihrafichno-vydavnychiy tsentr TOV «Imeks LTD» [in Ukrainian].
4. Bokov, V.M. & Sisa, O.F. (2013). *Obrobliuvanist materialiv elektrychnoiu duhoiu [Processing of materials with an electric arc]*. Kirovohrad: Polihrafichno-vydavnychiy tsentr TOV «Imeks LTD» [in Ukrainian].
5. Bokov, V.M. (2022). *Fizychni protsesy spets tekhnolohii. Eksperymentalni doslidzhennia [Physical processes of special technologies. Experimental studies]* . Kropyvnytskyi: Polihrafichno-vydavnychiy tsentr TOV «Imeks LTD» [in Ukrainian].
6. Bokov, V.M. (2020). *Tekhnolohiia rozmirnoi obrobky duhoiu. Istorychnyi narys, verstaty [Technology of dimensional processing with an arc]*. Kropyvnytskyi: PP «Ekskliuzyv-System» [in Ukrainian].

Anton Sergeev, graduate-student, **Viktor Bokov**, Prof., PhD tech. sci., **Vitaly Shmelov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Multi-Module Electroerosion Head for arc Dimensional Processing

In modern conditions at repair plants and workshops, there is a need to process various parts from hard-to-machine materials, for example, from G13 steel, hardened steels and hard alloys. When implementing electropulse processing, the process is accompanied by mandatory pauses that negatively affect processing performance. A distinctive feature of the arc dimensional processing method, compared to electric pulse processing, is a significantly higher processing productivity (approximately by an order of magnitude or more), but stationary machines are massive, difficult to manufacture, occupy a large area and are very expensive. Therefore, only some of them are used for repair work. In addition, portable EDM machines and heads implementing the ROD process are used for repair work, but they have a narrow technological purpose.

The purpose of the research is to expand the technological capabilities of the head without significantly increasing its cost due to the use of multi-module equipment.

Conceptually, the problem is solved in a well-known electroerosion head of arc dimensional processing (module 1) with a working fluid station and a power source with technological current based on a desktop drilling machine due to the fact that the table for the machine is made in the form of a container in which one or two additional mobile modules are stored of another technological purpose, for example, module 2 for dimensional arc processing of bodies of rotation, which is installed on a lathe instead of a cutter, and module 3 for dimensional arc processing of holes in large-sized parts, which is made autonomously in the form of a portable EDM machine, and all modules are powered by one working fluid station and one power source with process current, but do not work simultaneously.

The concept of the electroerosion multi-module head for dimensional processing of the arc, which includes the composition, general technical description and module connection diagrams, has been developed. It is shown that the use of an EDM head for dimensional processing with an arc with a working fluid station and a power source with a technological current based on a desktop drilling machine allows you to expand its technological capabilities due to the use of a multi-module processing principle without significantly increasing the cost of equipment.

EDM head, dimensional arc processing, desktop drilling machine, working fluid station, process current power source

Одержано (Received) 25.08.2023

Прорецензовано (Reviewed) 14.09.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.87

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.37-47](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.37-47)**В.О. Дзюра**, проф., д-р техн. наук, **П.О. Марушак**, проф., д-р техн. наук, **В.О. Семенен**, **В.В. Головка**, **В.Я. Федів***Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна**e-mail: volodymyrdzyura@gmail.com*

Обґрунтування параметрів регулярних мікрорельєфів сформованих на плоских поверхнях

Розглянуто технологічні особливості формування регулярного мікрорельєфу I виду на плоских поверхнях методом вібраційного обкочування вібраційною голівкою із кульковими обкатниками. Отримано аналітичну залежність для визначення шляху, що пройде віброобкатник за чверть оберту шпинделя при заданих режимах формування мікрорельєфу. Отримано аналітичні залежності для визначення відносної площі віброобкоченої поверхні для рельєфу з паралельними канавками, сформованого на плоских поверхнях. Встановлено умови формування мікрорельєфу в залежності від геометричних параметрів мікрорельєфу та технологічних режимів його формування. Побудовано графіки залежності відносної площі віброобкочування F_v від повздовжньої подачі інструменту, $S_{пз}$ та від частоти $n_{дв.х.}$ осциляцій обкатників, а також графіки відносної площі віброобкочування F_v від кроку канавки t_k . **плоскі поверхні, регулярний мікрорельєф, геометричні параметри, вібраційне обкочування, аналітичні залежності, умови формування**

Постановка проблеми. Підвищення зносостійкості та довговічності високонавантажених пар тертя є одним із основних завдань сучасного машинобудування.

Класичним підходом для забезпечення високої якості поверхні є зменшення її шорсткості і відносно коефіцієнта тертя спряжених поверхонь. Однак у випадку високих питомих тисків та високих робочих температур неминучим є поява адгезії між спряженими поверхнями, яка призводить до утворення поверхневих дефектів навіть при нетривалих перевантаженнях [1, 2]. Тому використання класичного підходу до забезпечення якості робочих поверхонь важконавантажених пар тертя є недоцільним.

Одним з основних наукових підходів підвищення зносостійкості поверхонь тертя є формування регулярного мікрорельєфу – сітки каналів невеликої глибини сформованої на поверхні робочих елементів деталей машин для забезпечення ряду суттєвих переваг [3,4]. Сучасне обладнання дозволяє формувати такі мікрорельєфи з високою точністю на фрезерних верстатах з числовим програмним керуванням. Однак вартість такого обладнання є досить високою, а час формування мікрорельєфу – довшим у порівнянні з вібраційними методами формування, які базуються на механічному коливному русі віброобкатника з певною амплітудою. Такий метод формування мікрорельєфу є більш продуктивнішим при формуванні мікрорельєфу простих форм, особливо на плоских поверхнях, що задовольняє умови масового виробництва не надто відповідальних поверхонь.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Встановлення основних закономірностей впливу рельєфних утворень на механізми тертя та зношування та оптимізація технології формування регулярного рельєфу поверхонь тертя активно

© В.О. Дзюра, П.О. Марущак, В.О. Семенен, В.В. Головка, В.Я. Федів, 2023

досліджуються за детермінованими та стохастичними підходами, а також прямими фізичними експериментами [5, 6]. Крім того, на даний час відомо значну кількість методів утворення регулярного рельєфу це й гаряче прокатування, штампування різних видів, лазерне текстування. Ці методи забезпечують утворення заданої геометрії текстур, проте мають певні недоліки, зокрема складність відтворення рельєфу складної форми, необхідність складного обладнання.

Згідно з [7] до регулярного мікрорельєфу II типу відносять мікрорельєф із системою канавок, які дотикаються. У випадку частково регулярного мікрорельєфу такі канавки можна поділити на три підвиди: канавки радіальна вісь яких співпадає, вісь яких зміщена на 0,5 кутового кроку та вісь яких зміщена на іншу величину.

Встановлення основних закономірностей впливу рельєфних утворень на механізми тертя та зношування та оптимізація технології формування регулярного рельєфу поверхонь тертя активно досліджуються за детермінованими та стохастичними підходами, а також прямими фізичними експериментами [8, 9].

Формування регулярного мікрорельєфу на робочих поверхнях деталей машин відчутно підвищує ресурс їх роботи за рахунок зниження ймовірності захоплення деталей за умов рідинного та сухого тертя, більшої мастилоємності поверхонь тертя, меншого періоду припрацювання або його відсутність; меншого коефіцієнту тертя між спряженими деталями, а також вищої зносостійкості [10].

В роботі [11] було сформовано регулярні мікрорельєфи на зовнішніх циліндричних поверхнях зразків із сталей medium-carbon steel 1C45 and the low-carbon alloy steel 18CrMn4-4 яких було встановити вплив режимів оброблення на параметри якості поверхні. Важливим висновком є те, що авторами встановлений значний вплив амплітуди мікрорельєфу на параметр шорсткості поверхні R_a .

Згідно [3] відносна площа F_n регулярного мікрорельєфу (РМР) – це виражене у відсотках відношення площі $F_{кан}$, що займають регулярні нерівності до площі F поверхні деталі, яка обробляється.

В роботі [7] вказано, що відносна площа поверхні F_n – це параметр частково регулярного мікрорельєфу, який найбільш повно характеризує практично всі експлуатаційні властивості поверхні і в першу чергу фактичну площу контакту однієї поверхні

Отже відносна площа поверхні регулярного мікрорельєфу F_n – один з найважливіших його показників, який характеризує експлуатаційні властивості поверхні на якій він сформований. Оптимальне його значення коливається в межах 30-45% в залежності від умов експлуатації спряжених поверхонь [3, 7]. Важливість забезпечення значень відносної площі РМР на всій робочій поверхні є очевидною.

Аналогічні задачі для мікрорельєфів сформованих на торцевих поверхнях тіл обертання були вирішені в роботі [12] для мікрорельєфу I типу з канавками із співвісними осями та в роботі [13] – для мікрорельєфу II типу з канавками із осями зміщеними на 0,5 кутового кроку, тобто тими що дотикаються вершинами.

Найкращими технічними рішеннями для формування регулярних мікрорельєфів різних типів є використання інструменту та обладнання, які наведені в роботах [14, 15, 16]. Як показують експериментальні дослідження такі технологічні комплекси дозволяють сформувати регулярні мікрорельєфи різної складної практично на будь-яких поверхнях. Програмне кутання дозволяє забезпечити високу геометричну точність сформованих канавок і, відповідно, забезпечити стабільну відносну площу мікрорельєфу.

Постановка завдання. Завданням статті є встановлення впливу технологічних параметрів процесу формування регулярного мікрорельєфу сформованого на плоских

поверхнях на відносну площу віброобкочування і, відповідно, експлуатаційні властивості цієї поверхні.

Виклад основного матеріалу. Основним технологічним параметром, що визначає якісні та експлуатаційні параметри оброблюваної поверхні (шорсткість, ступінь зміцнення, маслосмність, тощо) і забезпечується відповідними параметрами віброобкочування (поздовжня подача поверхні – $S_{пзdn}$; частота осциляцій – $n_{дв.х}$; амплітуда $A = 2e_{кр}$, де $e_{кр}$ – ексцентриситет привідного кулачка; діаметр кульки-обкатника – d_k ; зусилля деформування – F_δ ; ширина канавки – ρ), відносна площа віброобкоченої поверхні F_δ [1].

Під поняттям відносна площа F_δ будемо розуміти відношення (у відсотках) площі поверхні, утвореної внаслідок деформування віброобкатником обробленої поверхні при віброобкочуванні до загальної площі оброблюваної поверхні.

Для визначення площі поверхні, що утворюється при використанні одного віброобкатника тобто площі канавки F_{kl} використаємо рис 1.

Крива переміщення кульки-обкатника $L_{кр} = \varphi_1(\varphi_{кр})$ в залежності від часу являє собою синусоїдально-подібну криву з періодом 2π та амплітудою $A=2e_{кр}$ і описується залежністю:

$$L_{кр} = \sqrt{l^2 - e_{кр}^2 \cdot \sin 2\tau\pi n_{ун}} + e_{кр} (1 - \cos 2\tau\pi n_{ун}) - l; \quad (1)$$

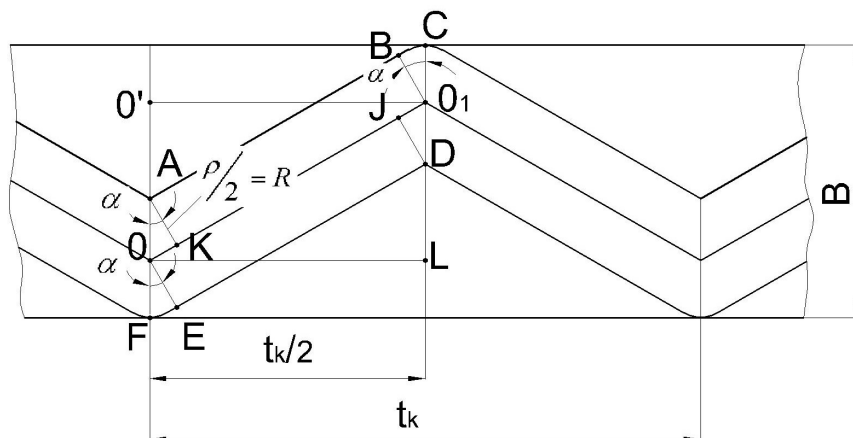


Рисунок 1 – Розрахункова схема для визначення площі віброобкочування на довжині, що дорівнює кроку t_k

Джерело розроблено авторами

Швидкість руху кульки-обкатника V_k визначається за формулою:

$$\frac{dL}{d\tau} = V_{кр} = \left((l^2 - e_{кр}^2 \cdot \sin 2\tau\pi n_{ун})^{\frac{1}{2}} \right)' + (e_{кр} (1 - \cos 2\tau\pi n_{ун}))' - l'; \quad (2)$$

Отримаємо похідну з кожного доданку окремо:

$$1). \left((l^2 - e_{кр}^2 \cdot \sin 2\tau\pi n_{ун})^{\frac{1}{2}} \right)' = -\frac{\pi \cdot n_{ун} \cdot e_{кр}^2 \cdot \cos 2\tau\pi n_{ун}}{\sqrt{l^2 - e_{кр}^2 \cdot \sin 2\tau\pi n_{ун}}};$$

$$2). (e_{кр} (1 - \cos 2\tau\pi n_{ун}))' = 2e_{кр} \cdot \pi \cdot n_{ун} \cdot \sin 2\tau\pi n_{ун};$$

3). $l' = 0$;

Отже швидкість руху кульки-обкатника V_k запишеться у вигляді:

$$\frac{dL}{d\tau} = V_{kp} = 2e_{kp}\pi n_{шп} \cdot \sin 2\tau\pi n_{шп} - \frac{e_{kp}^2 \cdot n_{шп} \cdot \cos 2\tau\pi n_{шп}}{\sqrt{l^2 - e_{kp}^2 \cdot \sin 2\tau\pi n_{шп}}}; \quad (3)$$

а графік залежності V_k від φ_{kp} поданий на рис. 1.

З метою спрощення розрахунків замінимо синусоїдально-подібну траєкторію віброобкатника $L_{kp} = \varphi_1(\varphi_{kp})$, що описується залежністю (1), на прямолінійну, яка представлена формулою $L_{np} = k \cdot \varphi_{kp}$ і залежністю $L_{np} = \varphi_2(\varphi_{kp})$ (рис. 2).

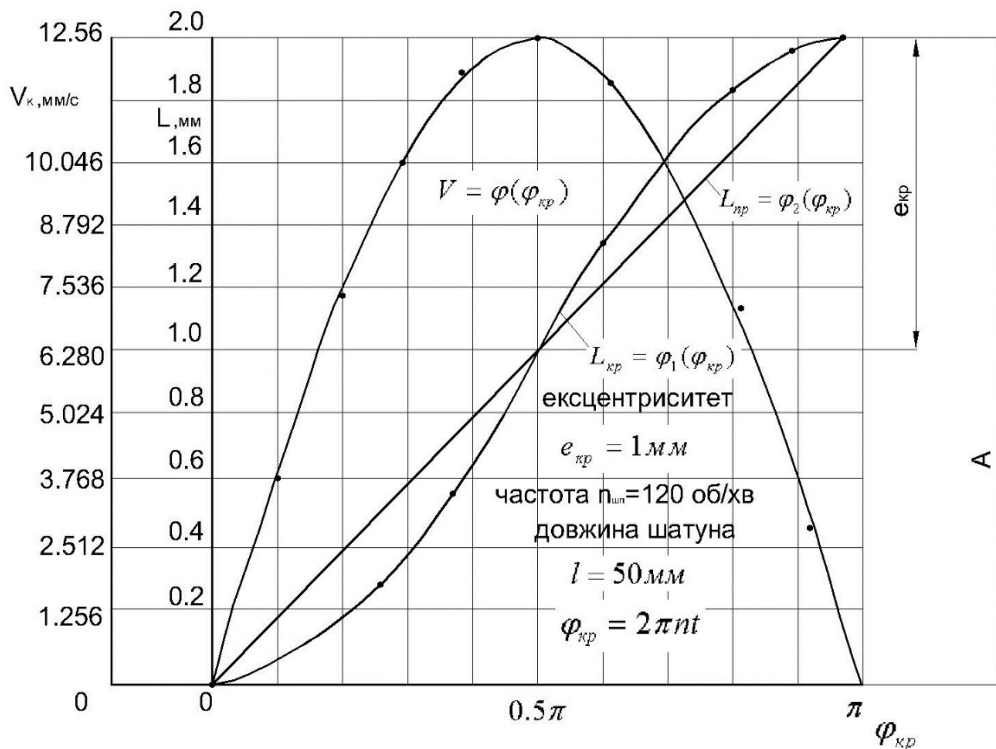


Рисунок 2 – Графік переміщення L і швидкості V_k віброобкатника в залежності від кута φ_{kp} повороту кривошипа l – довжина шатуна; $n_{шп}$ – частота обертання шпинделя (частота осциляцій); τ – час; $2\tau\pi n_{шп} = \varphi_{kp}$ – кут повороту кривошипа

Джерело розроблено авторами

Така заміна повністю допустима і обґрунтовується нижчеподаним. Відносна похибка δ_F при заміні площі, утвореної кулькою-обкатником, що здійснює синусоїдально-подібну траєкторію, на площу канавки, утвореної з прямолінійною траєкторією руху обкатника, не перевищує 5%. Величину δ_F при постійній величині ρ можна визначити із залежності:

$$\delta_F = \frac{L'_{np} - L'_{kp}}{L_{kp}} \cdot 100\% ; \quad (4)$$

де L'_{kp} і L'_{np} – відповідно довжини кривої $L_{kp} = \varphi_1(\varphi_{kp})$ і прямої $L_{np} = \varphi_2(\varphi_{kp})$ в інтервалі $[0, \pi/2]$. Якщо для випадку синусоїдально-подібної траєкторії швидкість руху

обкатника $V_{кр}$ змінна (2) і рис. 1, то при прямолінійній траєкторії $V_{пр}$ буде постійна і визначатиметься із залежності $V_{пр} = 4e_{кр} \cdot n_{шп}$.

Шлях, що пройде віброобкатник за чверть оберту шпинделя при заданих $S_{позд}$, $n_{шп}$ і $V_{пр} = \text{const}$ визначиться залежністю:

$$L'_{пр}(\pi/2) = \sqrt{e_{кр}^2 + \frac{0,0625S_{позд}^2}{n_{дв.х.}^2}} = \sqrt{e_{кр}^2 + 0,0625t_K^2}; \quad (5)$$

де t_k – крок канавки.

Шлях, що пройде віброобкатник за чверть оберту шпинделя при синусоїдально-подібній траєкторії в напрямку, перпендикулярному до $S_{позд}$, визначиться із формули:

$$\begin{aligned} L_{кр1} &= \int_0^{0,25n_{шп}} 2e_{кр} \cdot \pi \cdot n_{шп} \cdot \sin(2\pi \cdot n_{шп} \cdot \tau) d\tau - \int_0^{0,25n_{шп}} \frac{e_{кр}^2 \cdot \pi \cdot n_{шп} \cdot \cos(2\pi n_{шп} \cdot \tau)}{\sqrt{l^2 - e_{кр}^2 \cdot \sin 2\pi \cdot n_{шп} \cdot \tau}} d\tau = \\ &= 2e_{кр} \cdot \pi \cdot n_{шп} \int_0^{0,25n_{шп}} \sin(2\pi \cdot n_{шп} \cdot \tau) d\tau - e_{кр}^2 \cdot \pi \cdot n_{шп} \int_0^{0,25n_{шп}} \frac{\cos(2\pi \cdot n_{шп} \cdot \tau)}{\sqrt{l^2 - e_{кр}^2 \cdot \sin(2\pi \cdot n_{шп} \cdot \tau)}} d\tau \end{aligned}$$

На основі розрахункової схеми (рис. 2) можна стверджувати, що на довжині, яка дорівнює половині кроку канавки $t_k/2$, площа канавки, утвореної в результаті віброобточування, буде дорівнювати подвоєній площі суми площ трапеції $OABO_1$ і сектора O_1BC .

Розглянемо площу у трапеції $OABO_1$, як суму площ трикутника OAK і прямокутника $KABO_1$.

Для знаходження відрізка OO_1 розглянемо ΔOO_1L в якому $O_1L = 2e_{кр}$, $OL = t_k/2$:

$$OO_1 = \sqrt{O_1L^2 + OL^2} = \sqrt{4 \cdot e_{кр}^2 + \frac{t_K^2}{4}} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{t_K^2 + 16 \cdot e_{кр}^2}$$

Розглянемо ΔOAK , його площа розраховується за формулою:

$$F_{\Delta OAK} = 1/2 \cdot AK \cdot OK, \text{ де } AK = \rho/2;$$

Оскільки $\Delta OAK \square \Delta OO_1L$, ($\angle OAK = \angle O_1OL$, $\angle OKA = \angle OLO_1 = 90^\circ$)

$$\frac{OK}{O_1L} = \frac{AK}{OK}; \quad \frac{OK}{2 \cdot e_{кр}} = \frac{\rho/2}{t_K/2};$$

звідси $OK = 2 \cdot e_{кр} \cdot \rho/t_K$;

Отже

$$F_{\Delta OAK} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{2 \cdot e_{кр} \cdot \rho}{t_K} = \frac{\rho^2}{2} \cdot \frac{e_{кр}}{t_K};$$

Оскільки подвійну площу прямокутника $KABO_1$ ($KABO_1 = EOO_1D$) можна представити як різницю площі прямокутника з одною стороною рівною відрізку OO_1 , а другою рівною ширині канавки ($\rho = 2 \cdot AK = 2 \cdot R$) і подвоєній площі ΔOAK .

Тоді знаходимо площу прямокутника з одною стороною рівною відрізку OO_1 , а другою рівною ширині канавки ($\rho = 2 \cdot AK = 2 \cdot R$)

$$F_{\square} = OO_1 \cdot 2 \cdot AK = \frac{\rho}{2} \cdot \sqrt{t_K^2 + 16 \cdot e_{кр}^2};$$

Отже

$$2 \cdot F_{KABO_1} = \frac{\rho}{2} \cdot \sqrt{t_K^2 + 16 \cdot e_{кр}^2} - 2 \cdot \frac{\rho^2}{2} \cdot \frac{e_{кр}}{t_K};$$

А площа сектора круга O_1BC визначається за формулою:

$$F_{O_1BC} = \frac{\pi \cdot R^2}{360^\circ} \cdot \alpha, \text{ де } \angle \alpha = \arctg \frac{OK}{AK} = \arctg \frac{4 \cdot e_{кр}}{t_K};$$

Звідси

$$F_{O_1BC} = \frac{\pi \cdot R^2}{360^\circ} \cdot \alpha = \frac{\rho^2}{4} \cdot \frac{\pi \cdot \arctg \frac{4 \cdot e_{кр}}{t_K}}{360};$$

Знаходимо площу однієї канавки на довжині $t_k/2$:

$$\frac{F_{к1}}{2} = \frac{\rho}{2} \sqrt{t_K^2 + 16e_{кр}^2} - 2 \cdot \frac{\rho^2}{2} \cdot \frac{e_{кр}}{t_K} + 2 \cdot \frac{\rho^2}{4} \cdot \frac{\pi \cdot \arctg \frac{4e_{кр}}{t_K}}{360} = \frac{\rho}{2} \sqrt{t_K^2 + 16e_{кр}^2} + \frac{\rho^2}{4} \left(\frac{\pi \cdot \arctg \frac{4e_{кр}}{t_K}}{180} - \frac{4e_{кр}}{t_K} \right).$$

Після спрощення із врахуванням того, що крок канавки $t_k = S_{нз\delta} / n_{об.х.}$, площа однієї канавки на довжині кроку виразиться залежністю:

$$F_{к1} = \rho \sqrt{t_K^2 + 16e_{кр}^2} + \frac{\rho^2}{2} \left(\frac{\pi \cdot \arctg \frac{4e_{кр}}{t_K}}{180} - \frac{4e_{кр}}{t_K} \right). \quad (6)$$

Кут нахилу осі канавки до лінії, паралельної до напрямку поздовжньої подачі (кут сітки [1]) визначається за формулою:

$$\alpha = \arctg \frac{4e_{кр} \cdot n_{об.х.}}{S_{нз\delta}} \quad (7)$$

При проектуванні віброголовок кількість віброобкатників для утворення мікрорельєфу з паралельними канавками, що дотикаються (рис. 3), можна визначити із залежності:

$$i_0 = \frac{H_{вт} - 2 \cdot e_{кр} - \rho + \left[\rho / \cos \left(\arctg \frac{4e_{кр}}{t_K} \right) \right]}{\rho / \cos \left(\arctg \frac{4e_{кр}}{t_K} \right)} = \frac{H_{вт} + \rho \left[\sqrt{1 + \left(\frac{4e_{кр} n_{об.х.}}{S_{нз\delta}} \right)^2} - 1 \right] - 2e_{кр}}{\rho \sqrt{1 + \left(\frac{4e_{кр} n_{об.х.}}{S_{нз\delta}} \right)^2}} \quad (8)$$

При заданих значеннях $H_{вт}$ і попередньо визначених i_0 для отримання рельєфу з паралельними канавками, що дотикаються (рис. 6), повинна виконуватись необхідна умова:

$$\rho = \frac{H_{вт} - 2e_{кр}}{1 + (i_0 - 1) \sqrt{1 + \frac{16e_{кр}^2}{t_k^2}}}; \quad (9)$$

де i_0 – кількість віброобкатників.

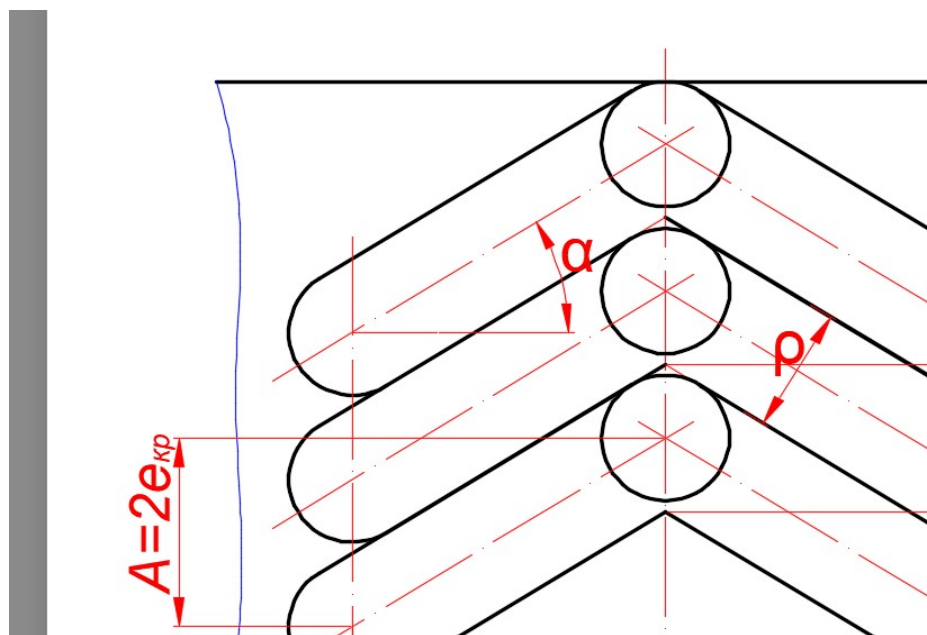


Рисунок 3 – Розрахункова схема для визначення ширини віброобробленої канавки ρ
Джерело розроблено авторами

Із рівняння (7) випливає, що при заданих $H_{вт}$, t та i_0 рельєф (рис. 3) може бути отриманий тільки при певних значеннях $e_{кр}$ і ρ .

Розрахунок відносної площі поверхні з регулярним мікрорельєфом для II виду регулярного мікрорельєфу.

Відносна площа віброобробленої поверхні для рельєфу з паралельними канавками, що дотикаються (II вид мікрорельєфу), може бути визначена при використанні формули (8), підставивши у ній замість величини i_0 величину $i_1 = i_0 - n_0$, де $n_0 < i_0$ та $n_0 = 1, 2, 3, \dots, i_0 - 1$.

$$F_g = 100 \frac{\left(i_1 \cdot \left[\rho \cdot \sqrt{\frac{S_{нозд}^2}{n_{ов.х.}^2} + 16e_{кр}^2} + \frac{\rho^2}{2} \left(\frac{\pi \arctg \frac{4e_{кр} n_{ов.х.}}{S_{нозд}}}{180} - \frac{4e_{кр} n_{ов.х.}}{S_{нозд}} \right) \right] \right)}{\frac{S_{нозд}}{n_{ов.х.}} \left\{ \rho \left[1 + (i_1 - 1) \sqrt{1 + \left(\frac{4e_{кр} n_{ов.х.}}{S_{нозд}} \right)^2} \right] + 2e_{кр} \right\}}; \quad (10)$$

Необхідна умова для отримання мікрорельєфу з паралельними канавками, що дотикаються, (II вид):

$$b_0 = \frac{H_{em} + \rho \sqrt{1 + \frac{16e_{kp}^2}{t^2}} (1 - i_0) - \rho - 2e_{kp}}{i_0 - 1} > 0,$$

де b_0 – відстань між паралельними канавками;

Перевірка правильності формули

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{H_{em} + \rho \sqrt{1 + \frac{16e_{kp}^2}{t^2}} (1 - i_0) - \rho - 2e_{kp}}{i_0 - 1} = \frac{H_{em} + \frac{\rho}{\cos \alpha} (1 - i_0) - \rho - 2e_{kp}}{i_0 - 1} = \\ &= \frac{H_{em} + \frac{\rho}{\cos \alpha} - \frac{i_0 \cdot \rho}{\cos \alpha} - \rho - 2e_{kp}}{i_0 - 1}; \end{aligned}$$

Позначимо $H_{em} + \frac{\rho}{\cos \alpha} - \rho - 2e_{kp}$ як χ - сумарна товщина паралельних канавок, що дотикаються, на піку.

$$\text{Тоді} \quad \frac{\chi - \frac{i_0 \cdot \rho}{\cos \alpha}}{i_0 - 1} = \frac{\chi - i_0 \cdot \frac{\rho}{\cos \alpha}}{i_0 - 1};$$

де $\frac{\rho}{\cos \alpha}$ - ширина канавки при вершині;

$i_0 - 1$ - кількість проміжків між i_0 канавками.

Враховуючи те, що:

$$B = \frac{\rho}{\cos \alpha} + b_0; \quad \cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{16e_{kp}^2}{t^2}}}$$

Настроювальний розмір віброобкатників для формування регулярного мікрорельєфу I виду:

$$B = \rho \sqrt{1 + \frac{16e_{kp}^2}{t^2}} + \frac{H_{em} + \rho \left[(1 - i_0) \sqrt{1 + \frac{16e_{kp}^2}{t^2}} - 1 \right] - 2e_{kp}}{i_0 - 1}$$

Отримані графічні (рис. 4 - 5) залежності показують характер залежності відносної площі віброобкочування від технологічних параметрів при різних значеннях конструктивних параметрів мікрорельєфу та технологічних параметрів процесу формування мікрорельєфу.

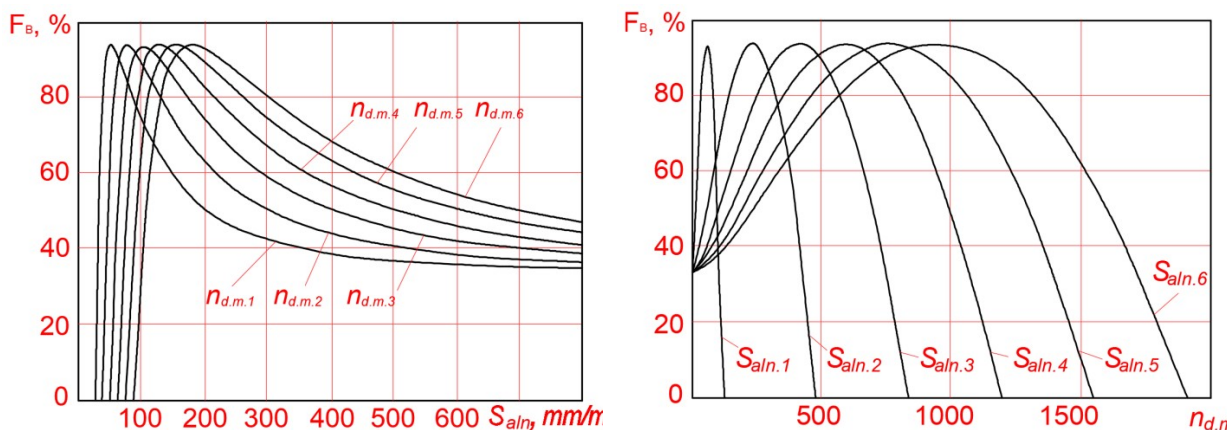


Рисунок 4 – Графіки залежності відносної площі регулярного мікрорельєфу F_r від: повздовжньої подачі інструменту, S_{n3} при заданих $n_{d.m.}$: $n_{1d.m.}=60$ об/хв; $n_{2d.m.}=90$ об/хв; $n_{3d.m.}=120$ об/хв; $n_{4d.m.}=150$ об/хв; $n_{5d.m.}=180$ об/хв; $n_{6d.m.}=210$ об/хв; від частоти $n_{об.х.}$ осциляцій обкатників при заданих S_{n3} : $S_{1n3}=50$ мм/хв; $S_{2n3}=200$ мм/хв; $S_{3n3}=350$ мм/хв; $S_{4n3}=500$ мм/хв; $S_{5n3}=650$ мм/хв; $S_{6n3}=800$ мм/хв;

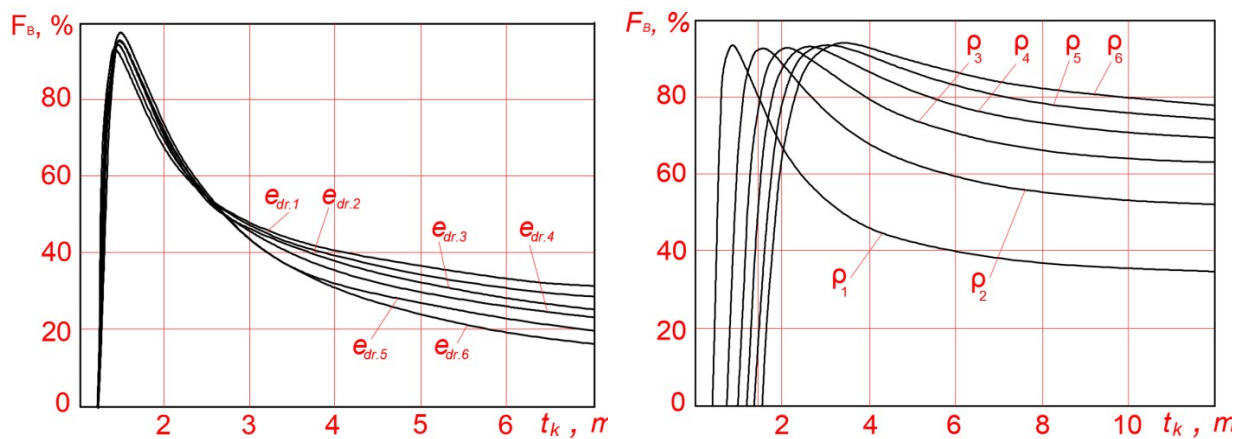


Рисунок 5 – Графіки залежності відносної площі регулярного мікрорельєфу F_r відкroku канавки t_k

Джерело розроблено авторами

при заданих $e_{кр}$: $e_{1кр}=1$ мм; $e_{2кр}=3$ мм; $e_{3кр}=6$ мм;
 $e_{4кр}=9$ мм; $e_{5кр}=12$ мм; $e_{6кр}=15$ мм

при заданих ρ :
 $\rho_1=1$ мм; $\rho_2=2$ мм; $\rho_3=3$ мм; $\rho_4=4$ мм; $\rho_5=5$ мм;
 $\rho_6=6$ мм;

Висновки. Отримано аналітичні залежності для визначення відносної площі мікрорельєфу з паралельними канавками, які дотикаються (II тип), що сформований на плоскій поверхні в залежності від конструктивних параметрів канавки та режимів формування, що дозволить сформувати регулярний мікрорельєф із заданими геометричними параметрами і, відповідно, необхідними експлуатаційними властивостями.

Список літератури

1. Tomanik E., El Mansori M., Souza R., Profito F. Effect of waviness and roughness on cylinder liner friction. *Tribology International*, 2018. 120. pp. 547-555.
2. Grützmacher, P.G.; Profito, F.J.; Rosenkranz, A. Multi-Scale Surface Texturing in Tribology—Current Knowledge and Future Perspectives. *Lubricants Lubricants*. 2019. 7(11), 95; <https://doi.org/10.3390/lubricants7110095>.
3. Surfaces with Regular Microshape. Classification, Parameters and Characteristics, GOST 24773-81 (Moscow: Izdatelstvo Standartov, 1988).
4. Mezghani, S.; Demirci, I.; Zahouani, H.; El Mansori, M. The effect of groove texture patterns on piston-

- ring pack friction. *Precis. Eng.* 2012, 36, 210–217.
5. Pawlus, P.; Reizer, R.; Wieczorowski, M. Reverse Problem in Surface Texture Analysis—One-Process Profile Modeling on the Basis of Measured Two-Process Profile after Machining or Wear. *Materials*. 2019. 12(24), 4169; <https://doi.org/10.3390/ma12244169>.
 6. Nanbu, T., Ren, N., Yasuda, Y. et al. Micro-Textures in Concentrated Conformal-Contact Lubrication: Effects of Texture Bottom Shape and Surface Relative Motion. *Tribol Lett* 29, 241–252 (2008). <https://doi.org/10.1007/s11249-008-9302-9>
 7. Y. G. Schneider, Service Properties of Parts with Regular Microrelief, 2nd ed. (revised and augmented, in Russian) 253 (Leningrad: Mashinostroenie, 1982).
 8. P. Pawlus, R. Reizer, M. Wieczorowski, “Reverse problem in surface texture analysis—one-process profile modeling on the basis of measured two-process profile after machining or wear,” *Materials* 12(24), 4169 (2019); doi:10.3390/ma12244169.
 9. T. Nanbu, N. Ren, Y. Yasuda, et al., “Micro-textures in concentrated conformal-contact lubrication: effects of texture bottom shape and surface relative motion,” *Tribol. Lett.* 29, (2008): 241-252, doi:10.1007/s11249-008-9302-9.
 10. Aftanaziv, I.S.; Kyrychok P.O.; Melnychuk, P.P. Improving the reliability of machine parts by surface plastic deformation. Zhytomyr: ZhTI Publishing, 2001, 516 p.
 11. Nagit G., Slatineanu L., Dodun O., Ripanu M., Mihalache A. (2019). Surface layer microhardness and roughness after applying a vibroburnishing process. *Journal of Materials Research and Technology*. 8. 10.1016/j.jmrt.2019.07.044.
 12. Dzyura V., Maruschak P., Kozbur H., Kryvyi P., and Prentkovskis O., Determining optimal parameters of grooves of partially regular microrelief formed on end faces of rotary bodies. *Smart and Sustainable Manufacturing Systems*, 2021, Vol. 5(1), P. 18-29, DOI:10.1520/SSMS20200057.
 13. Dzyura, V., Maruschak, P., Kuchvara I., Tkachenko I. Ensuring a stable relative area of burnishing of partially regular microrelief formed on end surfaces of rotary bodies. *Strojnický časopis-Journal of Mechanical Engineering*, 2021. VOL 71 (2021), NO 1, 41 – 50.
 14. S. Slavov, D. Dimitrov, I. Iliev. “Variability of regular relief cells formed on complex functional surfaces by simultaneous five-axis ball burnishing,” *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 2020, 82(3), pp. 195-206.
 15. S. Slavov, I. Iliev, Design and FEM static analysis of an instrument for surface plastic deformation of non-planar functional surfaces of machine parts, *Fiability & Durability*, ISSN 1844 – 640X, 2016, Nov 1(2).
 16. Dzyura, V., Maruschak, P., Slavov, S., Dimitrov, D., Vasileva, D. Experimental research of partial regular microreliefs formed on rotary body face surfaces. *Aviation*, 2021, 25(4), 268-277. <https://doi.org/10.3846/aviation.2021.15889>.

References

1. Tomanik, E., El Mansori, M., Souza, R. & Profito, F. (2018). Effect of waviness and roughness on cylinder liner friction. *Tribology International*, 120, pp. 547-555 [in English].
2. Grützmaier, P.G., Profito, F.J. & Rosenkranz, A. (2019). Multi-Scale Surface Texturing in Tribology — *Current Knowledge and Future Perspectives*. 7(11), 95. <https://doi.org/10.3390/lubricants7110095> [in English].
3. Surfaces with Regular Microshape. Classification, Parameters and Characteristics (1988). *GOST 24773-81*. Moscow: Izdatelstvo Standartov [in English].
4. Mezghani, S., Demirci, I., Zahouani, H. & El Mansori, M. (2012). The effect of groove texture patterns on piston-ring pack friction. *Precis. Eng.* 36, 210–217 [in English].
5. Pawlus, P., Reizer, R. & Wieczorowski, M. (2019). Reverse Problem in Surface Texture Analysis—One-Process Profile Modeling on the Basis of Measured Two-Process Profile after Machining or Wear. *Materials*, 12(24), 4169; <https://doi.org/10.3390/ma12244169> [in English].
6. Nanbu, T., Ren, N., Yasuda, Y. et al. (2008). Micro-Textures in Concentrated Conformal-Contact Lubrication: Effects of Texture Bottom Shape and Surface Relative Motion. *Tribol Lett* 29, 241–252 <https://doi.org/10.1007/s11249-008-9302-9> [in English].
7. Schneider, Y.G. (1982). Service Properties of Parts with Regular Microrelief, 2nd ed. (revised and augmented, in Russian) 253. Leningrad: Mashinostroenie [in English].
8. Pawlus, P., Reizer, R. & Wieczorowski, M. (2019). Reverse problem in surface texture analysis—one-process profile modeling on the basis of measured two-process profile after machining or wear. *Materials*, 12(24), 4169doi:10.3390/ma12244169 [in English].
9. T. Nanbu, N. Ren, Y. Yasuda, et al., (2008). Micro-textures in concentrated conformal-contact

- lubrication: effects of texture bottom shape and surface relative motion. *Tribol. Lett.* 29, 241-252, doi:10.1007/s11249-008-9302-9 [in English].
10. Aftanaziv, I.S., Kyrychok P.O. & Melnychuk, P.P. (2001). Improving the reliability of machine parts by surface plastic deformation. Zhytomyr, ZhTI Publishing, 516 p. [in Ukrainian].
 11. Nagit, G., Slatineanu, L., Dodun, O., Ripanu, M. & Mihalache, A. (2019). Surface layer microhardness and roughness after applying a vibroburnishing process. *Journal of Materials Research and Technology*. 8. 10.1016/j.jmrt.2019.07.044 [in English].
 12. Dzyura, V., Maruschak, P., Kozbur, H., Kryvyi, P., & Prentkovskis, O., (2021). Determining optimal parameters of grooves of partially regular microrelief formed on end faces of rotary bodies. *Smart and Sustainable Manufacturing Systems, Vol. 5(1)*, P. 18-29, DOI:10.1520/SSMS20200057 [in English].
 13. Dzyura, V., Maruschak, P., Kuchvara I. & Tkachenko I. (2021). Ensuring a stable relative area of burnishing of partially regular microrelief formed on end surfaces of rotary bodies. *Strojnický časopis- Journal of Mechanical Engineering, Vol. 71, No 1*, 41 – 50 [in English].
 14. Slavov, S., Dimitrov, D. & Iliev, I. (2020). Variability of regular relief cells formed on complex functional surfaces by simultaneous five-axis ball burnishing. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, 82(3)*, pp. 195-206 [in English].
 15. Slavov, S. & Iliev, I. (2016). Design and FEM static analysis of an instrument for surface plastic deformation of non-planar functional surfaces of machine parts, *Fiability & Durability, ISSN 1844 – 640X*, , Nov 1(2) [in English].
 17. Dzyura, V., Maruschak, P., Slavov, S., Dimitrov, D. & Vasileva, D. (2021). Experimental research of partial regular microreliefs formed on rotary body face surfaces. *Aviation, 25(4)*, 268-277. <https://doi.org/10.3846/aviation.2021.15889> [in English].

Volodymyr Dzyura, Prof., DSc., **Petro Maruschak**, Prof., DSc., **Volodymyr Semehen**, **Volodymyr Holovko**, **Vasyl Fediv**

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

Justification of the Parameters of Regular Microreliefs Formed on Flat Surfaces

The task of the article is to establish the influence of the technological parameters of the process of forming regular microrelief formed on flat surfaces on the relative area of vibration rolling and, accordingly, the operational properties of this surface.

The technological features of the formation of a regular microrelief of the 1st type on flat surfaces by the method of vibration rolling with a vibrating head with ball rollers are considered. An analytical dependence was obtained for determining the path that the vibratory run-in will take in a quarter of a spindle revolution under the given modes of microrelief formation. Analytical dependences were obtained for determining the relative area of the vibro-rolled surface for relief with parallel grooves formed on flat surfaces. The conditions for the formation of microrelief have been established, depending on the geometric parameters of the microrelief and the technological modes of its formation.

Graphs of the dependence of the relative area of vibration rolling F_B on the longitudinal feed of the tool, $S_{ПЗ}$ and on the frequency $ndv.x$. oscillations of the rolling elements, as well as graphs of the relative area of vibration rolling F_B from the pitch of the groove t_k .

flat surfaces, regular microrelief, geometric parameters, vibration rolling, analytical dependencies, forming conditions

Одержано (Received) 02.08.2023

Прорецензовано (Reviewed) 06.09.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКА

УДК 681.5 / 620.9 / 621.311

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.48-56](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.48-56)

С.В. Кравцов, магістрант, **Р.В. Жесан**, доц., канд. техн. наук, **О.П. Голик**, доц., канд. техн. наук[©]

*Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна,
e-mail: kravtsov_sv@ukr.net*

Відновлювані джерела енергії й інші базові компоненти зростання енергоефективності та енергонезалежності

У статті розглянуто сучасний стан державної політики у сфері енергозбереження та енергоефективності, акцентовано на актуальності та доцільності подальшого впровадження енергозберігаючих технологій, з врахуванням національного і світового досвіду. Пропонується розглядати відновлювані джерела енергії у якості базових елементів енергоефективності окремих галузей економіки та енергонезалежності держави в цілому. Окремо акцентується на перспективності енергозбереження шляхом підвищення енергоефективності будівель і споруд. Мета статті полягає у проведенні аналізу обставин і базових елементів, що сприяють вдосконаленню та сучасному розвитку різноманітних технологічних процесів, що сприяють підвищенню енергоефективності будівель і споруд, за рахунок використання відновлюваних джерел енергії та створення і впровадження сучасних систем автоматичного керування. На основі проведеної роботи, зроблено висновки щодо подальших досліджень з висвітленої наукової проблематики.

відновлювані джерела енергії, енергозберігаючі технології, енергоефективність, енергонезалежність, будівлі і споруди, системи автоматичного керування

Постановка проблеми. Рівень розвитку будь-якого суспільства, досконалість технологій, що в ньому реалізовані, зручність і комфортність умов проживання та виробництва для населення у значній мірі визначаються станом розвитку енергетичних технологій. Постійне зростання потреб людства у енергії, виснаження, у недалекому майбутньому, земних паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР), а також відчутне забруднення енергетичною галуззю навколишнього природного середовища примушують концентрувати увагу фахівців на комплексному розв'язанні глобальних енергетичних проблем, з метою забезпечення подальшого сталого розвитку суспільства.

Без перебільшення можна стверджувати, що незалежність нашої держави, як суб'єкта міжнародних відносин, її суверенність, безпека та конкурентоспроможність, в глобальному вимірі, неможливі без належної енергонезалежності. І збройна агресія росії проти України, постійні атаки ворога на вітчизняну енергетичну інфраструктуру лише підтверджує високу значимість надійного та безпечного функціонування енергосистеми країни для мінімізації зовнішнього впливу на функціонування та розвиток держави в цілому. Крім того, відомо, що власними ПЕР Україна на сьогодні забезпечена приблизно на третину, все інше закуповується за кордоном.

На шляху до енергетичної незалежності, постійна модернізація енергообладнання та вдосконалення систем і технологій, зменшення шкідливого

[©] С. В. Кравцов, Р. В. Жесан, О. П. Голик, 2023

антропогенного впливу на екологію є неможливими без впровадження сучасних енергозберігаючих та енергоефективних заходів.

Серед основних напрямків державної політики у сфері енергетичної ефективності є стимулювання споживачів до використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та сприяння науковим дослідженням у сфері енергоефективності процесів та технологій.

У схваленій урядом країни Енергетичній стратегії України на період до 2050 року [1] заплановане досягнення Україною вуглецевої нейтральності енергетичного сектору. Місією Енергетичної стратегії заявлене створення умов для сталого розвитку національної економіки через забезпечення доступу до надійних, стійких і сучасних джерел енергії. Зі слів Міністра енергетики України Г. Галущенка, висловлених ним у численних телепрограмах, енергетична стратегія передбачає цілі Європейського зеленого курсу, які, серед іншого, досягатимуться шляхом розвитку сучасної та безпечної атомної генерації, ВДЕ, модернізації та автоматизації систем передачі та розподілу.

Отже, враховуючи глобальні екологічні та економічні виклики, які пов'язані з використанням традиційних ПЕР, всебічну державну підтримку сфери енергозбереження, сьогодні актуальним є впровадження національного і світового досвіду ефективних технологій у промисловості, містобудуванні та архітектурі, зокрема з точки зору впливу автоматизованого керування будівлями та спорудами, їх інженерними системами, на загальні показники енергоефективності, а також пошук шляхів підвищення цих показників до рівня, не нижчого від сучасних мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель і споруд. При цьому важливою складовою виступають ВДЕ, що мають в подальшому розглядатись, як базовий елемент енергоефективності окремих галузей економіки та енергонезалежності держави в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням різних аспектів у сфері енергозбереження та енергоефективності, зокрема з використанням ВДЕ присвячено чимало робіт зарубіжних та вітчизняних науковців.

Серед закордонних публікацій можна, перш за все, виділити фундаментальну працю [2] Твайделла Дж. та Уейра А., у якій досліджено можливості застосування всіх різновидів відновлюваної енергії. Перспективні форми ВДЕ досліджувались Соренсеном Б. Е., який вивчав інженерні аспекти перетворення, передачі та акумулювання енергії [3]. Альтернативні стійкі енергетичні системи були предметом дослідження Геворкяна П. [4].

Вагомий внесок у науково обґрунтовану енергоефективність із застосуванням ВДЕ належить вітчизняним вченим: акад. НАН України, д. т. н, проф. Шидловському А. К.; чл.-кор. НАН України, д. т. н, проф. Денисенку Г. І.; чл.-кор. НАН України, д. т. н, проф. Мхітаряну Н. М.; д. т. н, проф. Денисюку С. П.; д. т. н, проф. Драганову Б. Х.; д. т. н, проф. Каплуно В. В.; д. т. н, проф. Кудрі С. О. та ін.

Слід відзначити і науковий доробок вчених Центральноукраїнського національного технічного університету (ЦНТУ), де на кафедрі автоматизації виробничих процесів вже понад 30 років ведуться дослідження, пов'язані з використанням ВДЕ у системах енергопостачання та автоматики. Над цими питаннями у різний час на даній кафедрі працювали (або працюють): д. т. н., проф. Кондратець В. О.; к. т. н., проф. Пашенко В. Ф.; к. т. н., доц. Джума А.; к. т. н., доц. Березюк І. А.; к. т. н., доц. Зубенко В. О.; к. т. н., доц. Мірошніченко М. С.; к. т. н., доц. Плешков С. П.; Волков І. В. та ін., в т. ч. автори цієї статті. Останнім часом дослідження у сфері енергозбереження та застосування ВДЕ проводили співробітники

кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту ЦНТУ: д. т. н., проф. Клименко В. В.; к. т. н., проф. Плешков П. Г.; к. т. н., доц. Кубкін М. В.; к. т. н., доц. Солдатенко В. П.; к. т. н., доц. Петрова К. Г. та ін.

Проте, незважаючи на чималий обсяг попередніх наукових досліджень щодо різних аспектів застосування ВДЕ, враховуючи стрімкий розвиток науки і техніки та постійно зростаючі вимоги сучасного суспільства до підвищення власних умов комфортного життя, що неможливо забезпечити без належного рівня забезпечення енергією, питання енергозбереження та енергоефективності, із застосуванням ВДЕ, потребують подальшого вивчення. Серед іншого, існує потреба у більш глибоких дослідженнях щодо комбінованого використання різних видів ВДЕ, їх поєднання з традиційними джерелами енергії, а також осучаснення методів та систем керування ними, для підвищення енергоефективності окремих об'єктів.

Постановка завдання. Необхідно провести аналіз обставин і базових елементів, що сприяють вдосконаленню та сучасному розвитку різноманітних технологічних процесів, з точки зору енергозбереження. Особливий упор слід зробити на підвищенні енергоефективності будівель і споруд, за рахунок використання ВДЕ та створення і впровадження сучасних систем автоматичного керування (САК).

Виклад основного матеріалу. Коли мова заходить про енергозбереження, енергоощадність або енергоощадження, то мається на увазі зменшення споживання енергії шляхом використання меншої кількості енергетичних послуг. Енергоощадність відрізняється від енергоефективності, яка стосується використання меншої кількості енергії за ту саму послугу [2, 5]. Звідси ж з'явилося поняття енергозберігаючої технології – методу виробництва продукції з раціональним використанням енергії, який дає можливість одночасно зменшувати енергетичне навантаження на навколишнє середовище і кількість енергетичних відходів, отриманих при виробництві та експлуатації виробленого продукту [2].

Головним показником, що характеризує рівень ПЕР на одиницю виробленого валового внутрішнього продукту (ВВП) є енергоємність. Ще з радянських часів Україна має суттєво більшу енергоємність ВВП, порівняно з багатьма розвиненими країнами. Користуючись відкритими даними мережі Інтернет, можемо зробити висновок, що нині енергоємність вітчизняного ВВП приблизно у 3 рази більше, ніж у Польщі, у 3,8 разів більше, ніж у Туреччини та у 4,8 разів більше, ніж у Великобританії. Оскільки ПЕР є дорогими, вартість товарів чи послуг, для вироблення яких використовується багато енергії, виходить більшою за вартість аналогічних, на виробництво яких пішло менше енергоресурсів. А дорогим товарам та послугам на ринку важко конкурувати з більш дешевими.

Саме тому, одним з визначальних завдань перспективного розвитку України є на сьогодні зменшення енергоспоживання традиційних ПЕР, енерговитрат на одиницю продукції та впровадження дієвих заходів з енергозбереження й енергоефективних технологій, із залученням ВДЕ. Загалом, потенціал енергоощадності в Україні оцінюється фахівцями близько 45 % від обсягу спожитих ПЕР [5].

Слідуючи кращим європейським традиціям, в процесі інтеграції до Європейського Союзу та на виконання міжнародних зобов'язань, Україна послідовно адаптує національне законодавство до глобальних викликів у сфері енергетичної безпеки. Ще 01.07.1994 р. Верховною Радою України був прийнятий Закон України «Про енергозбереження», який заклав підвалини правових, економічних, соціальних і екологічних основ енергоощадності для всіх підприємств, об'єднань та організацій, розташованих на території України, а також для громадян [6]. Закон витримав понад 10 редакцій і 21.10.2021 р. був замінений на Закон України «Про енергетичну

ефективність» [7]. В ньому зокрема йдеться про забезпечення енергетичної ефективності під час виробництва, транспортування, передачі, розподілу, постачання та споживання енергії, а його прийняття здійснено з метою виконання зобов'язань із сприяння енергоефективності та енергозбереженню на нормативно-правовому та політичному рівнях, відповідно до стандартів ЄС, за Договором про заснування Енергетичного Співтовариства та Угодою про асоціацію з Європейським Союзом та Європейським співтовариством з атомної енергії. Важливими проміжними ланками можна вважати Закони України «Про альтернативні джерела енергії» [8], від 20.02.2003 р., «Про енергетичну ефективність будівель» [9], від 02.06.2017 р. та «Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку виробництва біометану» [10].

18.05.2022 р. Європейська комісія презентувала план «REPowerEU», який виник, як відповідь на труднощі та порушення глобального енергетичного ринку, спричинені вторгненням Росії в Україну і термінова необхідність трансформувати енергетичну систему Європи [11]. План «RepowerEU» базується, серед іншого, на напрямках, які також розвиває Україна:

- підвищення рівня енергоефективності та використання ВДЕ (йдеться не лише про великі потужності, а й про малу розподілену генерацію);
- стимулювання розвитку біоенергетики (виробництва твердого палива та біометану);
- розвиток водневої економіки.

Крім того, Кабінет Міністрів України вніс енергонезалежність та енергоефективність до переліку зусиль, на яких концентруватимуться у межах програми ЄС «Ukraine Facility», що передбачає фінансування в розмірі €50 млрд. протягом 4 років, повідомив прем'єр-міністр України Д. Шмигаль [12]. Всі заходи з енергоощадності, енергоефективності й екологічності за галузями та сферами мають головну мету – підсилення енергонезалежності, обороноздатності та безпеки нашої держави. «Ці параметри стануть обов'язковими при відновленні України та при реалізації всіх майбутніх проєктів. Усі ці зміни рухають нас уперед та наближають до стратегічних цілей: перемоги України, вступу до Європейського Союзу і НАТО», – зазначив очільник українського уряду [12].

Перераховані вище юридичні акти дозволили, у кінцевому рахунку, сформувати вже згадувану раніше Енергетичну стратегію України на період до 2050 року [1].

Досить перспективною, на нашу думку, сферою енергозбереження ввижаються заходи, пов'язані з підвищенням енергоефективності будівель і споруд. Коли мова йде про енергетичну ефективність будівлі, то під цим розуміють властивість будівлі, яка характеризується кількістю енергії, необхідної для створення належних умов проживання та/або життєдіяльності людей у такій будівлі [9]. Близьким є поняття «енергоекономічна споруда» – це споруда, яка спроектована таким чином, щоб її енергетичне споживання, з метою опалення, кондиціонування повітря, освітлення і гарячого водопостачання, задовольнялося при мінімальному використанні покупної енергії, тобто при мінімальних витратах на енергоносії [13]. Законодавчо вводяться поняття: «клас енергетичної ефективності будівлі» – позначення (маркування) властивості будівлі, що відповідає розрахунковому рівню енергоефективності будівлі, визначене за інтервалом значень загального показника енергетичної ефективності, що встановлюється відповідно до вимог законодавства у сфері енергетичної ефективності будівель та «мінімальні вимоги до енергетичної ефективності будівель» – вимоги до показників енергоефективності будівель, інженерних систем та їх елементів, теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій [9].

Методологія проєктування енергоефективного будинку повинна ґрунтуватись на

системному аналізі споруди, як енергетичної системи. Проектування енергоефективних будинків має виконуватись на основі достовірної інформації щодо теплотехнічних характеристик енергозберігаючих зовнішніх огорожувальних конструкцій і систем тепло-, водо-, електропостачання та вентиляції. Проте, подальші розробки мають бути спрямовані на визначення ідентифікаторів енергоефективності будівель з урахуванням не лише теплоспоживання, а й електроспоживання, вентиляції та кондиціонування, регіональних параметрів клімату для умов України і особливостей функціонального призначення споруди [14].

У реалізованих в світі проектах енергоефективних будівель [2, 4, 5, 13] існуючі системи електропостачання будівель, на основі ВДЕ, інженерні системи будівель та САК ними нині не інтегровані в єдиний взаємоузгоджений технологічний процес, який має бути спрямований на злагоджене підвищення енергоефективності будівель. Загальна економічна ефективність, зручність експлуатації та керування всім технологічним обладнанням будівель може бути підвищена, завдяки комплексному вирішенню завдань автоматизації, як на рівні локальних систем, так і на рівні систем диспетчеризації та САК [4, 13, 14]. Цей шлях повинен підсилити енергоефективність цілих громад і територій, підвищити їх незалежність від диктату енергокомпаній-постачальників та енергонезалежність у цілому.

Очевидним фактом є те, що на сучасному етапі розвитку науки і технологій, енергонезалежність, енергоефективність та енергозбереження неможливі без подальшого вивчення й впровадження ВДЕ та комплексного їх використання з енергоощадними інженерними підсистемами в загальних системах життєзабезпечення. Виникає необхідність проаналізувати можливості практичного застосування ВДЕ та наявний потенціал відновлюваної енергетики.

Окремі розрахунки щодо оцінки енергопотенціалів ВДЕ та створення відповідних карт, проведені у ЦНТУ [15, 16], були підтверджені більш розлогими академічними дослідженнями – Відділенням комплексних енергетичних систем на основі ВДЕ Інституту електродинаміки НАН України складено атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України [17]. Базуючись на інформації даних джерел, власному життєвому досвіді та загальнодоступній інформації мережі Інтернет, можна зробити декілька тверджень, щодо перспективних напрямків освоєння відновлюваного енергетичного потенціалу України.

1) Сонячна енергія є доступною за всією територією України (потенціал сонячної енергії досліджений у [15-17]). Використання сонячної енергії можливе за двома напрямками:

– перетворення сонячного випромінювання у теплову енергію, за допомогою різноманітних геліоколекторів;

– перетворення сонячного випромінювання безпосередньо у електричну енергію, за допомогою фотоелектричних перетворювачів (сонячних панелей або сонячних батарей).

Існує потреба в подальшому дослідженні технічного і доцільно-економічного енергопотенціалу, а також технічних нюансів застосування геліообладнання.

2) Вітрова енергія є доступною за всією територією України (вітровий енергопотенціал також досліджений у [15-17]). У прив'язці до енергозбереження та підвищення енергоефективності будівель і споруд, можуть бути застосовані вітроустановки двох типів:

– перетворення енергії вітру у механічну роботу (класичні вітряки, водопідйомні вітроустановки тощо);

– перетворення енергії вітрового потоку в електричну енергію – вітроелектричні

установки – ВЕУ (при цьому, електроенергія може видаватись на різних напругах, на постійному або змінному струмі, з акумулюванням і без).

Необхідні подальші дослідження щодо вдосконалення методів перетворення енергії та можливостей впровадження сучасного віротехнічного устаткування.

3) Гідроенергія може бути застосована за кількома напрямками:

– гідроенергія великих рік (доступна за течіями Дніпра та Дністра; енергопотенціал величезний, давно досліджений [5, 15-17] і використовується для потреб крупних промислових та сільськогосподарських підприємств й великих населених пунктів – навряд чи може бути запроваджений для підвищення енергоефективності окремих будівель і споруд);

– гідроенергія малих річок (доступна за всією територією України [5, 17] – існує потреба в подальшому дослідженні технічного і доцільно-економічного енергопотенціалу малих річок, а також інженерних нюансів обладнання для малих ГЕС, міні-ГЕС та мікро-ГЕС);

– енергія морських хвиль (доступна уздовж узбережжя Чорного та Азовського морів – мало досліджена, потребує глибоких наукових досліджень та інженерно-технічних розрахунків);

– енергія припливів і відпливів (може бути доступна на окремих ділянках узбережжя та на островах – практично не досліджена, потребує глибоких наукових досліджень та інженерно-технічних розрахунків).

4) Енергія тепла земних надр (геотермальна енергія) є доступною в окремих місцевостях Карпат [5, 17]. Може бути досить просто інтегрована у системи гарячого водопостачання, опалення і кондиціонування, шляхом відбору тепла від гарячих гірських порід у глибинах землі або від гарячих водяних джерел, що виходять на земну поверхню (гейзерів) [2-5]. Необхідні подальші наукові дослідження, для уточнення теплових потенціалів глибинних гірських порід та термальних вод, а також розробка високоефективного сучасного обладнання для ГеоТЕС.

5) Біоенергетика, тобто виробництво твердого, рідкого і газоподібного палив при анаеробному зброджуванні відходів сільськогосподарського виробництва, окремих галузей промисловості та життєдіяльності людей, доступна в більшості регіонів України. Енергетичний потенціал сировини (біомаси) часто розділяють за походженням: окремо для тваринницької сільськогосподарської біомаси, рослинної сільськогосподарської біомаси, відходів лісу і лісотехнічної промисловості тощо [2, 17]. Паливо, одержуване з біологічної сировини, може використовуватись як промисловими підприємствами (приклади – США, країни Скандинавії), так і у масштабах окремих домогосподарств (приклад – КНР). Є потреба в осучасненні відомостей про вітчизняний потенціал біоенергетики, а також розробка високоефективного сучасного біоенергетичного обладнання.

Висновки:

1. Питання енергозбереження, енергоефективності, енергонезалежності є на часі й мають чітку тенденцію до поширення світом. В багатьох країнах, в т. ч. в Україні, існують сприятливі світоглядні, законодавчі та технічні умови для розвитку даних напрямків національних економік.

2. Для досягнення максимального економічного ефекту від впровадження енергоефективних технологій перетворення будь якої енергії, у види, необхідні кінцевому споживачеві, всі методики повинні базуватись на науково обґрунтованих підходах.

3. Досить перспективним напрямком впровадження енергозберігаючих технологій є підвищення енергоефективності будівель і споруд. Методологія

проектування енергоефективного будинку повинна ґрунтуватись на системному аналізі споруди, як єдиної енергетичної системи, яка об'єднує в собі системи життєзабезпечення (тепло-, водо-, електропостачання, вентиляції та кондиціонування тощо) і різноманітні системи керування.

4. У напрямку розробки САК, доцільним є поглиблене вивчення питання переходу від програмованих логічних контролерів, що базуються переважно на простих алгоритмах керування, до більш сучасних – на основі технологій нечіткої логіки, штучного інтелекту, Інтернет речей та ін.

5. Одним з дієвих шляхів підвищення енергоефективності будівель і споруд в умовах України є використання потенціалу ВДЕ (з урахуванням географічних і кліматичних особливостей місцевості). Існує потреба у більш глибоких дослідженнях щодо комбінованого використання різних видів ВДЕ, а також їх поєднання з традиційними джерелами енергії.

6. Глобально, метою подальших наукових досліджень, серед іншого, має бути розробка підходів та методів для створення «розумних» будинків і «розумних» міст – цифровізація сфери будівель. Наслідком таких розробок має бути інтеграція ВДЕ, разом з комплексом інженерних систем будівлі та власними локальними САК, в єдину систему інтелектуального керування всіма параметрами мікроклімату та безпеки будівель для комфортного життєзабезпечення, з обов'язковим акцентом на європейські та вітчизняні стандарти з енергоефективності.

Список літератури

1. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 квіт. 2023 року. № 373-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#n6> (дата звернення: 20.07.2023).
2. Twidell J., Weir T. Renewable Energy Resources. 2nd ed. London and New York : Routledge Taylor & Francis Group, 2006. 601 с. ISBN 0-419-25320-3.
3. Sorensen B. Renewable Energy Conversion Transmission and Storage. Cambridge, Massachusetts : Academic, 2007. 323 p. ISBN 978-0-12-374262-9.
4. Gevorkian P. Alternative Energy Systems in Building Design, 1st ed. New York : McGraw-Hill Companies, Inc., 2009. 512 с. ISBN 978-0-07-162524-1.
5. Вікіпедія. Вільна енциклопедія : веб-сайт. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/> (дата звернення: 02.08.2023).
6. Про енергозбереження : Закон України від 01 лип. 1994 р. № 74/94-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/74/94-вр#Text> (дата звернення: 21.07.2023).
7. Про енергетичну ефективність : Закон України від 21 жов. 2021 р. № 1818-ІХ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#n436> (дата звернення: 21.07.2023).
8. Про альтернативні джерела енергії : Закон України від 20 лют. 2003 р. № 555. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text> (дата звернення: 21.07.2023).
9. Про енергетичну ефективність будівель : Закон України від 02 черв. 2017 р. № 2118. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19> (дата звернення: 24.07.2023).
10. Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку виробництва біометану : Закон України від 21 жов. 2021 р. № 1820-ІХ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1820-20#Text> (дата звернення: 24.07.2023).
11. Україна та Європа мають спільну мету – енергобезпека та енергонезалежність. *Урядовий портал. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України*, 02 червня 2022 р. . URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/ukrayina-ta-yevropa-mayut-spilnu-metu-energobezpeka-ta-energonezalezhnist> (дата звернення: 16.09.2023).
12. Ткачук Я. Енергонезалежність та енергоефективність увійшли до програми на €50 млрд. – Шмигаль. *Kosatka.Media : Новини енергетики*, 20 липня 2023 р. URL: <https://kosatka.media/category/elektroenergiya/news/energonezalezhnist-ta-energoefektivnist-uviyshli-do-programi-na-50-mlrd> (дата звернення: 16.09.2023).
13. Мхитарян Н. М. Человек и жилище. [Нац. акад. наук Украины, Ин-т возобновляемой энергетики]. Киев : Наук. думка, 2012. 309 с. ISBN 978-966-00-1181-6.

14. Басок Б. І. Фундаментальна теплофізична інженерія будівель у контексті відновлення України. За матеріалами доповіді на засіданні Президії НАН України 5 квітня 2023 року. *Visn. Nac. Acad. Nauk Ukr.* 2023. № 6. С. 62-72. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2023.06.062> ISSN 1027-3239.
15. Пащенко В. Ф., Жесан Р. В. Карти енергетичних потенціалів відновлюваних джерел енергії як джерело інформації для проектування автономних систем енергопостачання із САК. *Сборник научных трудов Национальной горной академии Украины.* № 11. Т. 2. Днепропетровск : РИК НГА Украины, 2001. С. 86-89.
16. Дослідження енергетичного потенціалу регіональних альтернативних джерел для оптимізації паливно-енергетичних балансів / Плешков П. Г. та ін. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Техн. науки.* Вип. 141: Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. Харків : ХНТУСГ, 2013. С. 54-57. URI: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/5926> (дата звернення: 05.06.2023).
17. Кудря С. О., Яценко Л. В., Душина Г. П., Шинкаренко Л. Я., Довга В. Т., Васько П. Ф., Бриль А. О., Шурчков А. В., Забарний Г. М., Жовмір М. М., Віхарев Ю. А. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України. Київ : Інст-т електродинаміки НАНУ, 2001. 40 с.

References

1. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 21 kvitnia 2023h. № 373-r «Pro skhvalennia Enerhetychnoi stratehii Ukrainy na period do 2050 roku [On approval of the Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2050: Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of April 21, 2023. № 373-r]. *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#n6> [in Ukrainian].
2. Twidell, J. ? Weir, T. (2006). *Renewable Energy Resources. 2nd ed.* London and New York : Routledge Taylor & Francis Group [in English].
3. Sorensen, B. (2007). *Renewable Energy Conversion Transmission and Storage.* Cambridge, Massachusetts: Academic [in English].
4. Gevorkian, P. (2009). *Alternative Energy Systems in Building Design, 1st ed.* New York : McGraw-Hill Companies [in English].
5. Vikipediia. Vilna entsiklopediia [Wikipedia, the free encyclopedia]. *uk.wikipedia.org*. Retrieved from <https://uk.wikipedia.org/wiki/> [in Ukrainian].
6. Zakon Ukrainy «Pro enerhozberezhennia» vid 01 lypnia 1994h. № 74/94-VR [The Law of Ukraine "On Energy Saving" of July 1, 1994 № 74/94-VR]. *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/74/94-вр#Text> [in Ukrainian].
7. Zakon Ukrainy «Pro enerhetychnu efektyvnist» vid 21 zhovtnia 2021h. № № 1818-IX [The Law of Ukraine "On Energy Efficiency" of July 1, 1994 № 74/94-VR]. *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#n436> [in Ukrainian].
8. Zakon Ukrainy «Pro alternativni dzhерелa energii» vid 20 liutoho 2003h. № 555 [The Law of Ukraine "On Alternative Energy Sources" of February 20, 2003 № 555]. *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text> [in Ukrainian].
9. Zakon Ukrainy «Pro enerhetychnu efektyvnist budivel» vid 02 chervnia 2017h. № 2118 [The Law of Ukraine "On Energy Efficiency of Buildings" of June 02, 2017 № 2118]. *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19> [in Ukrainian].
10. Zakon Ukrainy «Pro vnesennia zmin do deiakykh zakoniv Ukrainy shchodo rozvytku vyrobnytstva biometanu» vid 21 zhovtnia 2021h. № 1820-IX [The Law of Ukraine "On Amendments to Certain Laws of Ukraine on the Development of Biomethane Production" of October 21, 2021 № 1820-IX]. *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1820-20#Text> [in Ukrainian].
11. Uriadovi portal. Derzhavne ahentstvo z enerhoefektyvnosti ta eneghozberezhennia Ukrainy (2022) Ukraina ta Yevropa maiut spilnu metu – enerhobezpeka ta enerhonezalezhnist [Government portal. State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine. Ukraine and Europe have a common goal – energy security and energy independence]. *kmu.gov.ua* Retrieved from <https://www.kmu.gov.ua/news/ukrayina-ta-yevropa-mayut-spilnu-metu-energobezpeka-ta-energonezalezhnist> [in Ukrainian].
12. Tkachuk, Ya. (2023). Enerhonezalezhnist ta enerhoefektivnist uviishly do programy na €50 mlrd. – Shmyhal. [Energy independence and energy efficiency are included in the €50 billion program – Shmyhal]. *kosatka.media*. Retrieved from <https://kosatka.media/category/elektroenergiya/news/energonezalezhnist-ta-energoefektivnist-uviyshli-do-programi-na-50-mlrd> [in Ukrainian].
13. Mkhitarian, N. M. (2012). Chelovek i zhelishche [Man and dwelling]. *Naukova dumka – Scientific*

- thought, 309 [in Ukrainian].
14. Basok, B. I. (2023). Fundamentalna teplofizychna inzheneriia budivel u konteksti vidnovlennia Ukrainy. Za materialamy dopovidi na zasidanni Prezydii NAN Ukrainy 5 kvitnia 2023h. [Fundamental thermal and physical engineering of buildings in the context of Ukraine's recovery. Based on the report at the meeting of the Presidium of the National Academy of Sciences of Ukraine on April 5, 2023]. *Visn. Nac. Acad. Nauk Ukr.* *doi.org*. Retrieved from <https://doi.org/10.15407/visn2023.06.062> [in Ukrainian].
 15. Pashchenko, V. F., Zhesan, R. V. (2001). Karty enerhetychnykh potentsialiv vidnovliuvalnykh dzherel enerhii yak dzherelo informatsii dlia proektuvannia avtonomnykh system enerhopostachannia iz SAK [Maps of energy potentials of renewable energy sources as a source of information for the design of autonomous energy supply systems with ACS]. *Sbornik nauchnykh trudov natsionalnoi Hornoi akademii Ukrainy. – Collection of scientific papers of the National Mining Academy of Ukraine, 11, Vol. 2, 86-89.* [in Ukrainian].
 16. Pliashkov, P. H., Kubkin, M. V., Petrova, K. H., Serebrennikov, S. V., Soldatenko, V. P., Stets, P. H. (2013). Doslidzhennia enerhetychnoho potentsialu rehionalnykh alternatyvnykh dzherel dlia optymizatsii palyvno-energetychnykh balansiv [Study of energy potential of regional alternative sources for optimization of fuel and energy balances]. *Visnyk KhNTUSH im. P. Vasylenka. Tekhn. Nauky. – Bulletin of KhNTUSH im. P. Vasylenka. Technical Sciences, Issue 141, 54-57.* Retrieved from <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/5926> [in Ukrainian].
 17. Kudria, S. O., Yatsenko, L. V., Dushyna, H. P., Shynkarenko, L. Ya., Dovha, V. T., Vasko, P. F. et al. (2021). Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovliuvanykh ta netradytsiinykh dzherel enerhii Ukrainy [Atlas of energy potential of renewable and non-traditional energy sources of Ukraine]. *Kyiv : Instytut elektrodynamiky NANU* [in Ukrainian].

Serhii Kravtsov, master student, **Roman Zhesan**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olena Holyk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Renewable Energy Sources and Other Basic Components of Increasing Energy Efficiency and Energy Independence

The article examines the current state of state policy in the field of energy saving and energy efficiency, prospects for further implementation of energy-saving technologies, taking into account national and world experience. Attention is focused on the fact that renewable energy sources can be considered as basic elements of energy efficiency of separate sectors of the economy and energy independence of the state as a whole. This is facilitated by the constant growth of humanity's energy needs, the lack of fossil fuel and energy resources, their depletion, as well as the introduction of modern trends in the development of industries. The state policy of Ukraine for the coming years, enshrined in a number of legislative and regulatory acts, envisages comprehensive support and development of the sphere of energy conservation, reduction of harmful anthropogenic impact on ecology, reduction of energy intensity of products.

Ukraine has significant potential for energy saving and is gradually increasing efforts to improve the energy efficiency of separate industry of the economy and the energy independence of the state as a whole. In particular, in the field of architecture and urban planning, measures to increase the energy efficiency of buildings and constructions, through the use of renewable energy sources and the creation and implementation of modern automatic control systems for engineering subsystems in general life support systems, seem quite promising.

In order to inherit the considerable previous scientific experience, the latest research and publications on this topic were analyzed. Prospective renewable energy sources, methods for determining their energy potential, regions and methods of practical use in the field of increasing the energy efficiency of buildings and constructions, as well as options for improving existing and creating new modern automatic control systems have been identified. Ways of further scientific research are planned.

renewable energy sources, energy-saving technologies, energy efficiency, energy independence, buildings and constructions, automatic control systems

Одержано (Received) 02.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 21.10.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 625.7.8

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.57-66](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.57-66)**М.В. Гаркуша**, доц., канд. техн. наук*Національний транспортний університет, м. Київ, Україна**e-mail: mykola.harkusha@ntu.edu.ua*

Впливу корозії на технічний стан дорожніх водопропускних труб та сучасні методи їх ремонту

Із збільшенням кількості дорожніх водопропускних труб на дорогах, особливе значення набувають питання забезпечення надійності і довговічності їх роботи в процесі експлуатації, так як має місце велика кількість деформацій, а також випадки повного руйнування труб під насипами як існуючих автомобільних доріг, так і доріг, які будуються. Світовий досвід показує, що корозійні пошкодження є надзвичайно важливою проблемою і вимагають належної реакції на дуже ранній стадії розвитку.

Одним із методів підвищення довговічності дорожніх водопропускних труб є застосування сучасних матеріалів та технологій для їх виготовлення.

автомобільна дорога, гідротехнічні споруди, довговічність, дорожня водопропускна труба, корозія, транспортна споруда

Постановка проблеми. Гідротехнічні споруди транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб виготовлені з металу (металевих гофрованих конструкцій) є перспективними видами споруд, для зведення яких необхідно мінімум часу, матеріалів та витрат людської праці, маючи при цьому великі переваги з альтернативними конструкціями та нерідко застосовуються як малі та середні мости.

Однією з причин передчасного руйнування дорожньої водопропускної труби з металевих гофрованих конструкцій є корозія металу, а також відсутність сучасних підгодів аналізу та врахування корозійного пошкодження водопропускної труби на її подальшу надійність та довговічність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Незважаючи на те, що дорожні водопропускні труби були побудовані з використанням різних форм поперечного перерізу, однією з найпростіших і найпоширеніших форм є кругла труба. У цьому випадку дорожня водопропускна труба будується шляхом попереднього розміщення круглої труби на шарі підготовленої основи.

Основною частиною процесу проектування водопропускних конструкцій є вибір матеріалу труб. Одним з основних матеріалів, що дає можливість виготовляти дорожні водопропускні труби великого діаметру є метал. Найчастіше металеві водопропускні дорожні труби бувають з металевих гофрованих конструкцій (Corrugated Steel Pipe — CSP), що виготовляються з плоского прокату зі сталі з гофрованим покриттям та конструкційні пластинчасті гофровані сталеві труби (Structural Plate Corrugated Steel Pipe — SPCSP), що складаються зі сталевих листів, гофрованих, а потім вигнутих, SPCSP розроблені для збільшення прольотів [1, 2]. Запропоновані конструкції мають додаткові заходи із захисту від корозії у порівнянні зі стандартним покриттям HDG (Hot-Dip Galvanized) [3].

Так, наприклад, в 2013 році в місті Кенморі, Альберта (Канада) внаслідок тривалих сильних дощів сталася велика повінь та було зруйновано практично всі малі мости та водопропускні труби, було завдано збитків, щонайменше на 6 мільйонів канадських доларів (рис. 1, а). При аналізі та дослідженні водопропускних труб було виявлено недоліки з проєктування, значною корозією окремих елементів, а також неефективність гасників енергії, в тому числі за рахунок гідравлічного стрибка, що спричинило руйнування [4]. Варто зазначити, втрата цілісності водопропускної труби може призвести до тимчасового або довготривалого закриття руху автомобільною дорогою, а також значних витрат відновлення або повну заміну дорожньої водопропускної труби. Крім того, повне обвалення водопропускної труби може спричинити велику загрозу безпеці автомобілістів. Саме така катастрофа сталася в штаті Нью-Йорк на автомобільній дорозі I-88 28 червня 2006 р. (рис. 1, б) [5].



Рисунок 1— Результати повені

Джерело: на підставі [4, 5]

Постановка завдання. Малодослідженою є проблема існуючих причин та наслідків впливу корозії на дорожню водопропускну трубу. З впливом негативних факторів на дорожні водопропускні труби вони з працездатного стану переходять у обмежено-працездатний стан. З обмежено-працездатного стану в результаті відмови переходять у обмежений (аварійний) стан. Критеріями відмови дорожні водопропускні труби є параметри, які визначають працездатність будови в цілому, а також окремі його елементи: захисне покриття, матеріал труби, конструктивні особливості. Ці параметри або сукупність їх встановлюється в нормативно-технічній або конструкторській документації. Підходів впливу факторів на довговічність дорожньої водопропускної труби в Україні не встановлено, на відміну від норм в ЄС чи США. Крім того не встановлено в українських нормах методів ремонту. Тому метою роботи є проведення аналізу з впливу корозії на технічний стан дорожніх водопропускних труб та сучасні методи їх ремонту.

Виклад основного матеріалу. Металеві гофровані дорожні водопропускні труби були розроблені в кінці 19 століття і використовувалися як водопропускні труби ще в 1896 році [8]. Гофрована геометрія забезпечила трубі додаткову жорсткість і міцність без збільшення товщини стінки труби, як це було б необхідно при використанні звичайної труби того ж діаметру. Завдяки нижчій початковій вартості та відносній простоті монтажу гофрований метал незабаром витіснив бетон як кращий матеріал для будівництва водопропускних труб. Однак конструктивні наслідки використання цієї нової, відносно гнучкої труби залишалися погано зрозумілими. У 1941 році Мерлін Спенглер розробив знамениту формулу Айови [9], яка забезпечила теоретичну основу для проєктування заглиблених гнучких трубопроводів. Робота Спанглера в поєднанні з

інфраструктурним бумом після Другої світової війни в 1950-х і 1960-х роках призвела до поширення гофрованих металевих труб по всьому світу. Незважаючи на те, що дорожні водопропускні труби забезпечили багато переваг у той час, їхня спадщина зараз представляє широко поширену проблему через погіршення якості металу труб.

Місцеві та регіональні умови навколишнього середовища впливають на довговічність водопропускних труб, а на хімічні умови території впливають ґрунти, рослинність, кількість опадів і дренажні характеристики даного вододілу [10]. Вони, у свою чергу, впливають на ступінь деградації конструкції, викликаної корозією та стиранням.

Корозія руйнує матеріал труби через хімічні реакції, повертаючи метал до його початкового стану оксидів або солей. Цей процес, як правило, впливає на металеві труби або металеву арматуру в бетонних трубах, хоча бетонні водопропускні труби також можуть зазнавати подібної реакції, якщо вони піддаються впливу сильнолужних ґрунтів або дуже суворих умов. Корозія може виникати як зсередини, так і зовні труби, або на обох поверхнях одночасно [11]. Електричний струм тече від металу в трубі, яка зазвичай служить і катодом, і анодом, через іони в навколишньому ґрунті або воді, які служать електролітом. Ступінь результуючої корозії пропорційний виробленому струму [12].

Серйозність підземної корозії вивчалася в США на початку 1900-х років, хоча до того моменту вважалося, що така корозія завжди викликана блукаючими електричними струмами. Ранні випробування показали, що серйозна корозія може виникнути і без наявності блукаючого струму. Методи випробувань почали впроваджувати в 1928 році, коли Бюро стандартів опублікувало статтю К.Х. Логан заявив, що «випробування на корозію ґрунту показали, що потрібно враховувати структуру та хімічні властивості ґрунту, а також характер контакту між ґрунтом і трубою» [13].

Довговічність сталевих дорожніх водопропускних труб у ґрунті є функцією кількох взаємодіючих параметрів, що включають питомий опір ґрунту, кислотність (рН), вміст вологи, розчинні солі, вміст кисню (аерація) і бактеріальну активність [14, 15]. Однак усі процеси корозії передбачають перетікання струму з одного місця в інше (корозійний осередок). Таким чином, чим вищий питомий опір і/або нижча вологість ґрунту, тим більша довговічність.

Хоча виникнення корозії зазвичай є результатом впливу більш ніж одного фактора, стандарт Американської асоціації водопровідних споруд використовує питомий опір як ключове вимірювання для визначення того, чи потрібен додатковий захист від корозії [16 – 18]

Автор [17] зазначив, що питомий опір є, ймовірно, найкращим показником агресивності ґрунту.

У 1950-х роках Міністерство транспорту Каліфорнії обстежило понад 7000 водопропускних труб і розробило діаграму для прогнозування часу до першої перфорації водопропускних труб із гофрованої оцинкованої сталі на основі рН і питомого опору ґрунту [19].

В 1962 році Дж. Л. Бітон і Р. Ф. Стратфул [10] досліджували питомий опір ґрунту та рН ґрунту в залежності від кількості опадів і терміну служби гофрованих металевих водопропускних труб. Вони спостерігали, що в районах з великою кількістю опадів були високі значення питомого опору ґрунту, а рН ґрунту був менше ніж 7. У районах із низьким рівнем опадів були низькі значення питомого опору ґрунту, а рН ґрунту був більше ніж 7. Вони також відзначили, що вищий рН впливає на зниженням корозії сталі, а у районах з дуже низькою кількістю опадів терміну служби оцинкованих труб збільшується. Однак, виявлено, що сильний абразивний потік може видалити захисне

покриття за один період, що значно зменшить термін служби водопропускної труби. Дж. Л. Бітон і Р. Ф. Стратфул прогнозували розрахунковий термін служби водопропускної труби цього типу від 10 до 100 років [10]

Дослідження, проведене Согрго Companies [14] у 1986 році, виявило, що довговічність із боку ґрунту, як правило, не є обмежуючим фактором при проєктуванні сталевих дорожніх водопропускних труб. Однак для сталевих дорожніх водопропускних труб вміст вологи в ґрунті в першу чергу впливає на активність будь-яких присутніх іонів хлориду та прискорення корозії хлоридом. Дослідження показали, що ґрунт з вологістю нижче за 17,5 % не мають значного впливу на швидкість корозії цинкового покриття за рахунок присутності іонів хлориду. Виявлено, що більшість ґрунтів потрапляє в діапазон рН від 6 до 8, що є сприятливим для довговічності. Ґрунти нижчим значення рН (кислі ґрунти), які зазвичай зустрічаються в районах з великою кількістю опадів, мають тенденцію бути більш корозійним.

Ґрунти з високим вмістом глини має тенденцію утримувати воду довше і тому є більш корозійними, ніж добре дреновані ґрунти. Ґрунтова волога також може містити різні розчинені тверді речовини, видалені з ґрунту, це може сприяти корозії через зниження питомого опору. І навпаки, багато хімічних речовин ґрунту утворюють нерозчинні карбонати або гідроксиди при зануреній у ґрунт металевій поверхні, це може зменшити корозію з боку ґрунту. Високий рівень хлоридів і сульфатів робить більш агресивним ґрунт [14].

На механізми руйнування впливають наявність вологи та характеристики ґрунту, включаючи тип, однорідність, щільність, вміст глини і мінералогії [20, 21]. Погіршення може статися в закопаних водопропускних трубах внаслідок корозії всередині та ерозійних пустот у оточуваному ґрунті.

Довговічність сталевих дорожніх водопропускних труб залежить від характеру пропуску води через трубу (постійний режим, тимчасовий), її заповнення. Важливим фактором може бути вплив розчинених газів. Збільшення рівня розчиненого кисню та вуглекислого газу може прискорити корозію. Найбільший важливий ефект вуглекислого газу у воді пов'язаний з його впливом на утворення захисних плівок карбонату кальцію, які часто утворюються на трубах поверхнях яких знаходиться у жорсткій воді. Розчинені солі можуть збільшити довговічність зменшуючи розчинність кисню, але можуть посилити корозію, якщо вони іонізуються та зменшують питомий опір.

Усі метали під час корозії утворюють певний тип продуктів корозії. Незалежно від того чи є вони захисними металевими покриттями, такими як алюміній або цинк, або базова сталь. Зазвичай продукт корозії, такий як оксид, зі значним стабільним накопичення призведе до зниження швидкості корозії.

На практиці продукт корозії утворюється через гальванічний елемент, може осідати в невеликих розривах у покритті та служити для придушення подальшої корозії так само, як плівки продуктів корозії захищають тверді поверхні. Таким чином, утворення окалини на металевих поверхнях є важливим фактором при використанні металів у воді, що здатні пришвидшувати розвиток корозії [14].

Багато державних установ США [7] встановлюють проєктний термін служби (design service life —DSL) для будівництва інфраструктурних проєктів. DSL для проєктів доріг залежить від типу доріг, обсягів трафіку та майбутніх моделей зростання. Залежно від задіяного агентства, що буде, DSL доріг зазвичай коливається від 25 до 100 років.

Розрахунковий термін служби матеріалу (Estimated Material Service Life —EMSL) визначається як роки надійної служби з моменту встановлення до необхідності

відновлення або заміни. EMSL труби залежить від матеріалу труби та умов навколишнього середовища.

В таблиці 1 наведено EMSL CSP з трьома різними системами покриття [22].

Таблиця 1 – EMSL CSP з трьома різними системами покриття

Розрахунковий термін служби матеріалу для CSP			
Матеріал покриття	Розрахунковий термін служби	Умови навколишнього середовища	Максимальний рівень стирання згідно з FHWA
Оцинкована труба	приблизно 50 років	6.0 < pH < 10.0 2000 < r < 10000 Ohm-cm Жорсткість води (> 50 ppm CaCO ₃)	Рівень 2
Алюмінізована тип 2 (ALT2)	не менше ніж 75 років	5,0 < pH < 9,0 r > 1500 Ohm-cm	Рівень 2
Полімерне покриття	не менше ніж 100 років	5,0 < pH < 9,0 r > 1500 Ohm-cm	Рівень 3
	не менше ніж 75 років	4,0 < pH < 9,0 r > 750 Ohm-cm	
	не менше ніж 50 років	3,0 < pH < 12,0 r > 250 Ohm-cm	

Джерело: на підставі [22]

Варто зазначити, що метод оцінки терміну служби відрізняється для оцинкованих, в порівнянні з алюмінізованими CSP типу 2 або CSP з полімерним покриттям. Оцінка всіх трьох покриттів гарантує, що матеріали труб, зазначений для проекту, відповідатиме вимоги терміну служби.

Не обов'язково, щоб EMSL труби відповідав DSL проекту. Наприклад, тротуари, настили мостів та інші частини автомагістралі, як правило, замінюються або відновлюються кілька разів протягом терміну експлуатації цієї дороги. CSP можна відновити за допомогою ковзання, мощення або іншими методами. Зараз багато агенцій США завищують розмір первинної установки труби (діаметр отвору) для подальшої її реабілітації. Більшість установ регулярно перевіряють усі водопропускні труби, незалежно від матеріалу труби, щоб забезпечити своєчасне виявлення проблем.

Вибір матеріалу для водопропускної труби повинен враховувати економіку життєвого циклу, включаючи витрати на початкове встановлення, планову перевірку, технічне обслуговування та можливе відновлення.

Найпоширенішим первинним захистом металевих водопропускних дорожніх труб є: оцинковане, алюмінізоване (тип 2) та полімерне [23 — 25].

Найкращим методом оцінки терміну служби водопропускної труби на запропонованих ділянках є оцінка раніше встановленої труби. Перша значна польова оцінка встановлених водопропускних труб була проведена CALTRANS (California Department of Transportation) на початку 1960-х років. Дані, отримані в ході дослідження CALTRANS 7000 водопропускних труб, були використані для розробки діаграми для оцінки середнього терміну експлуатації оцинкованих труб. Ця цифра передбачає EMSL труби на основі втрати 25 відсотків сталі в трубі. Це дослідження

оцінювало термін служби CSP на основі значень рН і питомого опору. Жорсткість води не вимірювалася в місцях водопропускних труб. Після оцінки CALTRANS багатьох штатів США та провінцій Канади провели подібні дослідження своїх водопропускних труб. Результати були широко поширені з варіаціями через переважання м'якої води, сильний снігопад або, можливо, інтенсивне використання дорожньої солі. Результати регіональних досліджень підкреслюють важливість використання місцевої інформації за її наявності.

Метод прогнозування, розроблений оцінкою CALTRANS, залежав від того, чи перевищував рН 7,3. Там, де рН постійно був меншим за 7,3, кінцевий термін служби контролювався швидкістю корозії труби, причому швидкість корозії залежала від спільного впливу рН і питомого опору. Для ділянок з рН більше 7,3 контрольним фактором була корозія ґрунту. Ці останні місця, як правило, були в напівпустельних і пустельних районах з менш ніж 10 дюймами опадів на рік. У звіті CALTRANS зазначено, що принаймні 70 відсотків труб, як очікується, прослужать довше, ніж зазначено на діаграмі для розрахунку їх довговічності [7].

Автором [29] було запропоновано модель, що описує поширення корозійних пошкоджень. Пошкодження, викликані корозією (переважно точковою), можуть бути представлені за допомогою напівемпіричних моделей, що описуються за допомогою функції, що полягає в пошуку максимальної глибини пошкодження, це можна записати як:

$$u(t) = \beta_0 \delta_0 t^{\eta_0}, \quad (1)$$

$u(t)$ – глибина ураження CSP пропорційно часу (t),

η_0 – середня швидкість корозії CSP (пов'язана з пошкодженнями, викликаними пасивацією),

β_0 і δ_0 – річна швидкість корозії CSP залежно від агресивності води та засипки, відповідно.

Використовуючи рівняння (1) отримуємо миттєву швидкість появи корозійних пошкоджень у вигляді рівняння:

$$v(t) = \frac{d}{dt} u(t) = \beta_0 \delta_0 \eta_0 t^{\eta_0-1}. \quad (2)$$

Тоді як у рівнянні (2) можна помітити, що для значень, що наближаються до нуля, коефіцієнт миттєвого пошкодження є занадто високим ($v(t) \rightarrow \infty$). Однак корозійні пошкодження мають високе кінцеве значення через те, що на початковій фазі сталевий елемент повністю піддається хімічній корозії. У більш тривалий проміжок часу, після появи продуктів корозії, швидкість процесу сповільнюється, оскільки іржа є природним фізичним бар'єром. Це означає, що процес корозії відбувається постійно постійний, якщо тільки не зміниться раптова структура матеріалу або хімічний склад ґрунтового середовища, що може вплинути на кінетику корозійних процесів.

Методи відновлення. Чотири найпоширеніші способи модернізації металевих водопропускних труб: ковзання (метод гільзування), затвердіння на місці (торкретування, метод «гнучкої труби»), наплення вкладишів і розрив труб. Серед представлених методів, як показано на рис.2, ковзання є найбільш часто використовуваним методом для комплексної модернізації металевих водопропускних труб [30].



Рисунок 2—Відновлення дорожньої водопропускної труби ковзанням
Джерело: на підставі [30]

Торкретування використовується як футерівка для труб з 1990-х років Торкретбетон наноситься за допомогою роботизованої установки. Його широко використовували для реконструкції водопропускних труб із гофрованих сталевих труб [31].

Відновлення дорожньої водопропускної труби, можливе із застосуванням гнучкого матеріалу труби, насиченого термореактивним полімером [32].

Гнучка труба розширюється за допомогою стисненого повітря. Термореактивна смола може тверднути при температурі навколишнього середовища або при високій температурі щоб частина труби з'єдналася з головною трубою. Як правило, гнучким матеріалом для труб використовується скловолокно армоване термореактивною смолою. Подано детальний огляд техніки. Застосування даного методу потребує очищення труб від корозіїповністю, що ускладнює та здорожчує застосування даної технології.

Висновок. Водопропускальні труби на автомобільних дорогах володіють значним запасом міцності, але у процесі експлуатації виникає ряд дефектів які потребують ремонтних заходів, при відсутності систематичних оглядів та своєчасного ремонту можуть відбутися раптові серйозні порушення, на ліквідацію яких потрібні значні витрати. Подібні підходи з визначення впливу корозії металу на довговічність дорожніх водопропускних труб, як в США та ЄС в Україні відсутні. На даний час відсутні методичні рекомендації з відновлення дорожніх водопропускальних труб з металевих гофрованих конструкцій.

Список літератури

1. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Клименко М. І. Аналіз проблем забезпечення надійності та довговічності гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб в умовах експлуатації. *Дороги і мости*. 2022. Вип. 25. С. 190–202. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.25.190>
2. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Клименко М. І. Аналіз технічного стану гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб від впливу корозії. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництва*. 2022. Вип. 111. С. 164–173. DOI: 10.33744/0365-8171-2022-111-164-173
3. West, A.; Williams, K.; Villeneuve, D.; Carroll, P. (2012). Added Longevity with Thermoplastic Polymer Coated Structural Steel Plate. Atlantic Industries, Canada.
4. Гаркуша М.В. Вплив пошкоджених гідротехнічних споруд транспортного будівництва з дорожніх водопропускних труб на навколишнє середовище. *Водопостачання та водовідведення*:

- проекування, будова, експлуатація, моніторинг*: зб. тез V Міжн. наук.-техн. конф., 11-13 жовтня 2023 року, Нац. унів. «Львівська політехніка», м. Львів. С. 82 — 83.
5. Jay N. Meegoda, Thomas M. Juliano and Chi Tang (2009). Culvert Information Management System – *Demonstration Project New Jersey Institute of Technology Newark, NJ 07102*. P. 51
 6. BMROSS. City of Ottawa Ottawa Road 174 at Jeanne D’Arc Pipe Collapse Root Cause Analysis Report. 2012. P.37
 7. NCSIPA Corrugated Steel Pipe Design Manual (2008). National Corrugated Steel Pipe Association 14070 Proton Road Suite 100 LB 9 Dallas, TX 75244. P 637.
 8. Corrugated Steel Pipe Institute. (2009). Handbook of steel drainage & highway construction products. (2nd Canadian ed.). Canada: American Iron and Steel Institute.
 9. Spangler, M. G. (1941). The structural design of flexible pipe culverts. Iowa Engineering Experiment Station. Bulletin 153
 10. Beaton, J., & Stratfull, R. (1962). Field Test for Estimating Service Life of Corrugated Metal Pipe Culverts. Highway Research Board Proceedings, Vol. 41.
 11. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2007). Highway drainage guidelines. (4th ed.). Washington, D.C.
 12. Gabriel, L. H., Moran, E. T. (1998) Service Life of Drainage Pipe. Transportation Research Board, Washington, D.C.
 13. Chaker, V. (1990). Corrosion testing in soils—Past, present, and future. In Corrosion Testing and Evaluation: Silver Anniversary Volume (pp. 95-111): ASTM International.
 14. Modern Sewer Design (1995) American Iron and Steel Institute; 3rd edition. P. 306.
 15. Maher, M., Hebel, G., & Fuggle, A. (2015). Service Life of Culverts. Transportation Research Board, Washington, D.C. Retrieved from <http://www.trb.org/Main/Blurbs/172633.aspx>
 16. Beben, D. (2014). Backfill corrosivity around corrugated steel plate culverts. Journal of Performance of Constructed Facilities, 29(6).
 17. Chaker, V. (1990). Corrosion testing in soils—Past, present, and future. In Corrosion Testing and Evaluation: Silver Anniversary Volume (pp. 95-111): ASTM International.
 18. California Department of Transportation (Caltrans), Caltrans Supplement to FHWA Culvert Repair Practices Manual, Design Information Bulletin No. 83-03, Caltrans, Sacramento, 2013.
 19. California Department of Transportation, Division of Construction (CalTrans). (1978). Method for Estimating the Service Life of Steel Culverts: California Test 643. Sacramento, CA.
 20. Bradford, S. A. (2000). The practical handbook of corrosion control in soils.
 21. Hepfner, J. J. (2001). Statewide corrosivity study on corrugated steel culvert pipe.
 22. Corrugated Pipe Durability Guidelines, FHWA Technical Advisory T 5040,12, October 1979, Federal Highway Administration, Washington, D.C. 20590, 9 pp.
 23. West, A.; Williams, K.; Villeneuve, D.; Carroll, P. (2012). Added Longevity with Thermoplastic Polymer Coated Structural Steel Plate. Atlantic Industries, Canada.
 24. Corrugated Steel Pipe Institute. Canadian Performance Guideline for Structural Plate Corrugated Steel Pipe and Deep Corrugated Structural Plate Structures. Technical Bulletin. Issue Thirteen: October 24, 2011. Cambridge, Ontario.
 25. Ault, P. White Paper: Performance Guideline for Buried Steel Structures. Elzly Technology Corporation, 2012. Ocean City, New Jersey.
 26. AASHTO M 218 Standard Specification for Steel Sheet, Zinc-Coated (Galvanized), for Corrugated Steel Pipe.
 27. AASHTO M 274 Standard Specification for Steel Sheet, Aluminum-Coated (Type 2), for Corrugated Steel Pipe.
 28. Berry, I. Uniquely Engineered Coating for Storm Sewers and Culverts. Warner Custom Coating. Presentation, 2012. Guelph, Ontario.
 29. Alamilla JL, Espinosa-Medina MA, Sosa E (2009) Modelling steel corrosion damage in soil environment. Corros Sci 51:2628–2638.
 30. Chennareddy, Rahulreddy. Retrofit of Corroded Metal Culverts Using GFRP Slip-Liner, The University of New Mexico, 2019.
 31. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2015. Service Life of Culverts. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/22140>
 32. Program, N.C.H.R., Culvert Rehabilitation to Maximize Service Life while Minimizing Direct Costs and Traffic Disruption. Vol. Project Number 14-19. 2010, Transportation Research Board: Government Printing Office.

References

1. Onyshchenko, A.M., Harkusha, M.V. & Klymenko, M.I. (2022). Analiz problem zabezpechennya nadiynosti ta dovhovichnosti hidrotekhnichnykh sporud transportnoho budivnytstva z dorozhnikh vodopropusknykh trub v umovakh ekspluatatsiyi. *Dorohy i mosty, Issue 25*, 190–202. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.25.190> [in Ukrainian].
2. Onyshchenko, A. M., Harkusha, M. V. & Klymenko, M. I. (2022). Analiz tekhnichnoho stanu hidrotekhnichnykh sporud transportnoho budivnytstva z dorozhnikh vodopropusknykh trub vid vplyvu koroziyi. *Avtomobil'ni dorohy i dorozhnye budivnytstvo, Issue 111*, 164–173. DOI: 10.33744/0365-8171-2022-111-164-173 [in Ukrainian].
3. West, A.; Williams, K.; Villeneuve, D. & Carroll, P. (2012). Added Longevity with Thermoplastic Polymer Coated Structural Steel Plate. Atlantic Industries, Canada [in English].
4. Harkusha, M.V. (2023). Vplyv poshkodzhenykh hidrotekhnichnykh sporud transportnoho budivnytstva z dorozhnikh vodopropusknykh trub na navkolyshnye seredovyshe [Impact of damaged hydraulic structures of transport construction from road culverts on the environment]. Water supply and drainage: design, construction, operation, monitoring: *V Mizhnarodna nauково-tekhnichna konferentsia (11-13 zhovtnya 2023 roku L'viv) – V International scientific and technical conference (pp.82–83)*, L'viv [in Ukrainian]
5. Jay N. Meegoda, Thomas M. Juliano & Chi Tang (2009). Culvert Information Management System – Demonstration Project New Jersey Institute of Technology Newark, NJ 07102. P. 51 [in English].
6. BMROSS (2012). City of Ottawa Ottawa Road 174 at Jeanne D'Arc Pipe Collapse Root Cause Analysis Report. P.37 [in English].
7. NCSIPA. Corrugated Steel Pipe Design Manual (2008). National Corrugated Steel Pipe Association 14070 Proton Road Suite 100 LB 9 Dallas, TX 75244. P 637 [in English].
8. Corrugated Steel Pipe Institute. (2009). Handbook of steel drainage & highway construction products. (2nd Canadian ed.). Canada: American Iron and Steel Institute [in English].
9. Spangler, M. G. (1941). The structural design of flexible pipe culverts. Iowa Engineering Experiment Station. Bulletin 153 [in English].
10. Beaton, J., & Stratfull, R. (1962). Field Test for Estimating Service Life of Corrugated Metal Pipe Culverts. *Highway Research Board Proceedings, Vol. 41* [in English].
11. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2007). Highway drainage guidelines. (4th ed.). Washington, D.C [in English].
12. Gabriel, L. H., Moran, E. T. (1998) Service Life of Drainage Pipe. Transportation Research Board, Washington, D.C [in English].
13. Chaker, V. (1990). Corrosion testing in soils – Past, present, and future. In *Corrosion Testing and Evaluation: Silver Anniversary Volume* (pp. 95-111): ASTM International [in English].
14. Modern Sewer Design (1995). American Iron and Steel Institute; 3rd edition. P. 306 [in English].
15. Maher, M., Hebler, G., & Fuggle, A. (2015). Service Life of Culverts. Transportation Research Board, Washington, D.C. Retrieved from <http://www.trb.org/Main/Blurbs/172633.aspx> [in English].
16. Beben, D. (2014). Backfill corrosivity around corrugated steel plate culverts. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(6) [in English].
17. Chaker, V. (1990). Corrosion testing in soils—Past, present, and future. In *Corrosion Testing and Evaluation: Silver Anniversary Volume* (pp. 95-111): ASTM International [in English].
18. California Department of Transportation (Caltrans), Caltrans Supplement to FHWA Culvert Repair Practices Manual, Design Information Bulletin No. 83-03, Caltrans, Sacramento, 2013 [in English].
19. California Department of Transportation, Division of Construction (CalTrans). (1978). Method for Estimating the Service Life of Steel Culverts: California Test 643. Sacramento, CA [in English].
20. Bradford, S. A. (2000). The practical handbook of corrosion control in soils [in English].
21. Hepfner, J. J. (2001). Statewide corrosivity study on corrugated steel culvert pipe [in English].
22. Corrugated Pipe Durability Guidelines, FHWA Technical Advisory T 5040,12, October 1979, Federal Highway Administration, Washington, D.C. 20590, 9 pp [in English].
23. West, A.; Williams, K.; Villeneuve, D.; Carroll, P. (2012). Added Longevity with Thermoplastic Polymer Coated Structural Steel Plate. Atlantic Industries, Canada [in English].
24. Corrugated Steel Pipe Institute. Canadian Performance Guideline for Structural Plate Corrugated Steel Pipe and Deep Corrugated Structural Plate Structures. Technical Bulletin. Issue Thirteen: October 24, 2011. Cambridge, Ontario [in English].
25. Ault, P. (2012). White Paper: Performance Guideline for Buried Steel Structures. Elzly Technology Corporation, Ocean City, New Jersey [in English].

26. AASHTO M 218 Standard Specification for Steel Sheet, Zinc-Coated (Galvanized), for Corrugated Steel Pipe [in English].
27. AASHTO M 274 Standard Specification for Steel Sheet, Aluminum-Coated (Type 2), for Corrugated Steel Pipe [in English].
28. Berry, I. (2012). Uniquely Engineered Coating for Storm Sewers and Culverts. Warner Custom Coating. Presentation, Guelph, Ontario [in English].
29. Alamilla JL, Espinosa-Medina MA, Sosa E (2009). Modelling steel corrosion damage in soil environment. *Corros Sci* 51:2628–2638 [in English].
30. Chennareddy, Rahulreddy. Retrofit of Corroded Metal Culverts Using GFRP Slip-Liner, The University of New Mexico, 2019 [in English].
31. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2015). *Service Life of Culverts*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/22140>[in English].
32. Program, N.C.H.R., Culvert Rehabilitation to Maximize Service Life while Minimizing Direct Costs and Traffic Disruption. Vol. Project Number 14-19. 2010, Transportation Research Board: Government Printing Office[in English].

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

National Transport University, Kyiv, Ukraine

The Impact of Corrosion on the Technical Condition of Road Culverts and Modern Methods of Their Repair

There were about 130,000 pieces of hydraulic engineering structures of transport construction from road culverts on the highways of Ukraine, which is more than 90% of the total number of transport structures on the roads. This is explained, first of all, by the more cost-effective use of pipes compared to small bridges, the arrangement of the subgrade without break ups, the increase in safety, speed and comfort of movement. With the increase in the number of hydraulic engineering structures of transport construction from road culverts on roads, the issue of ensuring the reliability and durability of their work during operation is of particular importance, as there is a large number of deformations, as well as cases of complete destruction of pipes under embankments of both existing automobile roads and roads under construction. World experience indicates that corrosion damage is an extremely important problem and requires an appropriate response at a very early stage of development.

The problem of the existing causes and consequences of corrosion on the road culvert is understudied. With the influence of negative factors on the road culverts, they go from an operational state to a limited-operational state. As a result of a failure, they go from a limited-operational state to a limited (emergency) state. The failure criteria of road culverts are parameters that determine the performance of the building as a whole, as well as its individual elements: protective coating, material pipes, structural features. These parameters or a set of them are established in regulatory and technical or design documentation. Approaches to influencing factors on the durability of road culverts in Ukraine have not been established, in contrast to norms in the EU or the USA. In addition, repair methods are not established in the Ukrainian norms of repair methods. Therefore, the purpose of the work is to conduct an analysis of the impact of corrosion on the technical condition of road culverts and modern methods of their repair.

The article examines the impact of corrosion on the technical condition of road culverts, gives a brief description of the most common causes of corrosion of road culverts and modern methods of their repair. One of the methods of increasing the durability of road culverts is the use of modern materials and technologies for their manufacture.

automobile road, hydraulic structures, durability, road culvert, corrosion, transport structure

Одержано (Received) 02.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 14.10.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

АГРОІНЖЕНЕРІЯ

УДК631.333.12

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.67-75](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.67-75)

С.І.Павленко, ст.наук. співр., доц., канд. техн. наук

Національний університет біоресурсів і природокористування, м. Київ, Україна

e-mail: si.pavlenko17@gmail.com

Виробничі комплекси машин для аерації при компостуванні органічної сировини

Метою досліджень є узагальнення вибору машин і обладнання для забезпечення процесів механізованого компостування на прикладі операції аерації суміші. Методи досліджень: системний аналіз технологічних прийомів, техніко-економічних характеристик засобів для механізованого компостування.

Вибір технічних засобів аерації суміші, що компостується, необхідно проводити з врахуванням періодичності циклу обробітку. Використання вдосконаленого для процесів компостування сировини розкидача органічних добрив (аналог ПРТ-10(7)), причіпних, самохідних аераторів – змішувачів дозволяє зменшити кількість використовуваних технічних засобів в механізованій технології компостування і підвищити економічну ефективність.

виробництво компосту, аерація, механіко-технологічна модель управління, кратність аерації бурту, продуктивність аерації, аератор-змішувач, газообмін стиснутим повітрям

Постановка проблеми. Компостування органічної сировини – важливий фактор сучасної організації виробництва сільськогосподарської продукції. Світові тенденції в аграрному виробництві вказують на суттєві зміни у використанні органічних залишків рослинництва і тваринництва для одержання органічних добрив. Основні виклики – це зменшення обсягів гною через скорочення поголів'я великої рогатої худоби та свиней, підвищення соціальних вимог до екологічного стану оточуючого середовища (запахи, забруднення водоймищ, ґрунтів, наявність патогенної мікрофлори в сировині). Згідно зі статистичними даними, вихід гною на території України з 1991 року до 2018 року зменшився в 8–9,5 разів, а середній обсяг внесення органічних добрив не перевищує 0,28 т/га при потребі від 10 до 12 т/га[1,2]. Одним із варіантів вирішення проблеми є використання більш якісних органічних добрив – компостів на основі органічних залишків рослинництва і тваринництва.

Метою компостування є керування процесами ферментації-розкладу гною, зменшення втрати поживних речовин на основі підтримання раціональних умов і необхідних термінів. Позитивний результат компостування – покращення екологічного стану оточуючого середовища, ресурсозбереження за рахунок використання залишків рослинництва і переробної галузі, зменшення площ для зберігання і накопичення гною та посліду. Узагальнена якість готового компосту з літературних джерел повинна відповідати вимогам: мати дрібно-грудкувату сипку структуру з розмірами часток не більше 60 мм; вологість – 60–70 %; слабо-лужну або нейтральну реакцію середовища – рН 6,0–8,0; вміст органічної речовини – не менше 50 %; співвідношення вуглецю до азоту – 25–30; вміст поживних речовин у легкодоступній для рослин формі – не менше 50 %; у компостах не може бути яєць гельмінтів, патогенної мікрофлори у небезпечних концентраціях, життєздатного насіння бур'янів.

Існує актуальна наукова проблема подальшого підвищення ефективності ресурсозберігаючих механізованих технологій для виробництва компостів на основі обґрунтування технологічних систем і технічних пристроїв.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Механізоване компостування органічної сировини – гною, посліду, низько-товарної продукції рослинництва в аеробних умовах передбачає отримання збалансованих сумішей, які забезпечують стабільні термічні процеси, які відбуваються за рахунок само-розігрівання, на основі ефективного кисневого газообміну. В результаті прискорюються процеси ферментації, зменшуються екологічні ризики, отримуємо органічні добрива-компости з вищою концентрацією поживних речовин в порівнянні з традиційними технологіями.

Компостування органічних залишків сільськогосподарського походження на протязі останніх 60 років – актуальна тематика серед дослідників і вчених.

За останнє десятиліття набули подальшого розвитку технологічні аспекти ферментації сировини [15,16], розроблені і досліджені конструкційні рішення та обґрунтовані параметри робочих органів технічних засобів і пристроїв [3-6], обґрунтована економічна ефективність і перспективність напрямку по виробництва компостів [10,14]. Наукове забезпечення виробництва компостування стає предметом для проведення реальних учбових програм для підготовки фахівців сільського господарства [12]. Дослідження механізованих процесів компостування проводились Лінник М.К., Шевченко І.А., Голубом Г.А., Дідух В.Ф., Сенчук М.М., Ляшенко О.О., результати яких опубліковані в ряді праць [7,8,9,11].

В той же час недостатньо публікацій по практичному виконанню процесів, що стримує впровадження прогресивних технологій і технічних засобів. Із-за значної різниці в сировині, організації виробництва компостів, технічного забезпечення умов виробництва, економічної оцінки, нормативних державних вимог до отримання продукції виникають труднощі по ідентифікації результатів наукових пошуків. Один із аспектів – технічне забезпечення аерації сировини, яке впливає на вибір технічного обладнання і пристроїв.

Постановка завдання. Метою досліджень є узагальнення вибору машин і обладнання для забезпечення процесів механізованого компостування.

Об'єкт дослідження: технологічні процеси і техніко-економічні параметри механізованого компостування в буртах.

Предмет дослідження: визначення технологічних, технічних, організаційних факторів впливу на вибір раціонального складу машин і обладнання.

Виклад основного матеріалу. Системний аналіз – основа для прийняття рішень по вибору технологічних і технічних рішень при компостуванні. Головна стратегічна мета передбачає мотивовану тактику. Покращення екологічного стану оточуючого середовища (рис.1) включає зменшення ризиків забруднення ґрунту, водойм, впливу насіння бур'янів на врожайність, підвищення мікробіологічної безпеки суміші. Відповідні якісні показники – критерії становлять цінність товарної продукції і визначають технологічні прийоми і технічне забезпечення виробництва. При ресурсозбереженні базові критерії – кількість продукції при необхідній якості. Товарна продукція для отримання грибів, проведення вермикомпостування повинна відповідати специфічним вимогам. В залежності від термінів ферментації і обсягів переробки для механізації процесів використовуються мобільні або стаціонарні технічні засоби.

Інженерна задача компостування – формування агрегатних станів із залишків органічної речовини рослинництва і тваринництва до раціональних в короткі терміни за умови забезпечення ветеринарної безпеки. Технологічне завдання (рис.2) – провести балансування суміші по контрольованим параметрам: хімічному складу

(співвідношення C:N, реакція середовища рН), фізичному стану(вологість, агрегатний стан), енергетичне забезпечення(температура), кисневе забезпечення (потреба в кисню). Механізовані процеси включають подрібнення сировини, внесення і розподіл компонентів суміші – механічне змішування, створення формату середовища для збереження тепла і поповнення суміші киснем, переформатуванням складування сировини або заміщення небажаних газів і парів стисненим повітрям. Вибір механіко-технологічної модельної схеми виробництва компостів визначається стратегічною метою, інвестиційними і експлуатаційними складовими необхідних матеріальних і фінансових коштів [10, 14].



Рисунок 1 – Схема виробництва компостів із органічної сировини в аеробних умовах
Джерело: розроблено автором

Критерієм ефективності вибраної механіко-технологічної модельної схеми слугують приведені затрати або енергоємність технологічного циклу виробництва компосту від отримання сировини до його використання за умови забезпечення санітарно-ветеринарних дозволів і термінів виконання операцій. Переваги мають моделі з мінімальними значеннями.

$$\begin{cases} P(M_{\text{сан.-вет.}} \rightarrow \text{norm}, T \rightarrow T_{\text{ном}}, t \rightarrow \text{min}) \rightarrow \text{min}, \\ E(M_{\text{сан.-вет.}} \rightarrow \text{norm}, T \rightarrow T_{\text{ном}}, t \rightarrow \text{min}) \rightarrow \text{min}, \end{cases} \quad (1)$$

де $M_{\text{сан.-вет.}}$ – матриця умов забезпечення санітарно-ветеринарних дозволів;

T – температура суміші;

t – термін виконання операцій;

P – приведені витрати;

E – енергетичні витрати; norm – нормовані значення; min – мінімальне значення.

Аерація сировини повинна забезпечити раціональний газообмін кисню в середовищі суміші. Обробка сировини примусово стисненим повітрям виконується стаціонарними або мобільними вентиляційними установками з системами розподілу. Методика розрахунку обладнання розглядається в роботах [17].

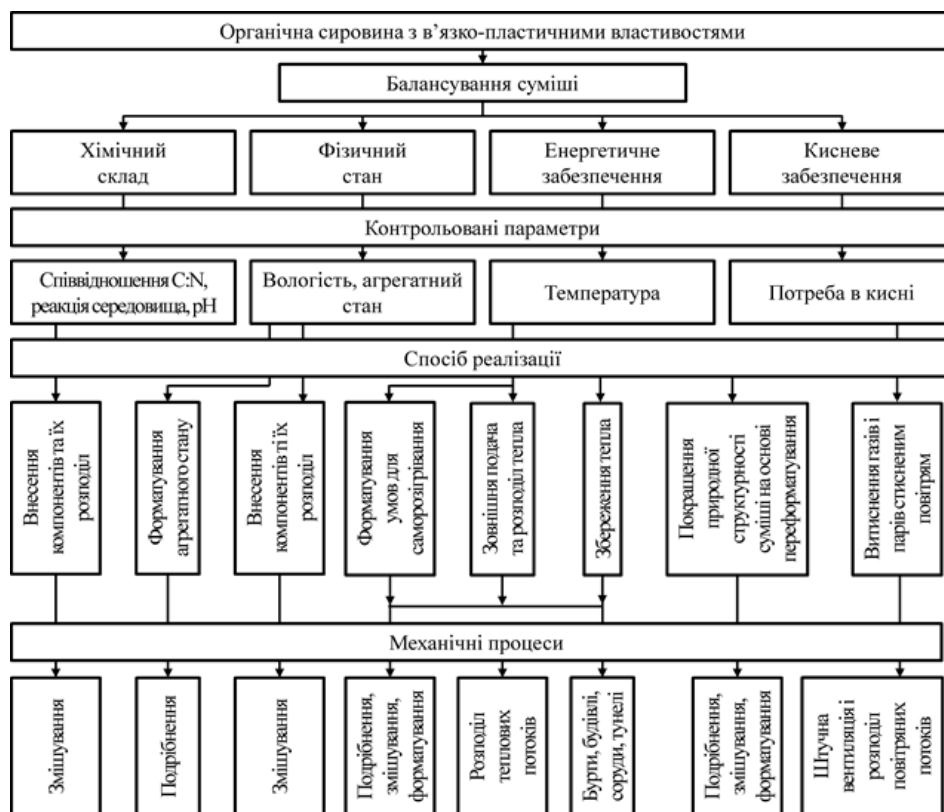


Рисунок 2 – Модельна схема механіко-технологічного управління виробництва компостів з органічної сировини в аеробних умовах

Джерело: розроблено автором

Система працює постійно або управляється спеціальними пристроями. Основні механізовані операції при повітряній аерації: завантаження → переміщення → вивантаження попередньо збалансованих сумішей. Простота обладнання і проведення аерації забезпечує переваги способу. Але висока енергоємність і капіталовкладення, складність створення рівномірного потоку повітря в товщині шару матеріалу, значні непродуктивні втрати повітря, залежність від збалансованості суміші і термінів ферментації, територіальна і об'ємна обмеженість не дозволяє використовувати при значних обсягах органічних відходів і вирішенні екологічних проблем. Тому аерація стаціонарним вентиляційним обладнанням використовується для системного товарного виробництва продукції зі спеціальними властивостями [17].

Інший спосіб проведення аерації – механічна взаємодія робочих органів з сировиною, при якій одночасно відбувається подрібнення і змішування суміші зі збереженням формату зберігання. Особливість механічної аерації – виконання активної аерації в терміни, що забезпечують технологічну послідовність за відповідною кратністю обробки. В залежності від складу сировини: фізичної структури, вологості, термінів ферментації аерація не одноразова операція для технічних засобів механічного типу. Повторюється щоденно або періодично згідно регламенту, що установлює технологічний регламент. Періодичність різна: від одного дня до 5–15 днів

або інший порядок. Вибір технічних засобів аерації стає принциповим для визначення економічної доцільності виробництва компостів.

Продуктивність технічного засобу аерації

$$Q \gg \frac{M}{k}, \quad (2)$$

де k – кількість аерацій за технологічний цикл;

M – обсяг робіт, т/м³

$$k = \frac{D}{[d]}, \quad (3)$$

де D – технологічний цикл компостування, наприклад 45-60 діб;

$[d]$ – допустимий технологічний проміжок між аераціями, $d = 3-10$ діб або інший порядок.

Обсяг робіт визначається як загальна маса сировини, накопиченої на майданчику компостування впродовж технологічного циклу

$$M = D_{об} \cdot D, \quad (4)$$

де $D_{об}$ – добове накопичення залишків.

Якщо сировина видаляється в певні дні тижня, то

$$M = D_{доп} \cdot \frac{D}{7}, \quad (5)$$

де $D_{доп}$ – діб за тиждень, в які видаляється, наприклад, підстилковий гній, накопичений в приміщенні при утриманні тварин в боксах.

Продуктивність агрегату за годину

$$Q_{год} = \frac{M}{k T_{зм} \tau}, \quad (6)$$

де τ – коефіцієнт використання робочого часу зміни;

$T_{зм}$ – час зміни, год.

З урахуванням геометричних параметрів бурту (для трикутного перетину), продуктивність агрегату за годину визначається:

$$Q_{год} = \frac{\gamma abL[d]}{2D} T_{зм} \tau, \quad (7)$$

Де γ – об'ємна маса бурту, кг/м³;

a, b, L – відповідно, ширина, висота та довжина бурту, м.

Таким чином, необхідна продуктивність технічних засобів при аерації прямо пропорційна складу і вологості сировини, від яких залежить об'ємна маса і геометричні параметри буртів. Оскільки коефіцієнт використання робочого часу змінюється завжди менше одиниці, то продуктивність залежить від організованості процесів і технічного стану машин і обладнання.

Розрахунки необхідної продуктивності при обсягах сировини на майданчику 100, 500, 1000, 5000, 10000 тон і кількості діб між аераціями в 3, 5, 10, 15 діб і $T_{зм} = 8$ годин, зведено у таблицю 1 дозволяють вибрати орієнтовну теоретичну продуктивність за обсягами і термінами компостування в залежності від вирішення технологічних задач.

Зменшення терміну між обробкою буртів (таблиці 1, рисунок 3) потребує вищих значень продуктивності для задіяних технічних засобів, за зміну і, відповідно, за годину. Збільшення обсягів переробки в межах необхідного терміну також потребує від технічних засобів вищої продуктивності.

Таблиця 1 – Продуктивність механізмів процесу компостування

Годинна продуктивність, т/год		Обсяг сировини на майданчику, т						
		100	500	1000	3000	5000	10000	20000
Кількість діб між аераціями	3	4,2	20,8	41,7	125,0	208,3	416,7	833,3
	5	2,5	12,5	25,0	75,0	125,0	250,0	500,0
	10	1,3	6,3	12,5	37,5	62,5	125,0	250,0
	15	0,8	4,2	8,3	25,0	41,7	83,3	166,7
	20	0,6	3,1	6,3	18,8	31,3	62,5	125,0

Джерело: розроблено автором

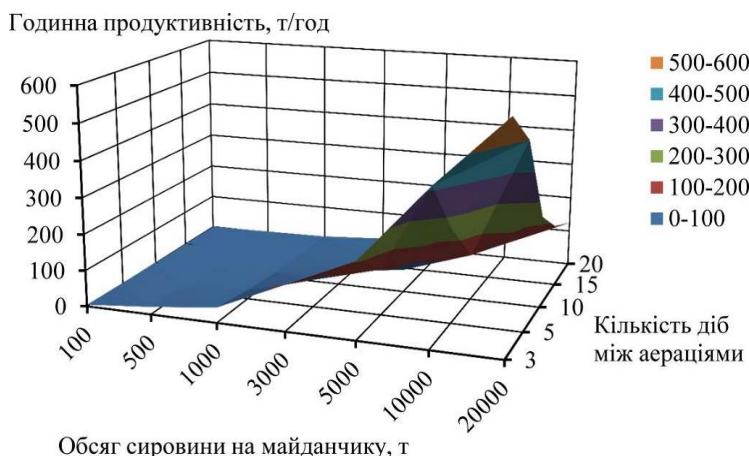


Рисунок 3 – Зміна теоретичної продуктивності мобільними технічними засобами при аерації буртів
Джерело: розроблено автором

Системний аналіз операцій механізованого компостування [10,14] та технічних засобів і пристроїв, рекомендованих до використання при аерації сировини [18], дозволив виділити машини та обладнання за критерієм мінімальної їх кількості для операційного забезпечення технології механізованого компостування (рис.4). Слід виділити універсальний агрегат приготування компостів (рис.4, а). Операційні можливості включають само завантаження причепа маніпулятором, транспортування до місця складування, подрібнення, змішування та формування бурту. Передбачена аерація суміші робочими органами барабанно-лопатевого типу, попередньо завантаженої сировини. Також можливо транспортування готової продукції до місця збереження або використання. Технічна конструкція може виконана на базі розкидача органічних добрив з вдосконаленими конструктивними і режимними параметрами.. Доцільність застосування на фермерських господарствах, орієнтовно, до 500 тон залишків тваринницької і рослинницької продукції на рік. Операційна схема з використанням вдосконаленої конструкції розкидача органічних добрив і завантажувача періодичної дії на рис.4, б і 4, в дозволяють отримувати якісну суміш, аеровану розкидачем або причіпним аератором-змішувачем. Орієнтовно, обсяг переробленої сировини, відповідно, 1500-2500 тон. Особливості механізованого компостування на рис.4, г – багатократна аерація (10-20 разів) підстилкового або безпідстилкового гною (посліду). Модернізований розкидач можливо використовувати для розпушування рулонів і тюків соломи та інших волого-поглинальних матеріалів. При значних обсягах виробництва компостів (рис.4, д) доцільно використовувати самохідні аератори-змішувачі. Технічні засоби управління механізованими операціями виробництва компостів на відкритих майданчиках (рис.4, ж) – навантажувачі безперервної дії з прямим або боковим перевантаженням, що забезпечують аерацію суміші певної вологості, укрупнення буртів, складування готової продукції.

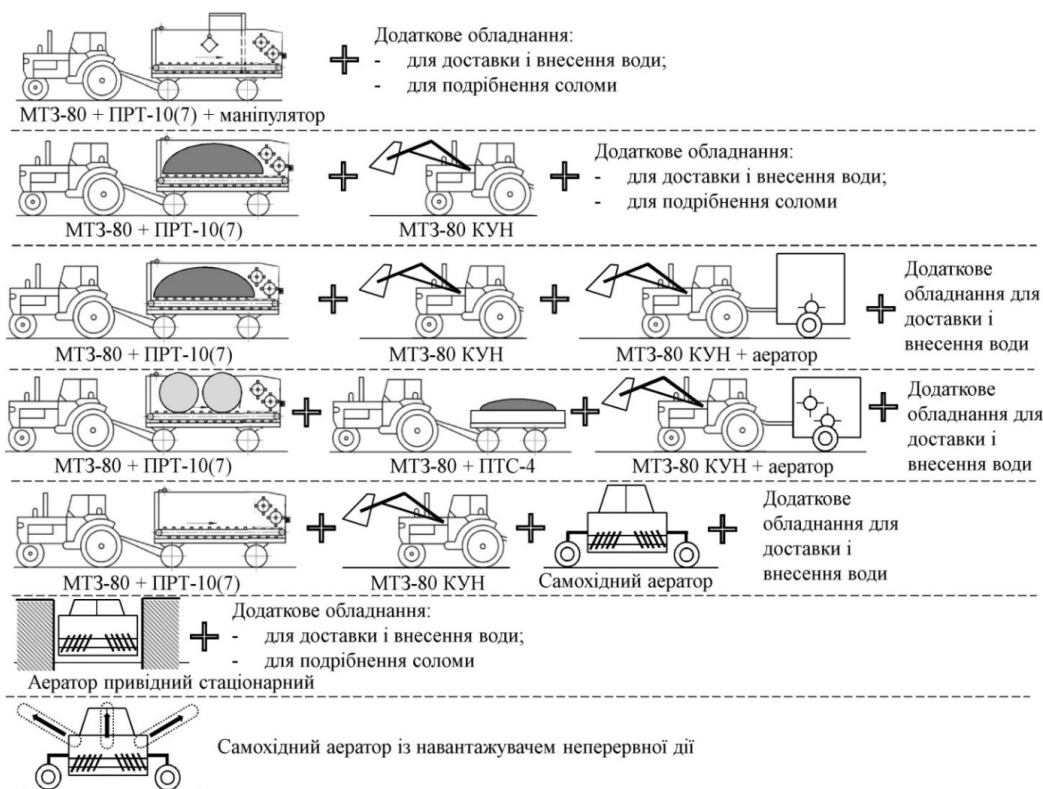


Рисунок 4 – Виробничі комплекси машин механізованого процесу прискореного компостування органічної сировини

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Вибір технічних засобів аерації суміші, що компостується, необхідно проводити з врахуванням періодичності циклу обробітку. Використання вдосконаленого для процесів компостування сировини розкидача органічних добрив (аналог ПРТ-10(7)), причіпних, самохідних аераторів – змішувачів дозволяє зменшити кількість використовуваних технічних засобів в механізованій технології компостування і підвищити економічну ефективність виробництва.

Список літератури

1. Кучерук П., Матвеев Ю. Споживання органічних добрив в Україні. SAF (SustainableAgribusinessForum). 2020. <https://saf.org.ua/news/938/>
2. Павленко С.І., Дудін В.Ю., Акименко Р.М. Моніторинг ринку та технічних засобів виробництва твердих органічних добрив. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2016. 170: 34–45.
3. Павленко С.І. Обґрунтування механізованих процесів для прискореного компостування на базі розкидачів органічних добрив. *Праці Таврійського державного агротехнічного університету*. 2016. 16, 2. С.196–210.
4. Антоненко С. С., Антоненко А. С., Писаренко В. М. Органічне землеробство: з досвіду ПП «Агроекологія» Шишацького району Полтавської області. Полтава, 2010. 198 с.
5. Ляшенко О. О., Мовсесов Г. Є. Технологія прискореного біотермічного компостування гною з органічними волого-поглинальними відходами АПК. Рекомендації. Інститут механізації тваринництва УААН, 2007. 32 с.
6. Лінник М. К., Рубан Б. О. Шляхи вдосконалення технологій та технічних засобів переробки органічних відходів тваринництва та птахівництва в органічні добрива. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2011. Вип. 11 (5). С. 10–16.
7. Лінник М.К., Сенчук М.М. Технології і технічні засоби виробництва та використання органічних добрив. К.: Ніжин, 2012. 329с.

8. Aliiev E., Pavlenko S., Aliieva O., Morhun O. Accelerated biothermal composting of manure-compost mixture. *Agraarteadus, Journal of Agricultural Science*. 2021. XXXII (2): 169–181. DOI: 10.15159/jas.21.30
9. Aliiev E., Pavlenko S., Golub G., Bielka O. Research of mechanized process of organic wastecomposting. *Agraarteadus, Journal of Agricultural Science*. 2022. XXXIII (1): 21–32. DOI: 10.15159/jas.22.04
10. Бондаренко А.М., Качанова Л.С. К вопросу применения системного подхода в обосновании технологий производства и использования удобрений. *Стан і перспективи розвитку економічних відносин в сучасних умовах господарювання: матеріали II Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції*. Сімферополь: ДІАЙП, 2013. С. 8–11.
11. Павленко С.І. Вплив технологічних факторів на процеси компостування. *Механізація електрифікація сільського господарства: загальнодерж. зб. ННЦ ІМЕСГ*. 2017. 6 (105): 144–153.
12. Сенчук М.М. Технологічне проектування в органічному виробництві: навч.-метод. посіб. для самостійної роботи та практичних занять студ. агробіотехнологічного факультету. Біла Церква : БНАУ, 2020. 94с.
13. Дідух В.Ф. Техніка і технології приготування компостів. *Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практика: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*, 29–30 вересня 2022, С. 11–15.
14. Бондаренко А.М., Качанова Л.С. Перспективная технология переработки навоза животноводческих предприятий в высококачественные органические удобрения. *Кримський агротехнологічний університет: наук. праці Південного філіалу Національного університету біоресурсів і природокористування*. 2014. Вип. 141. С. 175–182.
15. Haga K. Sustainable Recycling of Livestock Wastes by Composting and Environmentally Friendly Control of Wastewater and Odors. *Journal of Environmental Science and Engineering B*, 2021. 10: 163–178. DOI:10.17265/2162-5263/2021.05.001
16. Pergola M., Piccolo A., Palese A.M., Ingrao C., Di Meo, V. Celano G. A combined assessment of the energy, economic and environmental issues associated with on-farm manure composting processes. *Two case studies in South of Italy. Journal of Cleaner Production*, 2018. 172: 3969–3981. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.04.111
17. Голуб Г.А. Агропромислове виробництво їстівних грибів. *Механіко-технологічні основи: монографія*. Аграрна наука, 2007. 332с.
18. Шевченко І. А., Харитонов В. І., Алієв Е. Б. Результати експериментальних досліджень змішувача-аератора компостів. *Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві : зб. наук. праць ІМТ НААН*. 2011. Вип. 2(8). С. 80–88.

Referencis

1. Kucheruk, P. & Matveev, Y. (2020). Consumption of organic fertilizers in Ukraine. SAF (Sustainable Agribusiness Forum). Retrieved from <https://saf.org.ua/news/938/> [in Ukrainian].
2. Pavlenko, S. I., Dudin, V. Y. & Akimenko, R. M. (2016). Monitoring of the market and technical means for the production of solid organic fertilizers. *Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasylenko. Issue 170*, 34–45 [in Ukrainian].
3. Pavlenko, S. I. (2016). Substantiation of mechanized processes for accelerated composting on the basis of organic fertilizer spreaders. *Proceedings of the Tavria State Agrotechnical University. 16, 2*, 196–210 [in Ukrainian].
4. Antonets, S. S., Antonets, A. S. & Pysarenko, V. M. (2010). Organic farming: from the experience of PE "Agroecology" of the Shyshaky district of the Poltava region. Poltava [in Ukrainian].
5. Lyashenko, O. O. & Movsesov, G. E. (2007). Technology of accelerated biothermal composting of manure with organic moisture-absorbing waste of the agro-industrial complex. Recommendations. Institute of Mechanization of Animal Husbandry of the Ukrainian Academy of Agrarian Sciences [in Ukrainian].
6. Linnick, M. K. & Ruban, B. O. (2011). Ways to improve technologies and technical means of processing organic waste from livestock and poultry farming into organic fertilizers. *Proceedings of the Tavria State Agrotechnological University, 11 (5)*, 10–16 [in Ukrainian].
7. Linyk, M.K. & Senchuk, M.M. (2012). Technologies and technical means of production and use of organic fertilizers. Kyiv: Nijyn [in Ukrainian].
8. Aliiev, E., Pavlenko, S., Aliieva, O. & Morhun, O. (2021). Accelerated biothermal composting of manure-compost mixture. *Agraarteadus, Journal of Agricultural Science, XXXII (2)*, 169–181. DOI: 10.15159/jas.21.30

9. Aliiev, E., Pavlenko, S., Golub, G., Bielka, O. (2022). Research of mechanized process of organic waste composting. *Agraarteadus, Journal of Agricultural Science, 2022, XXXIII (1)*, 21–32. DOI: 10.15159/jas.22.04
10. Bondarenko, A.M. (2013). On the issue of application of the system approach in the substantiation of production and fertilizer technologies [in Russian].
11. Pavlenko, S. I. (2017). Influence of technological factors on composting processes. *Mechanization, electrification of agriculture. National Collection. NSC IMESG. 6 (105)*, 144–153 [in Ukrainian].
12. Senchuk, M. M. (2020). Technological Design in Organic Production: Educational and Methodological Manual for Independent Work and Practical Classes of Students of the Faculty of Agrobiotechnology. Bila Tserkva: BNAU [in Ukrainian].
13. Didukh, V. F. (2022). Compost preparation techniques and technologies. Processes, Machines and Equipment of Agro-Industrial Production: Problems of Theory and Practice : *International Scientific and Practical Conference (September 29–30, 2022)*: 11–15 [in Ukrainian].
14. Bondarenko, A.M. & Kachanova, L.S. (2014). A promising technology for processing manure from livestock enterprises into high-quality organic fertilizers. *Crimean Agrotechnological University : Scientific works of the Southern Branch of the National University of Life and Environmental Sciences . Vol. 141*, 175–182. (in Russian).
15. Haga K. (2021). Sustainable Recycling of Livestock Wastes by Composting and Environmentally Friendly Control of Wastewater and Odors. *Journal of Environmental Science and Engineering B, 10*, 163–178. DOI:10.17265/2162-5263/2021.05.001
16. Pergola M., Piccolo A., Palese A.M., Ingrao C., Di Meo, V. & Celano G. (2018). A combined assessment of the energy, economic and environmental issues associated with on-farm manure composting processes: Two case studies in South of Italy. *Journal of Cleaner Production, 172*, 3969–3981. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.04.111
17. Golub, G. A. (2007). *Agro-industrial production of edible mushrooms. Mechanical and Technological Fundamentals*. Agrarian Science [in Ukrainian].
18. Shevchenko, I.A., Kharitonov, V.I. & Aliyev, E.B. (2011). Results of experimental studies of the compost mixer-aerator. *Mechanization, Ecologization and Conversion of Bioraw Materials in Animal Husbandry : Coll. Sciences. Proceedings of BMI NAAS , Issue 2(8)*, 80–88 [in Ukrainian].

Sergiy Pavlenko, Senior Researcher, Assoc. Professor, Ph.D tech. sci.
National University of Bioresources and Nature Management, Kyiv, Ukraine

Production Complexes of Machines for Aeration During Composting of Organic Raw Materials

The purpose of the research is to generalize the selection of machines and equipment to ensure mechanized composting processes using the example of the mixture aeration operation. Research methods: systematic analysis of technological methods, technical and economic characteristics of means for mechanized composting.

The organizational factors influencing the choice of mobile technical means and stationary equipment in the production of composts are determined. A mechano-technological model scheme was developed, which determines the possible options for choosing equipment. The selection efficiency criteria are the costs and energy intensity of the technological cycle from obtaining raw materials to use, subject to the provision of sanitary and veterinary permits and the terms of operations. Benefits have results with minimum values. Considered methods of aeration with forced compressed air and mobile devices of mechanical action. Advantages and disadvantages are defined. Calculations of the theoretical productivity of mobile aerators - mixers were carried out, taking into account the volume of raw materials and the periodicity of processing. Options for choosing technical solutions with a minimum number of technical means are offered.

The choice of technical means of aeration of the compostable mixture must be carried out taking into account the periodicity of the processing cycle. The use of an organic fertilizer spreader (similar to PRT-10(7)), trailed, self-propelled aerators - mixers, improved for the processes of composting raw materials, allows to reduce the number of technical means used in mechanized composting technology and increase economic efficiency.

compost production, aeration, mechanical-technological control model, multiplicity of side aeration, aeration productivity, aerator-mixer, gas exchange with compressed air

Одержано (Received) 22.08.2023

Прорецензовано (Reviewed) 15.09.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

УДК 631.3

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.76-84](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.76-84)

А.М. Пугач, проф., д-р наук з держ. упр., О.А. Черній, ст. вик, Є.В. Калганков, ст. викл.

*Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна
e-mail: sanek20.1984@gmail.com*

Дослідження ефекту релаксації напруження та залишкової деформації сучасних полімерних матеріалів для захисту поверхонь деталей від зношування

Метою роботи є дослідження на релаксацію напруження при стиску та визначення залишкової деформації полімерних матеріалів, які використовуються в сучасному машинобудуванні для виготовлення захисних покриттів деталей машин. Експериментальні дослідження проводились на лабораторній установці ДМ-30М. В процесі випробування було визначено залежність падіння напруження в стиснених зразках матеріалів від часу, швидкість релаксації напруження, величину падіння напруження до рівноважного значення, рівноважний модуль, а також залишкову деформацію після зняття навантаження.
гума, термопластичний поліуретан, релаксація напруження, залишкова деформація

Постановка проблеми. Широка область застосування гуми та можливість використання вже розробленого математичного апарату дали змогу проводити коло теоретичних та експериментальних досліджень та створили необхідні передумови для розвитку подальших розробок в області вивчення гуми як пружно-спадкового матеріалу. При розгляді в'язко-пружних властивостей гуми характерними є два підходи: фізичний (мікроскопічний) та феноменологічний. Кінцевою метою в загальному випадку є побудова аналітичних залежностей між напруженням та деформацією з врахуванням впливу фактора часу та передісторії навантаження на деформований стан системи. Розробці математичного апарату теорії в'язко-пружності присвячено багато наукових праць. Найбільшого застосування для вирішення практичних задач отримали моделі Фохта-Кельвіна (в цій моделі пружня та в'язкісна складові системи розміщені паралельно) та модель Максвелла (розміщення пружної та в'язкісної складових послідовне).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Поведінку в'язко-пружного конструкційного матеріалу при сталій його деформації досліджено в численних наукових працях. Результати досліджень на релаксацію мало- та середньонаповнених гум висвітлено в монографії професора Дирди В.І. [1]. Експериментально встановлено, що на протікання релаксаційних процесів в гумах мають суттєвий вплив такі фактори як старіння гуми при дії циклічних навантажень, радіаційне опромінення, ефекти на торцях, дія агресивного середовища тощо. Так встановлено, що опромінення зразків гуми до 200 Мрад, зменшує релаксаційні процеси в гумі та зсуває по шкалі частот пік релаксаційного спектру. При дослідженні віброізоляторів типу БРМ101 що виготовлені з гуми 1562, встановлено, що зі збільшенням часу їх втоми до 32 000 годин відмічається зміна часу релаксації напруження в гумі, модуль зсуву збільшується до величин при яких зароджуються магістральні тріщини в матеріалі. Вплив температури на релаксаційні процеси висвітлено в праці [3]. Встановлено, що зі зменшенням

температури змінюється швидкість та час релаксаційних процесів в дослідних зразках гуми. В роботі [4] досліджувались зміни реологічних параметрів гуми, що використовується для футерування барабанів кульових млинів, при дії агресивного середовища. Встановлено, що лужне середовище з взаємодією з високою температурою, призводять до суттєвих змін реологічних характеристик гум.

Дослідження на релаксацію нітрил-бутадієнових гум при температурному старінні наведено в статті [5]. Встановлено, що зі збільшенням часу тримання зразків при температурах 40° С, 50° С, 60° С, еластичність гуми деградує, а залишкова деформація зразків після випробувань має тенденцію до збільшення. Запропонований метод суперпозиції температури, часу та деформації (time-temperature-strainsuperpositionprinciple (TTSSP-R)), що враховує ефект релаксації напруження, дає змогу зменшити час з 30 днів до 10 днів на проведення прискорених випробувань на старіння нітрил-бутадієнових гум.

Експериментальні дослідження вулканізованих гум на релаксацію, та розподіл напружень в дослідному зразку представлено в праці [6]. Встановлено, що при стисканні гумового зразка найбільші напруження стиску та зсуву проявляються в місцях контакту гуми з металевими пластинами. Також приведено динаміку релаксаційних процесів в дослідних зразках в різних точках їх поперечних перерізів.

Залежності зміни показників релаксації напруження від часу при дослідженні гуми з вмістом технічного вуглецю N550 15, 30 та 45 масових частин, представлені в роботі [7]. Експериментально встановлено, що зі збільшенням вмісту технічного вуглецю швидкість релаксації напруження зростає, напруження стиску при відносних деформаціях 18%, 33%, 48%, також мають тенденцію до росту. Модуль пружності стиску гумових зразків збільшується зі збільшенням вмісту технічного вуглецю в гумі.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження на релаксацію напруження та визначення залишкової деформації сучасних в'язко-пружних матеріалів, що використовуються для захисту робочих поверхонь деталей машин від зношування. Автори вже досліджували представлені матеріали на опір абразивному зношуванню. Результати представлено в статті [8].

Виклад основного матеріалу. Для паралельного з'єднання пружного та в'язкого елементів (модель Фохта-Кельвіна), зв'язок між напруженням та деформацією має вигляд $\sigma = E(\varepsilon + \tau\dot{\varepsilon})$, де ε – відносна деформація, $\dot{\varepsilon}$ – швидкість деформації, $\tau = \frac{3\eta}{E}$ – час запізнювання деформації, η – коефіцієнт в'язкості. В стані спокою це середовище поводить себе як пружне ($\varepsilon = 0$). При постійній деформації ($\varepsilon = \text{const}$) напруження в ньому залишаються незмінними ($\sigma = E\varepsilon$). Якщо в початковий момент часу $t = 0$ середовищу задати постійне напруження ($\sigma = \text{const}$), то деформація буде поступово зростати по закону

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right], \quad (1)$$

де σ_0 – початкове напруження.

Для релаксуючого середовища Максвелла, якщо діюче напруження постійне ($\sigma = \text{const} = \sigma_0$), то в початковий період часу $t = 0$ система отримає миттєву пружну деформацію σ_0/E й надалі деформація буде протікати з постійною швидкістю. Якщо деформація незмінна в часі (наприклад, гумовий зразок стиснутий або розтягнений й кінці його зафіксовані), то при $t = 0$ та $\varepsilon = \text{const}$ напруження буде зменшуватись за законом релаксації (падіння) напруження при постійній деформації

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2)$$

де τ – час релаксації

Така модель задовільно описує якісний процес релаксації напруження ряду матеріалів, деформація яких відбувається з постійною швидкістю.

На сьогодні, для опису поведінки в'язко-пружних систем використовуються представлені моделі, але результати експериментальних досліджень вказують на те, що не завжди теоретичні дані розраховані по вказаним закономірностям гармонізуються з експериментальними. Тому на практиці при вирішенні задач динаміки машин, доволі часто використовують умовні аналоги в'язко-пружних моделей, вводячи в структурну схему еквівалентні коефіцієнти в'язкості, знайдені експериментальним шляхом, що описують поведінку конкретної досліджуваної системи.

Так, використовуючи ряди Проні, пропонується визначати в'язко-пружні реакції системи за залежністю

$$\sigma(t) = Y(t) \cdot \varepsilon_0, \quad (3)$$

де $\sigma(t)$ – напруження, що змінюється в часі, ε_0 – пікова деформація, $Y(t)$ – функція релаксації, що визначається

$$Y(t) = E_0 \left(1 - \sum_{i=1}^n p_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \right). \quad (4)$$

Функції релаксації в початковий момент часу ($t=0$) та в повній стадії релаксації ($t=\infty$) мають вигляд

$$\begin{aligned} Y(t=0) &= E_0, \\ Y(t=\infty) &= E_0 \left(1 - \sum_{i=1}^n p_i \right), \end{aligned} \quad (5)$$

де p_i – постійна Проні (визначається дослідним шляхом);

τ_i – постійна часу запізнювання (визначається дослідним шляхом);

E_0 – миттєвий модуль пружності.

Намагання більш повніше описати механічну поведінку в'язко-пружних матеріалів призвело до створення багаточисленних реологічних моделей, що являють собою, по своїй сутності, комбінацію пружних та в'язких елементів.

Релаксація напруження гуми представляє собою складний механохімічний процес, що призводить до зміни в часі напруження при заданій деформації. Визначення релаксації напруження при осьовому стисканні регламентовано міжнародними стандартами ASTM D6147, ISO 3384.

Експериментальні дослідження проводились по методикам відповідно до стандартів: ISO 3384 «Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of stress relaxation in compression — Part 1: Testing at constant temperature» [9], ДСТУ ISO 815-1:2019 (ISO 815-1:2014, IDT) «Гума вулканізована чи термопластична. Визначення залишкової деформації після стискання. Частина 1. Випробування за стандартної чи підвищеної температури [10].

Для проведення експериментальних досліджень, було підготовлено ряд зразків з сучасних полімерних матеріалів призначених для захисту поверхонь деталей машин від зношування. Такими матеріалами були: термопластичний поліуретан виробництва фірми «Covestro» з торговим найменуванням «Desmopan» (рис. 1,а), футеровочна гума виробництва ТОВ «Валса-ГТВ». Також, для дослідження впливу зміни реологічних характеристик гуми при експлуатації, на випробування були представлені зразки (рис. 1,б) футерувальної гуми, які вирізані з футерувальних плит кульового млина з завантаженими металевими кулями діаметром 100 мм. Напрацювання футеровки

становить 9300 годин. Форма зразків є циліндричною з діаметром $13 \pm 0,5$ мм, висотою $6,3 \pm 0,3$ мм. Механічні властивості досліджуваних матеріалів наступні: твердість по Шору гуми 66 од., «Desmoran» – 92 од. [2]; густина гуми $1,200 \text{ г/см}^3$, «Desmoran» – $1,240 \text{ г/см}^3$.

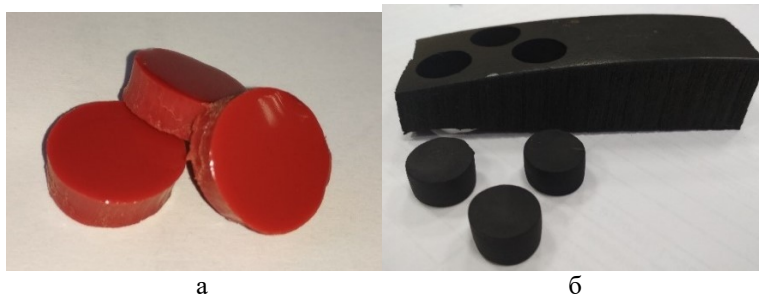


Рисунок 1 – Дослідні зразки: а– з термопластичного поліуретану «Desmoran»; б– зразки футерувальної гуми, які вирізані з фрагменту футерувальної плити кульового млина з завантаженими металевими кулями діаметром 100 мм. Напрацювання футеровки становить 9300 годин роботи

Джерело: розроблено авторами

Експериментальні дослідження проводились з використанням лабораторного обладнання. За основу взято ручний прес ДМ-30М (рис. 2,а) з вмонтованим кільцевим динамометром та максимальною силою стиску 20кН. На столі пресу закріплено пристосування ДМ-22М (рис. 2,б). На стержень центрального болта 8 (рис. 3) пристосування наклеєно чотири тензодатчика, які з'єднані за мостовою схемою. Сигнали від тензодатчиків подаються на вимірювальну апаратуру. Точність вимірювання сили стискування становить 1 Н. Схема встановлення дослідних зразків показано на рис. 3. Деформація стиску зразків фіксувалась індикаторами годинникового типу ІЧ-10 з точністю 0,01 мм. Шорсткість поверхонь пластин стискування відповідала значенню $Ra 0,4$. Зразки еластомеру стискалися болтом та гайкою пристрою до значення відносної деформації 40 % (рис. 4). Визначення релаксації напруження проводили шляхом вимірювання напружень в стержні стяжного болта через встановлені відрізки часу. Перше вимірювання проводили через 30с після стиску. Послідуючі виміри проводили через 10, 15, 60, 100, 150 хв і так поки вимірюване значення напруження досягне рівноважного значення. Загальна тривалість експерименту становила $24 \pm 0,5$ години. Температура дослідних зразків становила 22 ± 1 °С. Після випробування на релаксацію, дослідні зразки розвантажувались та витримувались при стандартній температурі протягом 30 ± 3 хв. Потім проводились заміри залишкової висоти зразка мікрометром з точністю 0,01 мм. При цьому вимірювальний тиск дії п'яток мікрометра на поверхню зразків не перевищував 0,01 МПа.

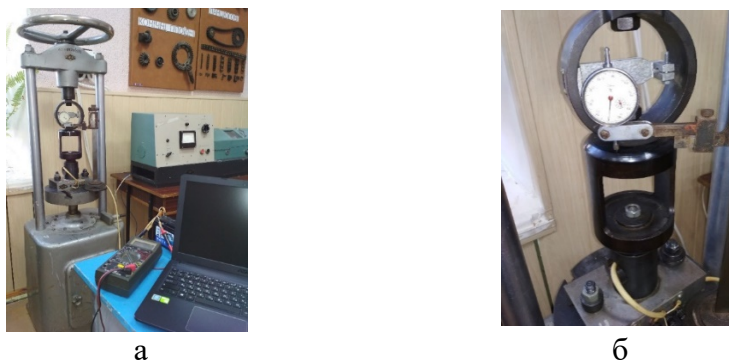
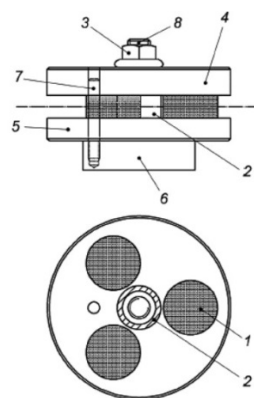


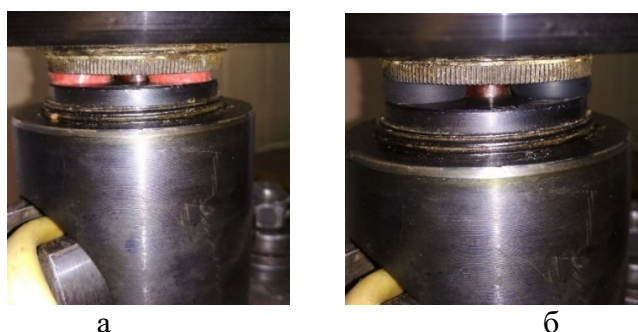
Рисунок 2 – Загальний вигляд дослідної установки: а- вид установки; б- вигляд пресу збільшений
Джерело: розроблено авторами



1-дослідні зразки, 2-дистанційна втулка, 3-гайка, 4- верхня пластина, 5- нижня пластина, 6-основа, 7-направляючий штифт, 8-болт стиску з наклеєними тензодатчиками

Рисунок 3 – Схема дослідної установки

Джерело: розроблено на підставі [10]



а– вид стиснутих зразків термопластичного поліуретану «Desmoran»;
б– вид стиснутих зразків футерувальної гуми

Рисунок 4 – Загальний вигляд стиснутих дослідних зразків з відносною деформацією 40%

Джерело: розроблено авторами

Показниками випробування являються наступні величини:

- а) швидкість релаксації напруження;
- б) величина падіння напруження до рівноважного значення (під рівноважним значенням напруження розуміється напруження, яке зберігається постійним при двох послідовних вимірюваннях);
- в) рівноважний модуль.

Напруження при заданій деформації в МПа (σ_t) визначають по формулі:

$$\sigma_t = \frac{F}{S}, \quad (6)$$

де F – навантаження, яке прикладається до випробуваних зразків, Н;
 S – площа поперечного перерізу зразка до початку випробування, мм².

Швидкість релаксації напруження характеризується величиною K та визначається по формулі:

$$K = \frac{\sigma_{t_1} - \sigma_{t_2}}{\sigma_3 (\lg t_1 - \lg t_2)}, \quad (7)$$

де σ_3 – напруження через 3 хв. після стискання зразків, МПа;
 σ_{t_1} – напруження через час t_1 хв. після стискання зразків, МПа;
 σ_{t_2} – напруження через час t_2 хв. після стискання зразків, МПа;

Для зручності обчислення K , були обрані такі часові точки: $t_1 = 10$ хв та $t_2 = 100$ хв, тоді різниця $\lg t_1 - \lg t_2 = 1$ та формула прийме вигляд:

$$K = \frac{\sigma_{10} - \sigma_{100}}{\sigma_3}, \quad (8)$$

де σ_{10} – напруження через 10 хв після стискання зразків, МПа;

σ_{100} – напруження через 100 хв після стискання зразків, МПа;

Величина падіння напруження до рівноважного значення (Δ) визначається по формулі:

$$\Delta = \frac{\sigma_3 - \sigma_{\text{рівн}}}{\sigma_3} \cdot 100, \quad (9)$$

де $\sigma_{\text{рівн}}$ – рівноважне напруження в зразках, МПа;

Рівноважний модуль в МПа ($E_{\text{рівн}}$) визначається по формулі:

$$E_{\text{рівн}} = \frac{\sigma_t}{\varepsilon}, \quad (10)$$

де ε – відносна деформація зразка, що визначається по формулі:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0}, \quad (11)$$

де h_0 – початкова висота зразка, мм;

h_1 – висота стисненого зразка, мм.

При визначенні залишкової деформації після стискання дослідних зразків користувались формулою:

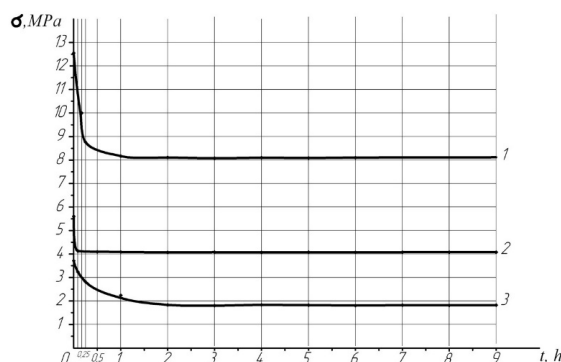
$$\delta = \frac{h_0 - h_a}{h_0 - h_s} \cdot 100, \quad (12)$$

де h_0 – початкова висота зразка, мм;

h_a – висота зразка після відновлення, мм;

h_s – висота зразка у стисненому стані, мм.

Дослідні залежності зміни напруження в випробуваних зразках при їх відносній деформації 40% від часу, представлено на рис. 5. На графіку представлено лише перші 9 годин випробування, так як в подальшому напруження в зразках змінювалось несуттєво.



1 - темнопластичний поліуретан «Desmoran»; 2- футерувальна гума з напрацюванням 9300 год.;

3- футерувальна гума (нова)

Рисунок 5 – Експериментальні залежності релаксації напруження в залежності від часу (год)

Джерело: розроблено авторами

Використовуючі математичні залежності наведені раніше, оброблено експериментальні дані. Визначено значення таких параметрів як: швидкість релаксації

напруження, K ; величину падіння напруження до рівноважного значення, Δ , %; рівноважний модуль, $E_{\text{рівн}}$, МПа; залишкову деформацію після стискання, δ , %. Результати представлено в таблиці 1.

Експериментально встановлено, що найбільша швидкість релаксації напруження ($K=0,26$) відбувалась в зразках нової футерувальної гуми. Найменша її величина ($K=0,02$) відповідає зразкам футерувальної гуми з напрацюванням 9300 год. Такою є тенденція в значеннях величини падіння напруження до рівноважного значення. В новій гуми $\Delta=62\%$, в гуми з напрацюванням – $\Delta=33,4\%$.

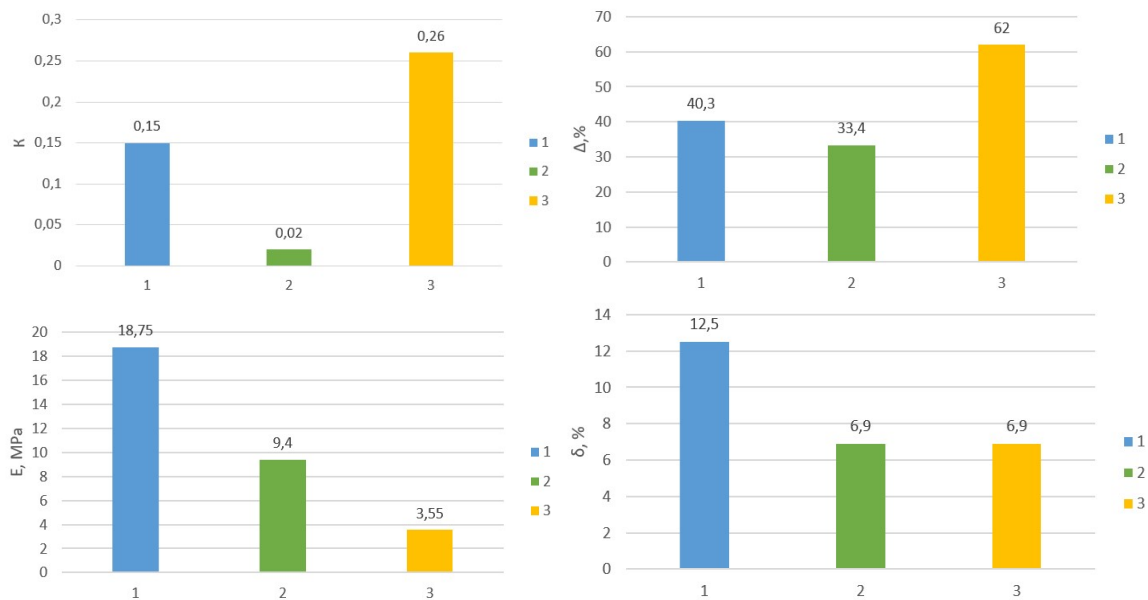
Таблиця 1 – Показники випробування дослідних матеріалів

Вид дослідного матеріалу	Показники випробування			
	Швидкість релаксації напруження, K	Величина падіння напруження до рівноважного значення, Δ , %	Рівноважний модуль, $E_{\text{рівн}}$, МПа	Залишкова деформація після стискання, δ , %
1. Термопластичний поліуретан «Desmoran»	0,15	40,3	18,75	12,5
2. Футерувальна гума з напрацюванням 9300 год	0,02	33,4	9,4	6,9
3. Футерувальна гума (нова)	0,26	62,0	3,55	6,9

Джерело: розроблено авторами

Термопластичний поліуретан «Desmoran» має найбільше значення рівноважного модуля пружності при стиску з відносною деформацією 40 % $E_{\text{рівн}}=18,75$ МПа. Найменше значення $E_{\text{рівн}}=3,55$ МПа, зафіксоване в зразках нової футерувальної гуми.

Залишкова деформація є найбільшою в зразках з термопластичного поліуретану «Desmoran» – $\delta=12,5\%$. В зразках футерувальних гум мала рівне значення $\delta=6,9\%$.



1 - термопластичний поліуретан «Desmoran»; 2- футерувальна гума з напрацюванням 9300 год.; 3- футерувальна гума (нова).

Рисунок 6– Експериментальні діаграми зміни показників випробування дослідних зразків
Джерело: розроблено авторами

Висновки. Проведено дослідження ефекту релаксації напруження та залишкової деформації сучасних полімерних матеріалів для захисту поверхонь деталей від

зношування. При сталій відносній деформації 40% термопластичний поліуретан «Desmopan» характеризується меншою схильністю до релаксації напруження, більшим модулем пружності при стиску ніж футерувальні гуми, але має більшу залишкову деформацію після розвантаження. Футерувальна гума, при порівнянні зразків з нової гуми та з напрацюванням близько 9300 годин в важких умовах роботи, показала себе як матеріал який схильний до внутрішніх структурних перетворень зі збільшенням часу сприйняття навантажень. Ці перетворення спричинюють зміну показників релаксаційних процесів: знижується швидкість релаксації напруження, зменшується величина падіння напруження до рівноважного стану, при одночасному підвищенні модуля пружності. Результати дослідження можуть бути використані при виборі матеріалу та розрахунках деталей з еластомерів захисних покриттів на роботоздатність та надійність.

Список літератури

1. Прикладная механика упругонаследственных сред: В 3-х томах. Т.2. Методы расчета эластомерных деталей / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, Е.Л. Звягильский, А.С. Кобец. Киев: Наук. думка, 2012. 616 с.
2. Desmopan® – Thermoplastic Polyurethane. URL: www.covestro.com. (дата звернення 06.08.2023).
3. Dyrda V.I., Lysytsia M.I., Lapin V.A., Ahaltsov H.M., Kalhankov Ye.V., Tolstenko O.V., Chernii O.A. Dynamics of heavy vibrating machines taking into account instability in time of their parameters. *News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences*. 2020, Vol. 6, No 444. P. 68 – 74. doi.org/10.32014/2020.2518-170X.132.
4. Bulat A.F., Dyrda V.I., Kalhankov Y.V. Synergetic model of the wave abrasive-fatigue wear of rubber lining in the ball-tube mills. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2018. (5). 39–47. doi:10.29202/nvngu/2018-5/5.
5. Peng Q., Zhu Z., Jiang C., Jiang H. Effect of stress relaxation on accelerated physical aging of hydrogenated nitrile butadiene rubber using time-temperature-strain superposition principle. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2019. 2(2). 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.03.002>.
6. Sukcharoen K., Noraphaiphaksa,N., Hasap A., Kanchanomai C. Experimental and Numerical Evaluations of Localized Stress Relaxation for Vulcanized Rubber. *Polymers*. 2022. 14(5). P.873. <https://doi.org/10.3390/polym14050873>.
7. Guzmán Sánchez M. A. Comparative study of stress relaxation phenomenological constitutive modeling of carbon black-reinforced natural rubber-based compounds. *DYNA*. 2021. 88(216). 55–61. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n216.89446>.
8. Экспериментальные исследования абразивного износа современных материалов для футерования рабочих поверхностей машин / В.И. Дырда и др. *Міжвідомчий збірник наукових праць інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАНУ. Геотехнічна механіка*. 2020. Вип. 151. С. 150- 56. DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2020.151.150>.
9. ISO 3384 «Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of stress relaxation in compression – Part 1: Testing at constant temperature».
10. ДСТУ ISO 815-1:2019 (ISO 815-1:2014, IDT) «Гума вулканізована чи термопластична. Визначення залишкової деформації післястискання. Частина 1. Випробування за стандартної чи підвищеної температури. [Чинний з 01.09.2019] . Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2019. 14 с.

References

1. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Zviagilskii, E.L. & Kobets, A.S. (2012), *Prikladnaya mekhanika uprugonasledstvennykh sred. Tom 2. Metody rascheta elastomernykh detalei [Applied mechanics of elastic-hereditary media. Vol. 2. Design techniques of elastomeric parts]*. Kyiv : Naukova dumka [in Russian].
2. Desmopan® – Thermoplastic Polyurethane (2023). Retrieved from www.covestro.com. [in English].
3. Dyrda, V.I., Lysytsia, M.I., Lapin, V.A., Ahaltsov, H.M., Kalhankov, Ye.V., Tolstenko, O.V. & Chernii, O.A. (2020). Dynamics of heavy vibrating machines taking into account instability in time of their parameters. *News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences, Vol.6, N 444* , 68 – 74. doi.org/10.32014/2020.2518-170X.132 [in English].

4. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., & Kalhankov, Y.V. (2018). Synergetic model of the wave abrasive-fatigue wear of rubber lining in the ball-tube mills. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 39–47. doi:10.29202/nvngu/2018-5/5 [in English].
5. Peng, Q., Zhu, Z., Jiang, C., & Jiang, H. (2019). Effect of stress relaxation on accelerated physical aging of hydrogenated nitrile butadiene rubber using time-temperature-strain superposition principle. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2(2), 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.03.002> [in English].
6. Sukcharoen, K., Noraphaiphaksa, N., Hasap, A., & Kanchanomai, C. (2022). Experimental and Numerical Evaluations of Localized Stress Relaxation for Vulcanized Rubber. *Polymers*, 14(5), 873. <https://doi.org/10.3390/polym14050873> [in English].
7. Guzmán Sánchez, M. A. (2021). Comparative study of stress relaxation phenomenological constitutive modeling of carbon black-reinforced natural rubber-based compounds. *DYNA*, 88(216), 55–61. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n216.89446> [in English].
8. Dyrda, V. I., Cherniy, O.A., Kalhankov, YE.V., Tolstenko, O.V., Filipenko, O.M. (2020) Eksperimentalnyye issledovaniya abrazivnogo iznosa sovremennykh materialov dlya futerovaniya rabochikh poverkhnostey mashin [Test for abrasive wear of modern materials for futting working surfaces of machines], *Geo-Technical Mechanics*, no. 151, Dnipro, Ukraine, DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2020.151.150> [in Russian].
9. ISO 3384 «Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of stress relaxation in compression — Part 1: Testing at constant temperature». [in English].
10. «Guma vulkanizovana chi termoplastichna. Vznachennya zalishkovoyi deformatsiyi pislya stiskannya. Chastina 1. Viprobuvannya za standartnoyi chi pidvishenoyi temperaturi [Vulcanized or thermoplastic rubber. Determination of residual deformation after compression. Part 1. Tests at standard or elevated temperature] . (2019). *DSTU 815-1:2019 (ISO 815-1:2014, IDT)* [in Ukrainian].

Andrii Puhach, Prof., DSc., **Olexandr Chernii**, Senior Lecturer, **Yevhen Kalhankov**, Senior Lecturer
Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Study of the Effect of Stress Relaxation and Residual Deformation of Modern Polymer Materials to Protect the Surfaces of Parts From Wear

Stress relaxation during compression of rubber and polymers is one of the indicators of their viscoelasticity. The purpose of the work is research on stress relaxation during compression and determination of the residual deformation of polymeric materials used in modern engineering for the production of protective coatings for machine parts.

Experimental studies were carried out on a DM-30M laboratory unit with a ring dynamometer and a maximum compression force of 20kN. The DM-22M device is fixed on the press table. Samples for testing were cut from parts made of rubber produced by NVP «Valsa-GTV» and thermoplastic polyurethane with the trade name "Desmopan". During the test, the dependence of the stress drop in compressed samples of materials on time, the rate of stress relaxation was determined, the magnitude of the stress drop to the equilibrium value, the equilibrium modulus, as well as the residual deformation after the load is removed.

The conducted studies established that at a constant relative deformation of 40%, thermoplastic polyurethane "Desmopan" is characterized by a lower tendency to stress relaxation, a higher modulus of elasticity under compression than lining rubbers, but has a larger residual deformation after unloading. Lining rubber, when comparing samples from new rubber and with about 9,300 hours of operation in difficult working conditions, showed itself as a material that is prone to internal structural transformations with an increase in the time of load perception. These transformations cause a change in the indicators of relaxation processes: the rate of stress relaxation decreases, the magnitude of the stress drop to the equilibrium state decreases, with a simultaneous increase in the modulus of elasticity. The results of the study can be used in the selection of material and calculations of parts of protective coatings for performance and reliability.

rubber, thermoplastic polyurethane, stress relaxation, residual deformation

Одержано (Received) 20.09.2023

Прорецензовано (Reviewed) 08.10.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

С.О. Коваль, асп.

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

e-mail: sergiikov99@gmail.com

Синтез гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом

Проведено структурно-схемний синтез гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом і згенеровано конструктивні рішення гвинтових робочих органів змішувачів, у яких є можливість вибору необхідної величини зазору між лопатями для інтенсифікації процесу змішування матеріалів різних фракцій, а також конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом без примусового обертання кожуха з можливістю пригальмовування і з примусовим обертанням кожуха з можливістю зміни довжини траси змішування і переміщення матеріалів. Представлено розроблену залежність з допомогою якою проводиться кінцевий відбір синтезованих конструкцій, яка враховує вагу таких факторів, як загальна вартість, продуктивність, ефективність виконання процесу змішування та кількість функціональних характеристик.

структурно-схемний синтез, гвинтовий конвеєр-змішувач, обертовий кожух, змішування, морфологічний аналіз, гвинтовий робочий орган

Постановка проблеми. Проведення структурно-схемного синтезу часто дозволяє одержати значну гамму досить ефективних конструктивних рішень різноманітних технічних засобів, що у повній мірі також стосується генерування альтернативних рішень гвинтових змішувачів. Гвинтові конвеєри-змішувачі з обертовим кожухом (ГКЗОК) є нетиповими механічними засобами для виконання операції змішування матеріалів, проте вони можуть набути досить широкого застосування у різних галузях економіки поєднуючи операцію переміщення сипкого матеріалу із операцією його перемішування. Для їх створення і подальшого дослідження необхідно здійснити розроблення окремих раціональних конструкцій, які б відповідали відповідним параметрам у царині досягнення якісних показників процесу змішування, високої продуктивності виконання процесу, а також прийнятної собівартості виготовлення, експлуатації та обслуговування таких конструкцій. Задля цього і доцільно скористатись методикою структурно-схемного синтезу методом ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу для отримання відповідних технічних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробленню прогресивних конструкцій гвинтових конвеєрів, методик розрахунку їх параметрів, а також теоретичному обґрунтуванню процесів функціонування присвячені праці Б. Гевка [15], Р. Рогатинського [15, 17, 19-22], М. Пилипця [15, 16, 18], І. Гевка [3, 5, 13, 17, 20, 23-30], О. Ляшука [24-30], В. Гудя [26-30] та інші. Дослідженню процесів змішування гвинтовими механізмами прив'язані роботи І. Гевка [2, 7, 14, 20], В. Гудя [22], Д. Дмитріва [14, 21, 22], О. Гурика [2, 7]. Розробленню методик та методів синтезу і генеруванню прогресивних конструкцій гвинтових конвеєрів і гвинтових змішувачів присвячені роботи І. Гевка [4, 6, 8-12], О. Ляшука [10, 11], А. Дячуна [4, 9], В. Васильківа [1] тощо. Проте враховуючи потреби різних галузей економіки у

використанні змішувальних операцій, особливо у сільськогосподарському виробництві, харчовій та переробній промисловості, будівельній галузі, актуальність розроблення і дослідження нових ефективних конструкцій гвинтових-змішувачів з високими якісними параметрами є актуальною задачею.

Постановка завдання. Метою роботи є генерування ефективних конструкцій гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовими кожухами на основі застосування структурно-схемного синтезу методом ієрархічного групування за допомогою морфологічного аналізу.

Виклад основного матеріалу. Процес змішування різних типів матеріалів з використанням гвинтових механізмів і, зокрема конвеєрів, є поширеним явищем у сільськогосподарському виробництві, харчовій і переробній промисловості, фармації, будівельній, автотранспортній та інших галузях. Цей процес може відбуватися як самостійна операція, так і у поєднанні з транспортуванням, пресуванням тощо [8, 10, 17, 20].

Відтак з метою створення нових прогресивних конструкцій гвинтових змішувачів було проведено генерування їх альтернатив при використанні структурно-схемного синтезу методом ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу [6, 8-12]. У результаті проведеного аналізу впливу різних факторів на процес змішування матеріалів гвинтовими механізмами було визначено ознаки конструктивних елементів таких механізмів і їх взаємозв'язки, що дозволило побудувати відповідну морфологічну таблицю цих елементів для ГКЗОК (табл. 1), з якої було виділено модель механічної системи «Гвинтовий конвеєр-змішувач з обертовим кожухом» (рис. 1). У результаті проведеного структурно-схемного синтезу ГКЗОК обрано наступні базові морфологічні ознаки: привід; шнек, який включає кожух (жолоб) і гвинтовий робочий орган; бункер; механізм розвантаження; опорно-руховий механізм.

Для проведення структурно-схемного синтезу ГКЗОК використано метод синтезу ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу, який передбачає розбивку окремих груп на підгрупи, де кількість варіантів визначається по формулі [6, 8-12]:

$$N = \sum_{z=1}^l \sum_{x=1}^q \prod_{i=1}^m K_i, \quad (1)$$

де z – ієрархічний рівень;

l – кількість ієрархічних рівнів;

x – певна підгрупа відповідного ієрархічного рівня;

q – кількість підгруп відповідного ієрархічного рівня;

K_i – альтернатива конструктивної ознаки елементу певної підгрупи відповідного ієрархічного рівня;

m – кількість альтернатив конструктивної ознаки елементів певної підгрупи відповідного ієрархічного рівня.

Таблиця 1 – Морфологічна таблиця ознак конструктивних елементів гвинтових конвєсерів-змішувачів з обертовим кожухом

ПРИВІД							
1. Тип				2. Вид руху			
1.1 Електропривід 1.2. Вібропривід 1.3 Двигун внутрішнього згорання				2.1. З постійною швидкістю 2.2. Зі змінною швидкістю 2.3. З періодичними зупинками (пульсуючий)			
ШНЕК							
Кожух (жолоб)				Гвинтовий робочий орган			10. Можливість зміни довжини
3. Конструкція жолоба	4. Кількість	5. Додаткові елементи	6. Спосіб приведення в обертовий рух	7. Профіль спіралі	8. Конструкція гвинта	9. Кількість	
3.1. Одного діаметра 3.2. Різного діаметра	4.1. Один 4.2. Два	5.1. Без додаткових елементів 5.2. Зі вставками (розпушувачами), закріплені по внутрішньому профілі жолоба	6.1. Призмусовий (від приводу) 6.2. Вільний (за рахунок зачеплення матеріалу) 6.3. З можливістю регулювання (пригальмовування)	7.1. Суцільна (стандартна) 7.2. Стрічкова 7.3. Лопатева без регулювання величини просипання 7.4. Лопатева з регулюванням величини просипання 7.5. Гофрована 7.6. З розрізами отворами чи вирізами 7.7. Вузкополосна 7.8. Широкополосна 7.9. Еластична 7.10. Із загинами по зовнішній кромці спіралі 7.11. Конічна	8.1. З одним кроком 8.2. З різним кроком 8.3. Однозахідний 8.4. Багатозахідний	9.1. Один 9.2. Два	10.1. Без можливості зміни (суцільна) 10.2. З можливістю зміни (секційна)
БУНКЕР						15. Механізм розвантаження	16. Опорно-руховий механізм
11. Профіль	12. Кількість	13. Розташування по відношенню до шнека		14. Механізм просипання			
11.1. Суцільний 11.2. Секційний	12.1. Один 12.2. Деякі	13.1. Співвісне і перпендикулярне 13.2. Бічне і перпендикулярне 13.3. Співвісне і нахилене 13.4. Бічне і нахилене		14.1. З регульованим завантаженням 14.2. З нерегульованим завантаженням	15.1. Розвантажувальний отвір 15.2. Розвантажувальний патрубок		16.1. Без можливості зміни кута нахилу шнека 16.2. З можливістю зміни кута нахилу шнека

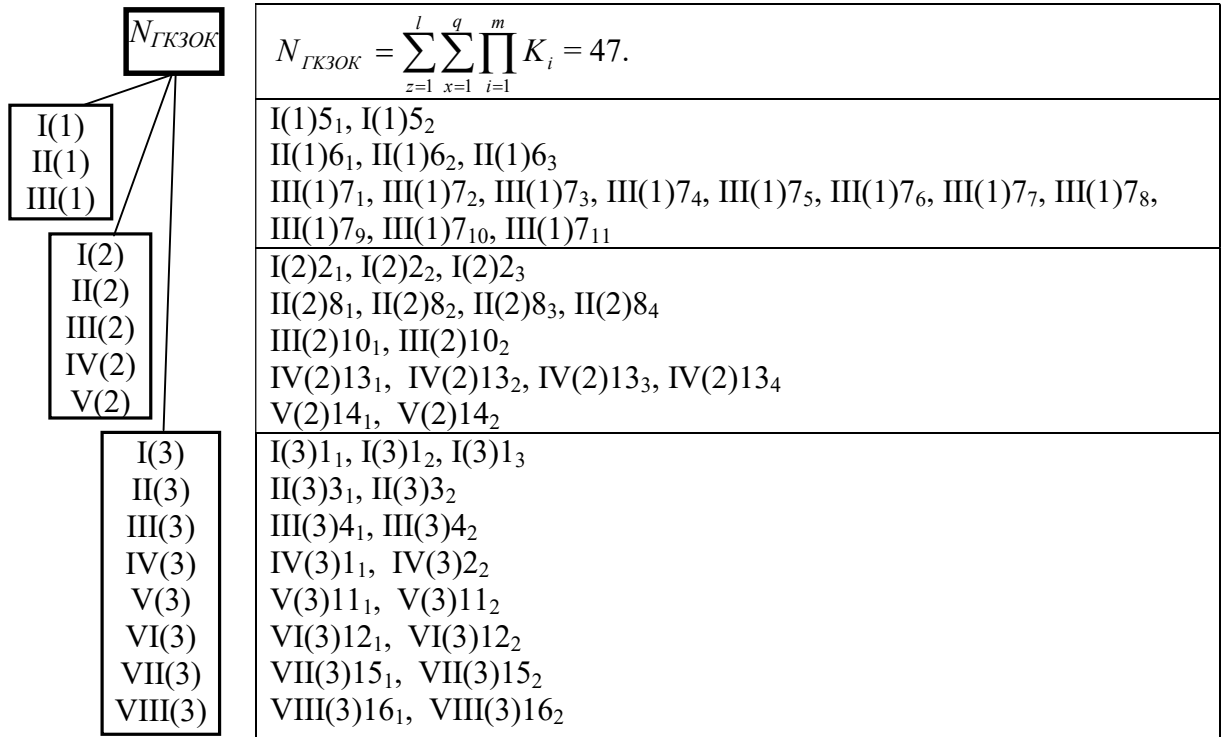


Рисунок 1 – Модель механічної системи «Гвинтовий конвеєр-змішувач з обертовим кожухом»: I - VIII – підгрупи ієрархічного рівня; (1) - (3) – відповідні ієрархічні рівні

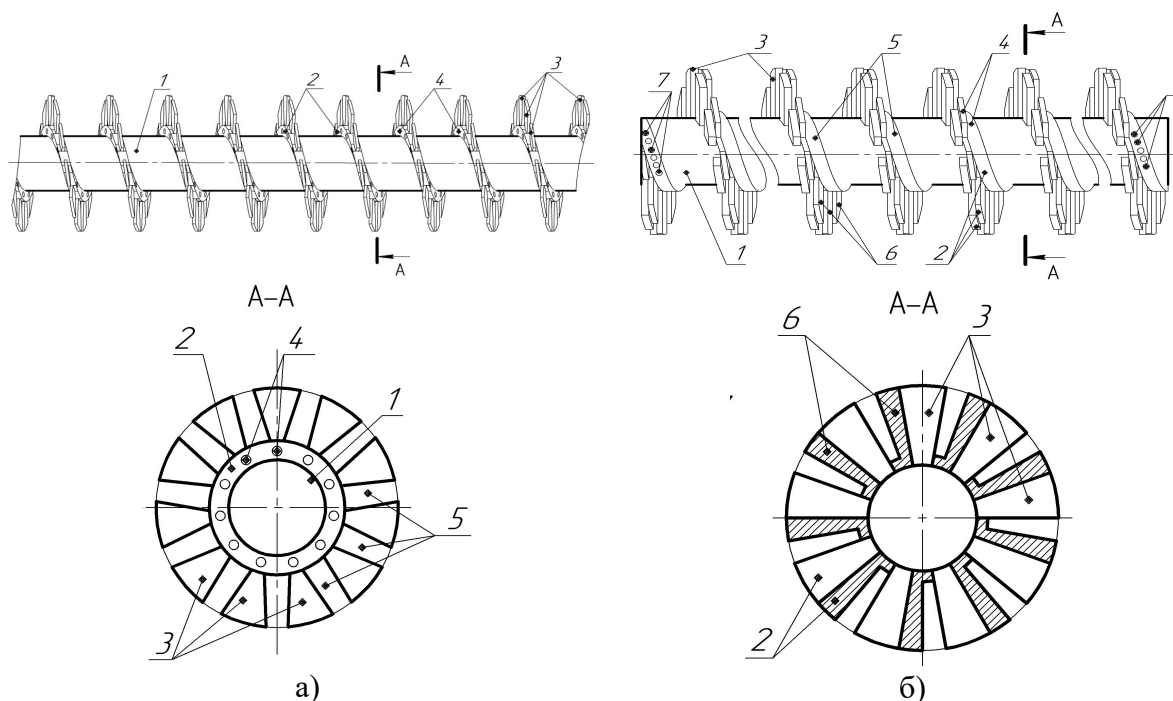
Джерело: розроблено автором

Загальна кількість генерованих варіантів гвинтових ГКЗОК при використанні методу синтезу ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу становитиме:

$$\begin{aligned}
 N_{ГКЗ} = & \left| \begin{array}{c} 1.1 \\ 1.2 \\ 1.3 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 2.1 \\ 2.2 \\ 2.3 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 3.1 \\ 3.2 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 4.1 \\ 4.2 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 5.1 \\ 5.2 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 6.1 \\ 6.2 \\ 6.3 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 7.1 \\ 7.2 \\ 7.3 \\ 7.4 \\ 7.5 \\ 7.6 \\ 7.7 \\ 7.8 \\ 7.9 \\ 7.10 \\ 7.11 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 8.1 \\ 8.2 \\ 8.3 \\ 8.4 \end{array} \right| + \\
 & + \left| \begin{array}{c} 9.1 \\ 9.2 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 10.1 \\ 10.2 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 11.1 \\ 11.2 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 12.1 \\ 12.2 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 13.1 \\ 13.2 \\ 13.3 \\ 13.4 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 14.1 \\ 14.2 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 15.1 \\ 15.2 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} 16.1 \\ 16.2 \end{array} \right| = 47.
 \end{aligned}$$

Найважливішим елементом в конструкції ГКЗОК є шнек, до складу якого входить кожух (конструктивні ознаки 3 – 6 і 10 з табл. 1) і гвинтовий робочий орган

(конструктивні ознаки 7 – 9 і 10 з табл. 1). Саме конструктивні ознаки шнека (5 - 7) входять до першого ієрархічного рівня і від них у максимальній мірі залежить ефективність виконання операції змішування генерованими конструкціями. Якщо з певними конструктивними ознаками конструкції жолоба не виникає питань (наприклад, ознака 3), то наявність у ньому додаткових елементів (ознака 5) і способу приведення в обертовий рух (ознака 6) сприятимуть значному підвищенню якості і продуктивності змішування. Крім того, конструкція гвинтового робочого органу (ознака 7) має вирішальний вплив на ефективність якісних параметрів генерованих варіантів ГКЗОК. Тому з метою отримання ефективних варіантів ГКЗОК було синтезовано нові конструктивні рішення гвинтових робочих органів, конструктивні схеми яких (ознака 7) відображено на рис. 2, на які отримано патенти України на корисну модель (пат. України № 153687 – «Шнек для змішування з механічним кріпленням елементів» і пат. України № 153774 – «Гвинтовий робочий орган змішувача»). До їх переваг слід віднести можливість підбору необхідної величини зазору між лопатями гвинтового робочого органу для інтенсифікації процесу змішування матеріалів різних фракцій.



- а) з механічним кріпленням елементів (пат. України № 153687): 1 - вал; 2 - спіраль незначної висоти; 3 - лопаті; 4 - кріпильні отвори; 5 - отвори для просипання та змішування матеріалів;
 б) з можливістю вибору зазору між лопатями (пат. України № 153774): 1 - вал; 2 - гвинт;
 3 - базова лопатева спіраль; 4 - спіраль Г-подібної форми; 5 - внутрішня частина спіралі 4;
 6 - зовнішня частина спіралі 4; 7 - фіксація кінців спіралі 4

Рисунок 2 – Конструктивні схеми синтезованих гвинтових робочих органів змішувачів
 Джерело: розроблено автором

При конструюванні ГКЗОК були враховані найважливіші фактори, до яких увійшли: загальна вартість, продуктивність, ефективність технологічного процесу змішування та кількість функціональних характеристик. Кінцевий вибір синтезованих конструктивних рішень ГКЗОК доцільно проводити шляхом відбору альтернатив з максимізацією очікуваного позитивного результату:

$$A_{ГКЗОК} = \frac{\frac{3B_{mn}}{\sum_{i=1}^n EB_i} \cdot k_{ваг1} + \frac{Q_{нк}}{Q_{бн}} \cdot k_{ваг2} + \frac{V_{нк}}{V_{бн}} \cdot k_{ваг3} + \frac{N_{нк}}{N_{бн}} \cdot k_{ваг4}}{k_{ваг1} + k_{ваг2} + k_{ваг3} + k_{ваг4}}, \quad (2)$$

де $3B_{mn}$ – загальна вартість базового представника гвинтового змішувача (включає витрати на купівлю, доставку, монтаж, обслуговування, ремонт та експлуатаційні витрати), грн.;

EB_i – елементи витрат пов'язані із набуттям і використанням ГКЗОК (вартість купівлі, доставки, монтажу, обслуговування, ремонту та експлуатації), грн.;

n – кількість елементів витрат пов'язаних із набуттям і використанням ГКЗОК;

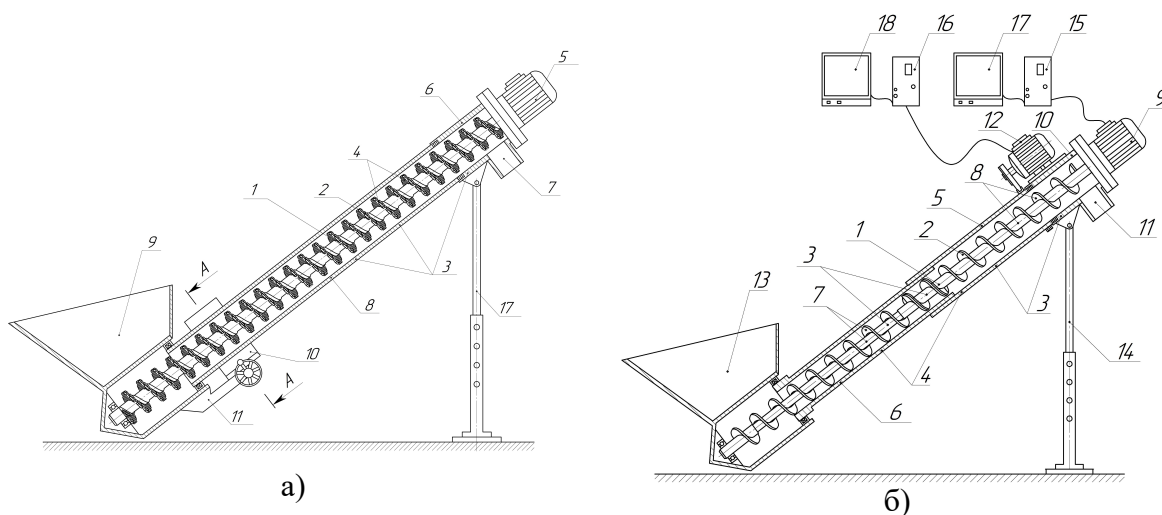
$Q_{нк}, Q_{бн}$ – відповідно продуктивність змішування новою конструкцією ГКЗОК і базовим представником гвинтового змішувача, кг/год.;

$V_{нк}, V_{бн}$ – відповідно ефективність технологічного процесу змішування новою конструкцією ГКЗОК і базовим представником гвинтового змішувача, %;

$N_{нк}, N_{бн}$ – відповідно кількість функціональних характеристик нової конструкції ГКЗОК і базового представника гвинтового змішувача (можливість мобільної зміни місця завантаження чи напрямку вивантаження, довжини траси змішування і переміщення, виконання додаткових функцій, таких як пресування, сепарація тощо);

$k_{ваг1}, k_{ваг2}, k_{ваг3}, k_{ваг4}$ – відповідно ваги показників загальної вартості, продуктивності, ефективності технологічного процесу змішування та кількості функціональних характеристик, що враховують їх важливість і пріоритетність, $k_{ваг} = 0,01 \dots 1$.

Також за результатами проведеного синтезу і використання вище представленої розробленої методики відбору варіантів було спроектовано нові типи ГКЗОК, на які подано заявки на отримання патентів України (рис. 3). Дані конструктивні рішення ГКЗОК володіють рядом переваг у порівнянні із традиційними гвинтовими змішувачами, позаяк можуть забезпечувати значно вищі показники продуктивності та ефективності виконання технологічного процесу змішування, а також володіти розширеними функціональними характеристиками.



а) без примусового обертання кожуха із можливістю пригальмовування (заявка на пат. України u202302288); б) з примусовим обертанням кожуха (заявка на пат. України u202302289)

Рисунок 3 – Конструктивні схеми синтезованих конвеєрів-змішувачів з обертювним кожухом
Джерело: розроблено автором

До переваг розробленого ГКЗОК (рис. 3.а) відноситься можливість регулювання частоти обертання рухомої частини кожуха для покращення процесу змішування матеріалів, а також використання у його конструкції гвинтових робочих органів з можливістю вибору зазору між лопатями. А до переваг розробленого ГКЗОК (рис. 3.б) доцільно віднести можливість регулювання частоти обертання двигунів для приведення у відповідний обертовий рух гвинта та рухомої частини кожуха для змішування матеріалів з візуалізацією та фіксацією експериментальних даних у персональних комп'ютерах, а також можливість зміни довжини траси змішування і переміщення матеріалів.

Висновки:

1. Проведено структурно-схемний синтез гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом методом ієрархічного групування за допомогою морфологічного аналізу й отримано ефективні конструктивні рішення гвинтових робочих органів змішувачів з можливістю підбору необхідної величини зазору між лопатями гвинтового робочого органу для інтенсифікації процесу змішування матеріалів різних фракцій, на які отримано патенти України, а також конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом без примусового обертання кожуха з можливістю пригальмовування і з примусовим обертанням кожуха з можливістю зміни довжини траси змішування і переміщення матеріалів, на які подано заявки на отримання патентів України. Розроблені конструкції можуть забезпечувати значно вищі показники продуктивності та ефективності виконання технологічного процесу змішування гвинтовими конвеєрами-змішувачами, а також володіти розширеними функціональними характеристиками.

2. Розроблено залежність, за якою проводиться кінцевий відбір синтезованих конструктивних рішень ГКЗОК шляхом максимізації очікуваного позитивного результату, що враховує вагу таких факторів, як загальна вартість, продуктивність, ефективність технологічного процесу змішування та кількість функціональних характеристик.

Список літератури

1. Васильків В.В., Гевко І.Б., Бабарика С.Ф. Синтез нових конструкцій гвинтових робочих органів машин внесення твердих органічних добрив. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету*. 2009. №2, С. 170-173.
2. Гевко І.Б., Гурик О.Я. Визначення динамічних навантажень у гвинтовому змішувачі. *Вісник НУ «Львівська політехніка»: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2002. № 442. С. 90–93.
3. Гевко І.Б. Моделювання характеру навантаження на гвинтові робочі органи. *Вісник ТНТУ*. 2011. Том 16, № 1. С. 69-77.
4. Гевко І., Любачівський Р., Дячун А. Синтез змішувачів з гвинтовими робочими органами. *Вісник Львівського національного аграрного університету: Агроінженерні дослідження*. 2012. № 16. С. 237 – 246.
5. Гевко І.Б. Розробка і дослідження низькочастотних пристроїв для виконання технологічних процесів гнучкими гвинтовими конвеєрами: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.20.01 . Луцьк, 1997. 18 с.
6. Гевко І.Б. Структурний синтез імпульсних запобіжних муфт і шнеків методом морфологічного аналізу. *Вісник ТНТУ*. 2012. № 3(67). С. 121-134.
7. Гевко І.Б., Вітровий А.О., Гурик О.Я. Динамічна модель процесу транспортування сипких матеріалів гвинтовим конвеєром. *Сільськогосподарські машини: зб. наук. статей*. 2001. Вип. 8. С. 72-82.
8. Гевко І.Б., Гудь В.З. Синтез гвинтових конвеєрів з можливостями технологічного перетворення і мобільної зміни траєкторії перевантаження матеріалів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. Вип. 2(33). С. 25-33.
9. Гевко І.Б., Дячун А.Є., Любачівський Р.О. Структурний синтез гвинтових конвеєрів з розширеними технологічними можливостями методом морфологічного аналізу. *Вісник СевНТУ*:

- зб. наук. пр. Вип. 128/2012. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. Севастополь, 2012. С. 37 – 41.
10. Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Клендій В.М. Синтез гвинтових конвеєрів з гнучкими робочими органами. *Вісник Львівського національного аграрного університету: Агроінженерні дослідження*. 2014. № 18. С. 112 – 121.
 11. Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Пік А.І., Марчук Н.М., Маруніч О.П. Синтез гвинтових транспортерів-змішувачів. *Сільськогосподарські машини: зб. наук. статей*. 2020. Вип. 45. С. 35-44.
 12. Гевко Ів., Довбуш Т., Цьонь О., Довбуш А., Станько А. Синтез гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями та результати їх досліджень. *Сільськогосподарські машини: Зб. наук. статей*. 2021. Вип. 47. С. 63-72.
 13. Гнучкі гвинтові конвеєри: проектування, технологія виготовлення, експериментальні дослідження. / Гевко І. Б. та ін. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 207 с.
 14. Дмитрів Д.В., Гевко І.Б., Левенець В.Б. Надійність роботи шнеково-гвинтових змішувачів. *Сільськогосподарські машини: зб. наук. статей*. 2007. Вип. 16. С. 62-74.
 15. Механізми з гвинтовими пристроями. Б.М. Гевко, М.Г. Данильченко, Р.М. Рогатинський та ін. Львів: Світ, 1993. 208 с.
 16. Пилипець М. І., Гевко І.Б., Вітровий А.О. Оптимізація робочого органу з пружним валом для гнучких гвинтових конвеєрів. *Вісник НУ «Львівська політехніка»: «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні»*. 2000. № 412. С. 84–91.
 17. Перспективні гвинтові конвеєри: конструкції, розрахунок, дослідження / Рогатинський Р.М. та ін. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 212 с.
 18. Пилипець М. І., Гевко І.Б., Вітровий А.О. Оптимізація робочого органу з секційними елементами для гнучких гвинтових конвеєрів. *Сільськогосподарські машини: зб. наук. статей*. 1999. Вип. 5. С. 207–217.
 19. Рогатинський Р.О., Гевко І.Б., Рогатинська Л.Р. Оптимізація параметрів гвинтових транспортно-технологічних систем. *Вісник ТНТУ*. 2013. № 1 (69). С. 116–125.
 20. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дячун А.Є. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів: монографія. Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2014. 280 с.
 21. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дмитрів Д.В. Моделювання роботи малогабаритного лопатево-гвинтового змішувача. *Сільськогосподарські машини: зб. наук. статей*. 2000. Вип. 6. С. 129-135.
 22. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дмитрів Д.В., Гудь В.З., Дмитрів О.Р. Моделювання змішування компонентів гвинтовими конвеєрами-змішувачами. *Сільськогосподарські машини: зб. наук. статей*. 2020. Вип. 45. С. 84-93.
 23. Hevko I.B., Dyachun A.Ye., Hud V.Z., Rohatynska L.R., Klendiy V.M. Investigation of the stability of the torsional vibrations of a screw conveyor under the influence of pulse forces. *INMATEH - Agricultural Engineering. Polytechnic University of Bucharest*. 2015. Vol. 45. № 1. P. 77-86.
 24. Hevko I.B., Lyashuk O.L., Leshchuk R.Y., Rogatynska L.R., Melnychuk A.L. Investigation of the radius of bending for flexible screw sectional conveyers. *INMATEH - Agricultural Engineering. Polytechnic University of Bucharest*. 2016. Vol. 48, № 1. P. 35-42.
 25. Investigation of Bulk Material Transportation by Screw Conveyor with Hinge-Pan Operating Device. Oleg Lyashuk, Roman Rohatynskyi, Ivan Hevko, Olena Dmytriv, Oleg Tson, Ihor Tkachenko, Mariana Sokol, Roman Leshchuk, Volodymyr Kobelnyk. *Key Engineering Materials. Engineering Materials, Devices and Equipments-2023*. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, Vol. 948, pp 169-182.
 26. Research in resonant oscillations of the telescopic screw – granular media system caused by external periodic forces. *INMATEH - Agricultural Engineering*. V. Hud, R. Rogatynskyy, Iv. Hevko, O. Lyashuk, A. Pic, O. Huryk. Polytechnic University of Bucharest, 2020, Vol. 60, № 1, P. 29-36.
 27. Research of non-resonant oscillations of the "telescopic screw - fluid medium" system. O. L., Lyashuk; I. B., Hevko; V. Z., Hud; I. G., Tkachenko; O. V., Hevko; M. O., Sokol; O. P., Tson; V. R., Kobelnyk; D. Z., Shmatko; A. I., Stanko. *INMATEH - Agricultural Engineering*. Polytechnic University of Bucharest, 2022, Vol. 68, № 3, P. 499-510.
 28. Research of resonance vibrations of the system “Telescopic screw is a bulk medium” caused by torsional vibrations. V. Hud, I. Hevko, O. Lyashuk, O. Hevko, M. Sokil, I. Shust. *Karaganda*, 2020, № 2 (98), Ст. 119-126.
 29. Resonant oscillation of vertical working part of conveyor-loader. *Karaganda State University Publishing house*. I. Hevko, O. Lyashuk, M. Sokil, L. Slobodian, V. Hud, Yu. Vovk. *Karaganda*, 2019, № 2 (94), Ст. 73-81.

30. Hud V., Lyashuk O., Hevko I., Ungureanu N., Vlăduț N.-V., Stashkiv M., Hevko O., Pik A. Enhancement of Agricultural Materials Separation Efficiency Using a Multi-Purpose Screw Conveyor-Separator. *Agriculture*, 2023. Vol. 13, № 4. P. 870. (<https://doi.org/10.3390/agriculture13040870>).

References

1. Vasylykiv, V.V., Hevko, I.B. & Babaryka, S.F. (2009). Synthesis of new designs of screw working bodies of machines for applying solid organic fertilizers. *Bulletin of the Dnipropetrovsk State Agrarian University*. No. 2, p. 170-173 [in Ukrainian].
2. Hevko, I.B. & Guryk, O.Ya. (2002). Determination of dynamic loads in a screw mixer. *Bulletin of Lviv Polytechnic University: Optimization of production processes and technical control in mechanical engineering and instrument engineering*. No. 442, 90–93 [in Ukrainian].
3. Hevko I.B. (2011). Modeling of the nature of the load on the screw working bodies. *Bulletin of TNTU, Ternopil, Volume 16, No. 1*, 69-77 [in Ukrainian].
4. Hevko, I., Lyubachivskiy, R. & Dyachun, A. (2012). Synthesis of mixers with screw working bodies. *Bulletin of the Lviv National Agrarian University: Agricultural engineering research*. No. 16, 237-246 [in Ukrainian].
5. Hevko I.B. (1997). Development and research of low-frequency devices for performing technological processes with flexible screw conveyors [Development and research of low-frequency devices for performing technological processes with flexible screw conveyors]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Lutsk [in Ukrainian].
6. Hevko, I.B. (2012). Structural synthesis of impulse safety couplings and screws by the method of morphological analysis. *Bulletin of TNTU, Ternopil, No. 3(67)*, 121-134 [in Ukrainian].
7. Hevko, I.B., Vitrovyi, A.O. & Guryk, O.Ya. (2001). A dynamic model of the process of transporting loose materials by a screw conveyor. *Agricultural machines: Collection of scientific articles, Issue 8*, 72-82 [in Ukrainian].
8. Hevko, I.B. & Gud, V.Z. (2019). Synthesis of screw conveyors with the possibilities of technological transformation and mobile change of the trajectory of material overload. *Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences. Issue 2(33)*, 25-33 [in Ukrainian].
9. Hevko, I.B., Dyachun, A.E. & Lyubachivskiy, R.O. (2012). Structural synthesis of screw conveyors with advanced technological capabilities by the method of morphological analysis. *Bulletin of SevNTU: coll. of science Ave. Issue 128/2012. Series: Mechanical engineering and transport*. Sevastopol, p. 37-41 [in Ukrainian].
10. Hevko, I.B., Lyashuk, O.L., Klendiy, V.M. (2014). Synthesis of screw conveyors with flexible working bodies. *Bulletin of the Lviv National Agrarian University: Agricultural engineering research*. No. 18, 112 – 121 [in Ukrainian].
11. Hevko, I.B., Lyashuk, O.L., Peak, A.I., Marchuk, N.M. & Marunych, O.P. (2020) Synthesis of screw conveyors-mixers. *Agricultural machines: Collection of scientific articles, Issue 45*, 35-44 [in Ukrainian].
12. Hevko, Iv., Dovbush, T., Tsyon, O., Dovbush, A. & Stanko, A. (2021). Synthesis of helical working bodies with elastic surfaces and the results of their research. *Agricultural machines: Collection of scientific articles, Issue 47*, 63-72 [in Ukrainian].
13. Hevko, I. B., Leshchuk, R. Ya., Gud, V. Z., Dmytriv, O. R., Dubynyak, T. S., Navrotska, T. D. & Kruglik, O. A. (2019). Flexible screw conveyors: design, manufacturing technology, experimental research. Ternopil: FOP Palyanitsa V. A. [in Ukrainian].
14. Dmytriv, D.V., Hevko, I.B. & Levenets, V.B. (2007). Reliability of screw-screw mixers. *Agricultural machines: Collection of scientific articles, Issue 16*, 62-74 [in Ukrainian].
15. B.M. Hevko, M.G. Danylchenko, R.M. Rohatynskiy et al. (1993). Mechanisms with screw devices. Lviv: Svit [in Ukrainian].
16. Pylypets, M.I., Hevko, I.B. & Vitrovyi, A.O. (2000). Optimization of the working body with an elastic shaft for flexible screw conveyors. *Bulletin of Lviv Polytechnic University: "Optimization of production processes and technical control in mechanical engineering and instrument engineering"*, No. 412, 84–91 [in Ukrainian].
17. Rohatynskiy, R.M., Hevko, I.B., Lyashuk, O.L., Gud, V.Z., Dyachun, A.E., Melnychuk, A.L. & Slobodian, L.M. (2019). Prospective screw conveyors: designs, calculation , research. Ternopil: FOP Palyanytsia V. A. [in Ukrainian].
18. Pylypets, M.I., Hevko, I.B. & Vitrovyi, A.O. (1999). Optimization of the working body with sectional elements for flexible screw conveyors. *Agricultural machines: Collection of scientific articles, Issue 5*, 207–217 [in Ukrainian].
19. Rohatynskiy, R.O., Hevko, I.B. & Rohatynska, L.R. (2013). Optimization of parameters of screw transport and technological systems. *Bulletin of TNTU, No. 1 (69)*, 116–125 [in Ukrainian].

20. Rohatynskiy, R.M., Hevko, I.B. & Dyachun, A.E. (2014). Scientific and applied foundations of the creation of screw transport and technological mechanisms. Ternopil: Ivan Pulyuy TNTU [in Ukrainian].
21. Rohatynskiy, R.M., Hevko, I.B. & Dmytriv, D.V. (2000). Modeling the operation of a small-sized blade-screw mixer. *Agricultural machinery. Collection of scientific articles. Issue 6*, 129-135 [in Ukrainian].
22. Rohatynskiy, R.M., Hevko, I.B., Dmytriv, D.V., Gud, V.Z. & Dmytriv, O.R. (2020). Modeling of mixing of components by screw conveyors-mixers. *Agricultural machinery. Collection of scientific articles. Issue 45*, 84-93 [in Ukrainian].
23. Hevko, I.B., Dyachun, A.Ye., Hud, V.Z., Rohatynska, L.R. & Klendiy, V.M. (2015). Investigation of the stability of the torsorial vibrations of a screw conveyer under the influence of pulse forces. *INMATEH - Agricultural Engineering. Polytechnic University of Bucharest, Vol. 45, № 1*, 77-86 [in English].
24. Hevko, I.B., Lyashuk, O.L., Leshchuk, R.Y., Rogatynska, L.R. & Melnychuk, A.L. (2016). Investigation of the radius of bending for flexible screw sectional conveyers. *INMATEH - Agricultural Engineering. Polytechnic University of Bucharest, Vol. 48, № 1*, Pp. 35-42 [in English].
25. Oleg Lyashuk, Roman Rohatynskiy, Ivan Hevko, Olena Dmytriv, Oleg Tson, Ihor Tkachenko, Mariana Sokol, Roman Leshchuk & Volodymyr Kobelnyk (2023). Investigation of Bulk Material Transportation by Screw Conveyer with Hinge-Pan Operating Device. Key Engineering Materials. Engineering Materials, Devices and Equipments-2023. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, Vol. 948, pp 169-182 [in English].
26. Hud, V., Rogatynskyy, R., Hevko, Iv., Lyashuk, O., Pic, A. & Huryk, O. (2020). Research in resonant oscillations of the telescopic screw – granular media system caused by external periodic forces. *INMATEH - Agricultural Engineering. Polytechnic University of Bucharest, Vol. 60, № 1*, P. 29-36 [in English].
27. Lyashuk, O. L., Hevko, I. B., Hud, V. Z., Tkachenko I. G., Hevko, O. V., Sokol, M. O., Tson, O. P., Kobelnyk, V. RShmatko., D. Z., & Stanko, A. I. (2022). Research of non-resonant oscillations of the "telescopic screw - fluid medium" system. *INMATEH - Agricultural Engineering. Polytechnic University of Bucharest, Vol. 68, № 3*, P. 499-510 [in English].
28. Hud, V., Hevko, I., Lyashuk, O., Hevko, O., Sokil, M. & Shust I. (2020). Research of resonance vibrations of the system "Telescopic screw is a bulk medium" caused by torsional vibrations., *Karaganda, № 2 (98)*. Pp. 119-126 [in English].
29. Hevko, I., Lyashuk, O., Sokil, M., Slobodian, L., Hud, V. & Vovk, Yu.. (2019). Resonant oscillation of vertical working part of conveyer-loader. *Karaganda, Karaganda State University Publishing house. № 2 (94)*, Pp. 73-81 [in English].
30. Hud, V., Lyashuk, O., Hevko, I., Ungureanu, N., Vlăduț ,N.-V., Stashkiv, M., Hevko, O. & Pik, A. (2023). Enhancement of Agricultural Materials Separation Efficiency Using a Multi-Purpose Screw Conveyor-Separator. *Agriculture, Vol. 13, № 4*. P. 870. (<https://doi.org/10.3390/agriculture13040870>) [in English].

Sergii Koval, post graduate

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

Synthesis of Screw Conveyers-mixers With a Rotating Casing

Carrying out a structural-schematic synthesis often allows you to obtain a significant range of quite effective constructive solutions of various technical means, which fully also applies to the generation of alternative solutions for screw mixers. Screw conveyors-mixers with a rotating casing (GKZOK) are atypical mechanical means for performing the operation of mixing materials, however, they can become quite widely used in various sectors of the economy by combining the operation of moving loose material with the operation of mixing it. For their creation and further research, it is necessary to develop separate rational structures that would meet the relevant parameters in terms of achieving quality indicators of the mixing process, high performance of the process, as well as acceptable cost of manufacturing, operation and maintenance of such structures. For this reason, it is advisable to use the method of structural-schematic synthesis by the method of hierarchical groups with the help of morphological analysis to obtain appropriate technical solutions.

As a result of the analysis of the influence of various factors on the process of mixing materials by screw mechanisms, the characteristics of the structural elements of such mechanisms and their interrelationships were determined, which made it possible to build an appropriate morphological table of these elements for GKZOK, from which a model of the mechanical system was selected. Screw conveyor-mixer with a rotating casing". As a result of the structural and diagrammatic synthesis of GKZOK, the following basic morphological features were selected: drive; screw, which includes a casing (gutter) and a screw working body; bunker; unloading mechanism; locomotor mechanism.

The structural and schematic synthesis of screw conveyors-mixers with a rotating casing made it possible to obtain effective design solutions for the screw working bodies of the mixers with the possibility of

selecting the necessary gap between the blades of the screw working body for intensifying the process of mixing materials of different fractions, for which Ukrainian patents were obtained, as well as mixer conveyors with a rotating casing without forced rotation of the casing with the possibility of braking and with forced rotation of the casing with the possibility of changing the length of the mixing track and moving materials, for which applications for obtaining patents of Ukraine have been submitted. The developed structures can provide significantly higher productivity and efficiency of the technological process of mixing with screw conveyors-mixers, as well as have extended functional characteristics. A dependency was also developed, according to which the final selection of synthesized constructive solutions of GKZOK is carried out by maximizing the expected positive result, which takes into account the weight of such factors as the total cost, productivity, efficiency of the technological process of mixing and the number of functional characteristics.

structural-schematic synthesis, screw conveyor-mixer, rotary casing, mixing, morphological analysis, screw working body

Одержано (Received) 12.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 24.10.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

УДК 640.412 UDC 669.1:537.5 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.95-104](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.95-104)

Myroslav Stechyshyn, Prof., DSc., **Mykola Lukyanyuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andriy Martynyuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Olekasandrenko**, Prof., DSc., **Nadiya Stechyshyna**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Khmelnyskyi National University, 11 Instytutska St., Khmelnytskyi, Ukraine
e-mail: miro011951@gmail.com

Increasing the wear resistance of the working bodies of soil processing machines by nitridation in the ignition discharge

The article considers the problem of increasing the wear resistance of the cutting elements of the working bodies of tillage machines by nitriding in a glow discharge.

Solving the problem of increasing the wear resistance of the cutting elements of the working bodies of soil tillage machines reduces the resistance to cutting when tilling the soil, which helps to reduce the traction force of the unit and, in the final version, save fuel.

Nitriding of the studied samples was carried out on the UATR-1 installation, designed for surface modification of parts, tools and equipment by the BATR method or similar diffusion vacuum processes.

It was established that the following main mutually competing processes occur during anhydrous nitriding in a glow discharge: formation of nitrides, diffusional saturation of the surface with nitrogen, and sputtering of the surface layer. The formation of nitrides occurs at low values of the specific energy flow, the surface sputtering process is activated at high voltage values, and the current density is responsible for nitrogen diffusion into the depth of the metal.

The structure and phase composition of nitrided layers is determined by a combination of regime and energy parameters. The ability to control the energy parameters of the armored personnel carrier allows you to significantly expand the area of obtaining nitrided layers with predetermined operational characteristics of parts of machines and equipment while simultaneously reducing the energy consumption of the nitriding process.

The research results showed that the amount of wear of a nitrided tool, compared to a non-nitrided one, decreased by 25-40%.

anhydrous nitriding in glow discharge (ANGD), cutting bodies of soil tillage machines (CBTM), operational and energy parameters of ANGD

Status of the issue and statement of the problem. The weak point of soil tillage machines is the wear resistance of the cutting elements of the working bodies, which has a decisive influence on the quality and efficiency of the technological processes of soil treatment, in the final version on the productivity of the process of growing products of the agro-industrial complex.

The reason for the loss of efficiency of the working bodies of tillage machines is the blunting (change of geometrical parameters) of the cutting elements.

The blunting of the cutting elements of the working bodies of soil tillage machines (ANGD) leads to an increase in fuel consumption due to an increase in the traction force of the unit and a deterioration in the quality of the execution of technological operations: a decrease in the depth of cultivation; reduction in the percentage of weed cutting; deterioration of the grinding of plant remains, etc. [1].

Therefore, special requirements are imposed on ANGD (ploughshares, cultivator paws, harrow discs) from the point of view of the brand of manufacturing material, heat treatment modes, method of surface strengthening, etc. The ANGD material should be wear-resistant, corrosion-resistant, strong and have high impact toughness, because the parts work in a corrosive-abrasive environment and are subjected to significant dynamic loads. Thus, when the plow body hits obstacles in the soil in the form of stones, soil compactions, the load on the plowshare increases by 10 or more times compared to its average value during normal plowing [2].

According to the data of many years of research and analysis of the results of operational tests of various types of ANGD, only in the first year of operation due to deformation with subsequent breakage, about 40% of plowshares, 15% of shelves, 20% of cultivator paws, and 30% of various types of disk cutters fail [2]. Some researchers hypothesize that the main reason for numerous failures is the low fatigue life of the materials from which ANGD parts are made [3].

In work [3], a method of strengthening cultivator paws with metal-ceramic coatings of discrete-variable composition was developed. The operational tests of such paws have established that the durability of the paws strengthened by the developed technology is 1.45 times higher than that of serial ones, and it is guaranteed to work up to 32 hectares of soil.

To ensure the self-organization of the shape of the cutting elements during operation, the technology of strengthening the working organs with concentrated flows of laser radiation energy is proposed. It is shown that when applying the proposed technology, there is a reduction in manufacturing operations and an increase in the wear resistance and durability of parts, as well as the realization of the effect of self-sharpening of cutting elements of ANGD [4].

Today, to strengthen the wings of the cultivators' paws, the technology of hardening with high-frequency current (microwave) or deposition of powder, metal-ceramic coatings is used.

In agricultural engineering, 90% of all strengthening work is induction surfacing. The main disadvantage of this method is the high cost of surfacing alloys [5].

There are also known works on strengthening ANGD by anhydrous nitriding in a glow discharge (CBTM) [6, 7] and applying composite electrolytic coatings (CEC) [8], which made it possible to increase their wear resistance by 30-40%. At the same time, for most regions of Ukraine, one set of parts of working bodies of tillage machines is not enough for the current annual cycle (spring + autumn).

The purpose of the work is to study the influence of the CBTM on the wear resistance of structural steels for the manufacture of ANGD in the interaction of regime (temperature, composition of the saturation medium, pressure of the medium in the gas

discharge chamber and saturation time) and energy (current density and voltage at the electrodes of the gas discharge chamber) parameters.

Research methodology. Nitriding of the studied samples was carried out on the UATR-1 installation, designed for surface modification of parts, tools and equipment by the CBTM method or similar diffusion vacuum processes.

A feature of this installation is the use of anhydrous gas mixtures (a mixture of nitrogen and argon) as a saturating medium in the process of nitriding, which excludes hydrogen embrittlement of the metal surface. The absence of hydrogen in the saturating medium, which is a good metal reducer and neutralizes oxygen, requires the use of particularly pure saturating gases (99.99%) and high tightness of the gas supply system and vacuum chamber.

A power supply unit from an independent source, as well as a switching and control unit for a cyclically switched discharge, have been added to the scheme. In addition, the installation is additionally equipped with heating elements placed in the gas discharge chamber, which made it possible to arbitrarily change the energy parameters - the voltage U and the value of the current density j (the ratio of the current to the total area of the cage and suspension) [9].

Experimental studies of samples for wear resistance were carried out on a universal machine for testing materials for friction, model 2168UMT. The friction scheme is “disc-finger”; contact type – plane-on-plane sliding (the end of the cylindrical sample slides on a flat metal disc; the material of the counterbody is steel SHX15 with a base hardness of HRC61; pressure in the contact zone $p = 16$ MPa; sliding speed $v = 0.1$ m/s [9].

The controlled parameter is linear wear h , which was determined as a change in the linear size of the sample, measured normal to the friction surface, as a result of passing a section of length l .

Research was conducted in two stages. At the first stage, they were performed on samples in order to optimize nitriding parameters to achieve optimal wear resistance characteristics of the modified surface layer. At the second stage, research was carried out on full-scale samples in field conditions.

For the study of the influence of CBTM, structural steels of the following brands were selected: 45-carbon high-quality, 40Cr, 9CrC, 9Cr18 - chrome and 38CrMUA - high-quality chrome-aluminum with molybdenum, as the most often used for nitriding in the glow discharge.

Based on the experience of experimental and production practice, the following parameters of the CBTM were adopted to optimize the number of experiments: temperature $T=833$ K, nitriding time - 4 h, composition of the gas mixture 75% N_2 + 25% Ar. An arbitrary voltage value was chosen, and the current density ($j=I/S$, where I is the current strength, A; S is the surface area of the cathode, which is equal to the sum of the areas of the suspension and the samples, m^2) was determined by a combination of an arbitrarily set voltage and gas mixture pressure. We also found the specific power of the electric discharge in the gas discharge chamber $W=UI/S$, kW/ m^2 . The values of the CBTM parameters are given in Table 1.

Metallographic studies of nitrided samples were performed after etching in a 3% alcoholic solution of nitric acid. The thickness of the nitride zone was measured on an RX50M microscope. Microhardness was determined on a DuraScan-20 microhardness tester under a load of 1.0 N, with fixation of microhardness values both on the surface and at a distance from it of 0; 25; 50; 100; 200; 300; 500 microns.

The thickness of the nitride zone was measured using a MIM-10 microscope, which allows quantitative analysis of the phase and structural composition of nitrided surfaces.

Table 1 – Battle Royale Modes with independent parameters

Regime	1*	2	3	4*	5	6	7*	8	9
Pressure p, Pa	53,2			106,4			159,6		
High-voltage U, V	1100	820	515	840	515	300	700	515	300
Current density $j, A/m^2$	11,0	7,2	3,2	13,2	7,2	2,8	15,8	12,8	7,2
Specific power $W, kW/m^2$	12,2	5,9	1,65	11,1	3,71	0,84	11,1	6,59	2,2

* Modes are performed with dependent nitriding parameters (without additional heating of samples)

Source: developed by the authors

X-ray phase analysis of nitrided samples was performed on a DRON-3 diffractometer in filtered radiation of an iron anode in the range of q angles from 20° to 100° with a scan step of 0.1° and an exposure time of 10 s. X-ray imaging was carried out from the surface to the depth of the nitrided layer.

Research results. The presented work is a continuation of the cycle of works in which the mechanisms of the processes of formation of nitrided surface layers of metals are considered in the interaction of mode (temperature, composition of the saturation medium, pressure of the medium in the gas discharge chamber and saturation time) and energy (current density, voltage and power at the electrodes of the gas discharge chamber) saturation parameters. Based on the obtained experimental data, it is planned to formulate provisions for the practical use of a fundamentally new technological process with optimization of the combination of its mode and autonomous saturation parameters. At the same time, the authors of the work rely on the developed fundamentally new energy model of the nitriding process in the glow discharge, the main feature of which is the provision of prioritizing those sub-processes in strengthening the surface layers of metals that are most appropriate in the specific conditions of operation of the parts [10].

For greater clarity, the set of technological processes carried out (Table 1) is represented by a diagram (Fig.1), where the numbers near the points correspond to the number of the corresponding mode, and the lines connecting them correspond to the same pressures of the gas mixture: $p_1=53.2 Pa$, $p_2=106.4 Pa$ and $p_3=159.6 Pa$. Points 1, 4, 7 correspond to modes conducted without an additional heating source, that is, with interdependent parameters of the CBTM (each pressure of the gas mixture corresponds to a certain combination of voltage and current at the electrodes of the gas discharge chamber).

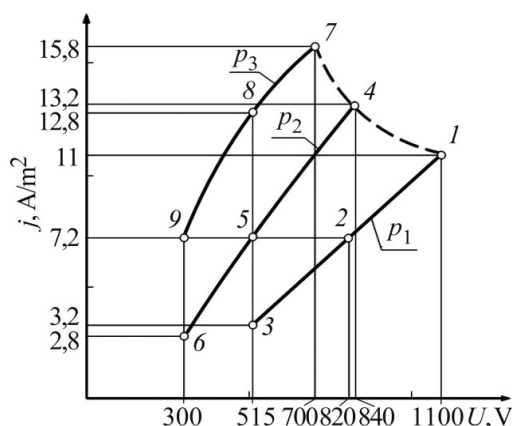


Figure 1 –The nature of changes in energy parameters U and j

Source: developed by the authors

The analysis of the obtained dependence shows (Fig.1) that with the increase in the pressure of the gas mixture $p_3 > p_2 > p_1$ for the CBTM without additional heating, the current increases with a decrease in the voltage in the gas discharge chamber, and the specific power W is approximately the same $11.1...12.1 \text{ kW/m}^2$ and $9.3...10.4 \text{ kW/m}^2$ when changing the shape of the suspension (cathode surface area). The latter is achieved both by automatically changing the current density j and the voltage U (points 1^* , 4^* , 7^* in Fig. 2).

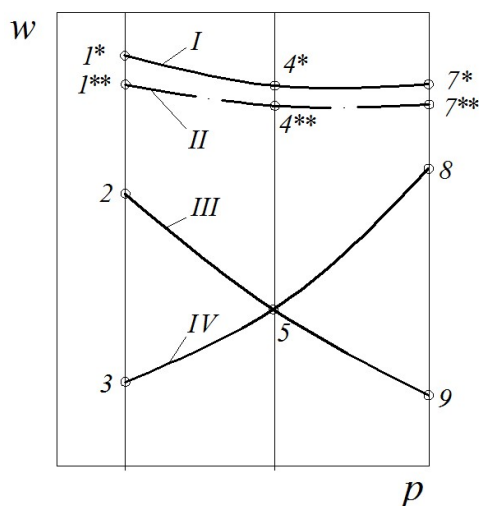


Figure 2 –Dependence of the specific power of the discharge W of the gas mixture impression: I, II – without additional heating; III, IV - with autonomous modes (with additional heating of the camera)

Source: developed by the authors

In the case of an armored personnel carrier with autonomous energy modes, significantly smaller values of j and U are required to maintain a glow discharge in the chamber, for example, points 9 and 7 at pressure p_3 and points 6 and 4 and 3 and 1 at pressures p_2 and p_1 , respectively. At the same time, at $U=\text{const}$ (points 3, 5, 8), an increase in j is necessary to maintain the glow discharge, and at $j=\text{const}$ (points 9, 5, 2), U increases. It should also be noted that at $U=\text{const}$, an increase in pressure leads to an increase in j (points 3, 5, 8), and when $j=\text{const}$, on the contrary, an increase in pressure (points 2, 5, 9) leads to a decrease in U . It follows that the energy parameters are closely related to the pressure of the gas mixture. Therefore, in fig. 2 presents the dependence of the change in the specific power of the glow discharge W on the pressure of the gas mixture p . Curves I, II in Fig. 3 refer to the armored personnel carrier without chamber heating, but with two different suspensions, which indicates the importance of optimizing the suspension design (in option II - an additional series of experiments, energy losses are lower). We have completely different dependencies in the case of an armored personnel carrier with autonomous energy parameters (Fig. 2, curves III, IV). At the same time, when $U=\text{const}$ with increasing pressure (points 3, 5, 8 in Fig. 2), W increases, and when $j=\text{const}$ (points 2, 5 and 9 in Fig. 2), on the contrary, W decreases. Fig. 2 also shows that taking into account the energy parameters of the armored personnel carrier makes it possible to significantly reduce the energy consumption of the nitriding process.

The authors of the work [11] note that the pressure of the gas medium, which corresponds to the maximum specific power of the discharge, ensures obtaining the nitrided layer of the greatest thickness. In our experiments conducted on cylindrical samples, completely different results were obtained (Fig. 7, curves I and II). By the way, similar results were obtained in [12] on ellipsoidal samples, which ensured the absence of field concentrators. In any case, the question of the influence of the energy characteristics of the glow discharge on the physicochemical characteristics of the nitrided layer remains unresolved and requires further research.

The data presented in [12] indicate that with a decrease in the specific power of the electric discharge in the gas discharge chamber, the thickness of the h and hN layers also decreases. It is known [10] that the following main processes take place during CBTM: formation of nitrides, diffusional saturation of the surface layer with nitrogen, and sputtering of the surface. The energy levels of the main subprocesses differ significantly. Thus, the formation of nitrides occurs at low energies (modes 3, 6, and 9), and surface sputtering is activated at high voltage values. Thus, the structure and phase composition of nitrated layers is determined by a combination of technological and energetic processes of formation of the nitrated layer. For example, when the power of the energy flow is increased, the previously formed layer of nitrides is sprayed and the process of nitrogen diffusion into the depth of the surface is stimulated. In the case when the flow energy is insufficient to disperse the formed nitride layer hN, it acts as a barrier that prevents the process of diffusion into the inner layers of the metal (mode 9) or gives low indicators of the characteristics of the nitrated layers (modes 3 and 6).

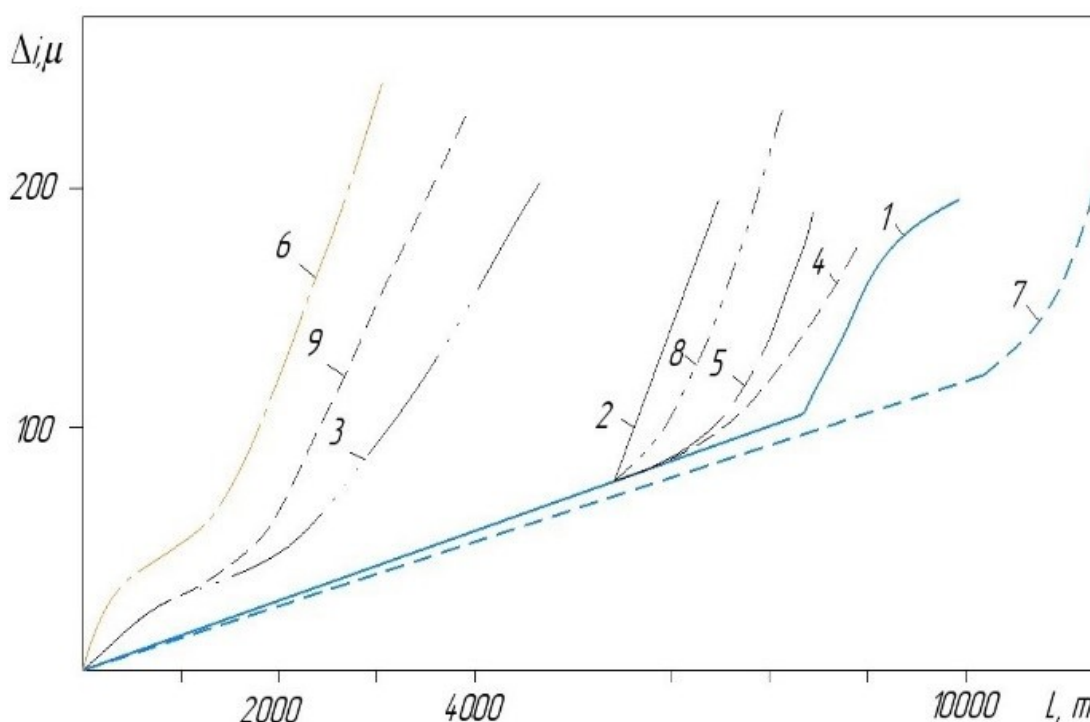


Figure 3 –Wear curves of steel 45 of reinforced armored personnel carriers (the numbers on the curves correspond to the nitriding regimes in Table 1)

Source: developed by the authors

As a result of the experiments, it was found that under conditions of dry friction for surfaces modified with higher energy indicators, the intensity of wear (Fig. 3) decreases, and the time to the onset of catastrophic wear increases significantly. At the same time, with an increase in the content of alloying elements in steel, this pattern becomes more pronounced.

Analogous wear resistance curves were obtained for 40Cr and 38Cr2MUA steels.

The given data make it possible to draw a quite obvious conclusion that the influence of voltage and current density on the characteristics of the modified layer is not only significant, but decisive. Moreover, in the field of energy parameters of the regime, there is a certain limit below which carrying out the CBTM process loses its meaning in general, as it leads to unacceptable results, and this is despite the fact that the values of the regime

characteristics remain constant. This means that traditionally fixed regime parameters (temperature, pressure, gas mixture composition and process duration) do not provide an unambiguous description of the CBTM process, and therefore cannot be the basis for predicting its results.

In the case of B ATP, a nitride layer is formed on the metal surface, which is the ϵ -phase ($\text{Me}_2\text{-3N}$) or γ -phase (Me_4N) and a diffusion zone (zone of internal nitriding – nitrogenous α -solid solution ($\alpha+\text{Me}[\text{N}]$) [12]. The nitride zone containing only the γ -phase is characterized by high plasticity, and the zone containing the ϵ -phase has significantly less plasticity, but higher corrosion resistance. The single-phase nitride zone increases the physical and mechanical properties of the nitrided surface in contrast to (ϵ^+), which has increased fragility compared to the single-phase zone. However, in case of cavitation, erosion or at a high friction speed ($V_T=16$ m/s), the two-phase zone (ϵ^+) increases the stability characteristics of hardened steel surfaces in corrosive-active environments both due to increasing the corrosion resistance of the surface, as well as due to less adhesion of the friction surfaces. In general, the thinner the nitride zone, the more ductile the nitrided layer [13], but the lower the resistance to abrasive wear, especially in dry friction conditions.

Thus, according to [14], for parts operated in corrosive environments and for wear at negligible contact voltages, CBTM should be carried out at the maximum possible values of voltage and current density, which contributes to the formation of the ϵ -phase and, accordingly, we have high corrosion resistance, and also good running-in of friction surfaces. At the same time, in order to avoid the transition of the glowing discharge into an electric spark, the condition $W < W_{kr}$ should be observed, i.e. The specific power of the glow discharge should not exceed the critical specific power of the electric arc discharge. A decrease in voltage and current density leads to an increase in the fraction of the γ -phase, which contributes to an increase in the strength of parts operating under conditions of corrosive-mechanical wear (CMR) in corrosive-active environments [9, 12].

Based on the analysis of previously conducted studies (Table 1 and Fig. 3), the CBTM was carried out according to the regime: the composition of the gas medium is 75% N_2 + 25% Ar, the nitriding temperature is 833 K, the pressure in the discharge chamber is 159.6 Pa, the duration of the process saturation - 6 hours, voltage - 700 V, current density - 15.8 A/m², specific power - 11.1 kW/m². The hardness and surface microhardness of ANGD are shown in Table 2.

Table 2 –Hardness and microhardness of ANGD before and after hardening

№	Working body	Material	Hardness HRC/HV0,1	
			unmodified	modified
1	Disc harrow ("Chamomile" type)	9X18	50/450	40/800
2	Ploughshare	9XC	50/360	42/650
3	Chisel	9XC	50/440	38/650









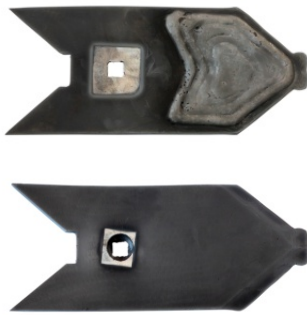
*Numerator before and denominator after CBTM

Source: developed by the authors

Based on the results of hardness measurements on the HRC scale and microhardness HV0.1, it can be concluded that the initial hardness (after quenching) decreased, and the surface hardness (after nitriding) increased. A decrease in total hardness will not have a significant effect on wear resistance, and an increase in surface microhardness will contribute to an increase in wear resistance.

Modification of the tillage tool involves certain stages, which are presented in the table. 3. Together with the modification tool, samples made from the materials of the corresponding tillage tools were subjected to modification.

Table 3– Stages of soil tillage tool modification

Output option	Prepared for modification	The instrument is modified
		
		
		

Source: developed by the authors

The wear resistance of the modified samples, in comparison with the unmodified ones, increased by an average of 1.5 times.

The wear resistance of real nitrogenized samples (the Chamomile-type harrow, ploughshare, and chisel) installed on work units together with non-nitrogenized ones was controlled by taking measurements of the dimensions of the elements in characteristic cross-sections during their wear according to the standard procedure. The research results showed that the amount of wear of a nitrided tool, compared to a non-nitrided one, decreased by 25–40%.

It is obvious that further research should take into account not only the materials of ANGД, but also the conditions of their operation.

Conclusions. 1.The following main mutually competing processes take place during CBТМ: formation of nitrides, diffuse saturation of the surface with nitrogen and sputtering of the surface layer.

2. The formation of nitrides occurs at low values of the specific energy flow, the surface sputtering process is activated at high voltage values, and the current density is responsible for the diffusion of nitrogen into the depth of the metal.

3. The structure and phase composition of nitrided layers is determined by a combination of regime and energy parameters. The ability to control the energy parameters of the armored personnel carrier allows to significantly expand the area of obtaining nitrided layers with predetermined operational characteristics of machine and equipment parts while simultaneously reducing the energy consumption of the nitriding process.

4. Research results showed that the amount of wear of a nitrided tool, compared to a non-nitrided one, decreased by 25-40%.

Literature

1. Bobrytskyi, V.M. (2007). Pidvyshchennia znosostiikosti rizalnykh elementiv robochykh orhaniv gruntoobrobnykh mashyn. *Candidate's thesis*. Natsionalnyi transportnyi universytet. Kyiv [in Ukrainian].
2. Denysenko, M.I. & Voitiuk, V. D. (2016). Zmitsnennia lez gruntoobrobnykh robochykh orhaniv silskohospodarskykh mashyn z utvorenniam efektu samozahostriuvannia. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv. №6*, 175-182 [in Ukrainian].
3. Sainsus, O.D. (2008). Pidvyshchennia dovhovichnosti lap kultyvatoriv kompozytsiinymy pokryttiamy pereminnoho skladu. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kirovohrad [in Ukrainian].
4. Aulin, V. V. & Tykhyi, A. A. (2017). Trybofizychni osnovy pidvyshchennia znosostiikosti i nadiinosti robochykh orhaniv gruntoobrobnykh mashyn z rizalnymy elementamy. Kropyvnytskyi : Lysenko V. F. [in Ukrainian].
5. Borak K. V. Pidvyshchennia nadiinosti robochykh orhaniv gruntoobrobnykh mashyn / K.V. Borak // Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka. 2015. Vyp. 163. S. 120 – 125 [in Ukrainian].
6. Stechyshyn, M.S. Lukianiuk, M.V., Oleksandrenko, V.P., Martyniuk, A.V. & Bilyk, Yu.M. (2020). Znosostiikist lap kultyvatora, shcho modyfikovani azotuvanniam v tliuchomu rozriadi. *Silskohospodarski mashyny: Zb. nauk. statei. Issue 44*, 123-134 [in Ukrainian].
7. Skyba, M.Ye. Stechyshyn, M. S., Oleksandrenko, V. P., Lukianiuk, M.V. & Botvin, M.Yu. (2020). Pidvyshchennia znosostiikosti lap kultyvatora shliakhom modifikatsii azotuvanniam v tliuchomu rozriadi. *Visnyk Lvivskoho Natsionalnoho ahrarnoho universytetu: Ahroinzhenerni doslidzhennia №24*. S. 109-114 [in Ukrainian].
8. Stechyshyn, M.S. Martyniuk, A.V. Korniienko, A.O. & Medvedchuk, N.K. (2020). Zastosuvannia kompozytsiinnykh elektrolitychnykh pokryttiv dlia pidvyshchennia znosostiikosti robochykh orhaniv hruntoobrobnykh mashyn. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho hospodarstv. №22*, 193-199 [in Ukrainian].
9. Stechyshyna, N.M., Stechyshyn, M.S. & Mashovets, N.S. (2022). Koroziiino-mekhanichna znosostiikist detalei obladdannia kharchovykh vyrobnystv: monohrafiia. Khmelnytskyi: KhNU [in Ukrainian].
10. Pastukh, I.M. (2006). Teoriya y praktyka bezvodородnoho azotyrovannia v tleiushchem razriade. Kharkov: Natsionalnyi nauchnyi tsentr «Kharkovskii fizyko–tekhnicheskii institut» [in Ukrainian].
11. Pastukh, Y.M. & Sokolova, H.N. (2013). Enerhetycheskye preduslovyia azotyrovannia v tleiushchem razriade s nezavysymymy parametramy. *Problemy trybolohyy. № 4*, 53–57 [in Ukrainian].
12. Stechyshyn, M.S., Sokolova, H.M. & Bilyk, Yu.M. (2017). Vplyv enerhetychnykh i rezhymnykh parametriv na fazovu strukturu i mikrotverdist ionno–azotovanykh konstruktsiinnykh stalei. *Problemy tertia ta znoshuvannia, №2*, 56-64 [in Ukrainian].
13. Stechyshyn, M.S. Stechyshyna, N.M., Martyniuk, A.V. & Lukyanyuk, M.M. (2018). Strength and Plasticity of the Surface Layers of Metals Nitrided in Glow Discharge. *Materials Science: Springer (USA). 54 (5)*. PP. 55 – 60 [in English].
14. Stechyshyn, M.S., Stechyshyna, N.M., Martyniuk, A.V. & Lukyanyuk, M.M. (2018). Strength and Plasticity of the Surface Layers of Metals Nitrided in Glow Discharge. *Materials Science: Springer (USA). 54 (5)*. PP. 55 – 60 [in English].

М.С. Стечишин, проф., д-р техн. наук, **М.В. Лук'янюк**, доц., канд. техн. наук, **А.В. Мартинюк**, доц., канд. техн. наук, **В.П. Олександренко**, проф., д-р техн. наук, **Н.М. Стечишина**, доц., канд. техн. наук
Хмельницький національний університет, м.Хмельницьк, Україна

Підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин шляхом азотування в тліючому розряді

У статті розглядається проблема підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин азотуванням в тліючому розряді.

Ви рішення проблеми підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин зменшує опір різанню при обробці ґрунту, що сприяє зменшенню тягового зусилля агрегату і в кінцевому варіанті економії пального.

Азотування досліджуваних зразків проводились на установці УАТР-1, призначеній для поверхневої модифікації деталей, інструменту та оснащення методом БАТР або аналогічних дифузійних вакуумних процесів.

Встановлено, що при безводневому азотуванні в тліючому розряді (БАТР) відбуваються такі основні взаємоконкуруючі процеси: утворення нітридів, дифузійне насичення поверхні азотом і розпорощення поверхневого шару. Утворення нітридів відбувається при низьких значеннях питомого енергетичного потоку, процес розпорощення поверхні активізується при високих значеннях напруги, а за дифузію азоту в глибину металу відповідає густина струму.

Структура і фазовий склад азотованих шарів визначається комбінацією режимних і енергетичних параметрів. Можливість керування енергетичними параметрами БАТР дозволяє значно розширити область отримання азотованих шарів із наперед заданими експлуатаційними характеристиками деталей машин і обладнання при одночасному зниженні енергоємності процесу азотування.

Результати досліджень показали що величина зношування азотованого інструменту, в порівнянні з не азотованим зменшилась на 25 – 40 %.

безводне азотування в тліючому розряді (БАТР), ріжучі органи ґрунтообробних машин (РГМ), робочі та енергетичні параметри БАТР

Одержано (Received) 02.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 14.10.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

УДК 631.356.22

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.104-116](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.104-116)

О.Л. Ляшук, проф., д-р техн. наук, **Є.Б. Береженко**, канд. техн. наук

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

e-mail: oleglashuk@ukr.net

О.В. Козаченко, проф., д-р техн. наук

Державний біотехнологічний інститут, м. Харків, Україна

Математична модель переміщення зрізаної гички коренеплодів цикорію в направляючому каналі

На основі аналізу технологічного процесу зрізування гички коренеплодів Г-подібними ножами роторного гичкоріза розроблено математичну модель, яка функціонально описує переміщення зрізаної гички в направляючому каналі гичкозрізувальної машини залежно від конструктивно-кінематичних параметрів робочих органів різального апарату.

На основі рішення математичної моделі отримано рівняння профілю поверхні кожуха направляючого каналу з умов рівних післяударних швидкостей і рівних швидкостей руху зрізаної гички.

Встановлено, що найбільш прийнятним є профіль, у якого кут зіткнення, або кута між напрямком вектора доударної швидкості та дотичною до профілю направляючого каналу в точці удару дорівнює 25 град., при цьому висота профілю направляючого каналу становить 1,2 м. За значення кута між напрямком вектора доударної швидкості та дотичною до профілю направляючого каналу в точці удару 30...35 град. початкова швидкість руху зрізаної частинки гички знаходиться у діапазоні 9,5...10,5 м/с, а на виході з вихідної горловини – 2,5...3,5 м/с, при цьому час переміщення гички по направляючому каналу становить 0,15...0,2 с.

коренеплоди цикорію, процес, зрізана гичка, модель, профіль, параметри

© О.Л. Ляшук, Є.Б. Береженко, О.В. Козаченко, 2023

Постановка проблеми. Першим етапом процесу збирання крупних коренеплодів є енерговитратна технологічна операція зрізування основного масиву гички з їх головок, наявний вміст якої у зібраних коренеплодах значно знижує якість сировини та вихід продуктів їх переробки [1, 2].

Одним з напрямків підвищення ефективності процесу збирання гички коренеплодів, який базується на вирішенні комплексної науково-технічної задачі, є пошук нових конструктивних схем робочих органів і створених на їх базі удосконалених енергоощадних гичкозбиральних модулів самохідних бункерних коренезбиральних машин [3, 4], що вирішується шляхом усунення в конструктивно-компонувальній схемі гичкозбирального модуля проміжної ланки або транспортного пристрою, виконаного у вигляді шнекового конвеєра [5, 6].

Це дозволить усунути проміжну операцію переміщення зрізаної гички шнековим конвеєром на зібране поле, яка забезпечується та реалізується внаслідок системного підходу до удосконалення конструктивних особливостей робочих органів шляхом ефективного моделювання та побудови їх компоновальних схем, що утворюють гичкозбиральний модуль транспортної системи самохідної бункерної коренезбиральної машини [7-9]. Крім того, гичка коренеплодів є одним із джерел невитратного виробництва сидератів або добрив, внесення яких шляхом її розкидання на поверхню поля та заробляння у ґрунтове середовище сприяє підвищенню родючості ґрунту [10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Борис М.М. у праці [11] розробив математичну модель процесу безкопінного зрізування гички коренеплодів, за допомогою якої є можливість розрахувати прогнозовані відходи цукроносної маси (цукрові буряки), або втрати коренеплодів (кормові буряки) та залишки гички на головках коренеплодів з розрахунку одиниці зібраної площі.

Також ним було обґрунтовано, що раціональними параметрами роботи експериментальної гичкозбиральної машини для безкопінного зрізування гички коренеплодів є робоча швидкість машини до 2 м/с та частоти обертання роторного гичкоріза у межах від 700 до 800 об/хв.

Чорновол М.І. і Свирень Н.О. [12] за результатами теоретичного аналізу безкопінного зрізування гички коренеплодів побудували номограму для визначення параметрів ротора гичкоріза.

На основі теоретичного аналізу було встановлено, що практичний радіус роторного гичкоріза знаходиться в межах 0,3...0,35 м.

Мартинів В.М. досліджував вплив висоти зрізування гички на показники якості збирання гички [13]. Також в [14] на основі проведеного аналізу процесу взаємодії ножа роторного гичкоріза з пучком гички ним було встановлено оптимальні співвідношення між основними конструктивними параметрами ножа, а також маси і моменту інерції ножа, що забезпечують якісне безкопінне зрізування гички і головок коренеплодів.

Проте наведені результати відомих теоретично-експериментальних досліджень не в повному обсязі враховують особливості критеріальної оцінки кожного з етапів виконання технологічного процесу зрізування основного масиву гички запропонованими удосконаленими робочими органами гичкозбирального модуля та наступним послідовним переміщення подрібненої гички в направляючому каналі.

Тому виникає потреба в розробленні та дослідженні нових математичних моделей, аналіз яких забезпечать виконання поставленої задачі на основі уточненого дослідження технологічного процесу взаємодії робочих органів гичкозбирального модуля з гичкою та її гарантованого переміщення до фартуха та укладання на поверхню поля.

Постановка завдання. Завданням дослідження є розробка аналітичної моделі, яка характеризує процес переміщення зрізаної гички в направляючому каналі гичкозрізувальної машини та обґрунтування його профілю з умов рівних післяударних швидкостей і рівних швидкостей руху зрізаної гички, які забезпечують найбільш сприятливі умови для усунення втрат зрізаної гички на шляху її переміщення від вхідного до вихідного отвору направляючого каналу.

Викладення основного матеріалу. Показники якості зрізування гички коренеплодів ножами роторного гичкоріза та енергетичні показники переміщення зрізаної гички в більшості випадків визначаються вибором профілю дугоподібного кожуха, або адекватного профілю направляючого каналу [15].

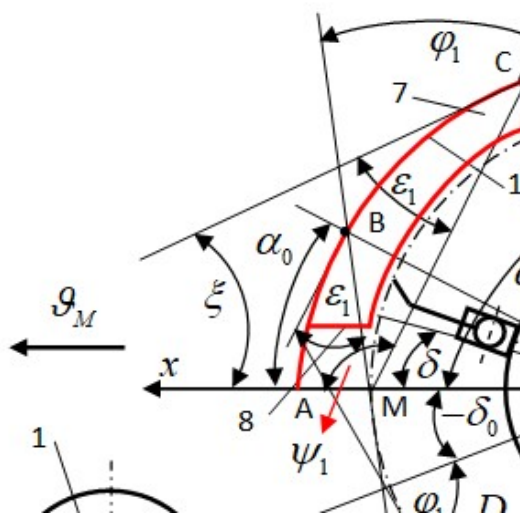
Для математичного моделювання, або вибору профілю кожуха направляючого каналу гичкозбирального модуля розглянемо складену розрахункову схему, яку наведено на рис. 1.

Відомо, що гичка 5 (рис. 1) коренеплодів 6 зрізується ножами 3 роторного гичкоріза 2 на куті його повороту, який близький до кута рівного $\pi/2$ [16].

Після зрізування, частинки гички за рахунок тиску повітряного потоку, який створений обертанням ножів роторного гичкоріза з кутовою швидкістю ω_n , переміщується до вхідної горловини 8 та співударяється з поверхню направляючого кожуха в різних її місцях (точках) по довжині профілю внутрішньої поверхні 10 направляючого каналу 7.

профілю дугоподібного кожуха, або адекватного проф

Для математичного моделювання профілю



1 – опорне колесо; 2 – роторний гичкоріз; 3 – Г-подібний ніж; 4 – барабан ротора; 5 – гичка коренеплодів; 6 – коренеплід; 7 – направляючий канал; 8, 9 – вхідна та вихідна горловина відповідно; 10 – внутрішня бокова поверхня профілю направляючого каналу

Рисунок 1 – Схема до розрахунку профілю направляючого каналу

Джерело: розроблено авторами

Тому необхідно, щоб по всій довжині профілю внутрішньої поверхні направляючого каналу виконувалася умова, яка забезпечує гарантований післяударний рух гички та її вивантаження через вихідний отвір 9 (точка С) направляючого каналу до фартуха (на схемі фартух не показано).

Рівняння профілю направляючого каналу находимо з умови, за якої мінімальна за геометричними розмірами зрізана ножем гичка (або гичка мінімальної маси) сходила з поверхні ножа при повороті роторного гичкоріза на заданий кут повороту, а вся наступна гичка більших геометричних розмірів (або гичка більшої маси) – при повороті роторного гичкоріза на кут повороту більший за заданий на мінімальне значення.

Зрізана ножами ротора гичка з доударною швидкістю польоту \mathcal{G}_0 , співударяючись з поверхнею направляючого каналу, втрачає частину своєї кінетичної енергії згідно з теорією удару та набуває післяударну швидкість руху \mathcal{G}_n , яка визначається за формулою

$$\mathcal{G}_n = \frac{dL_B}{dt} = \mathcal{G}_0 [\cos \varepsilon_1 - (1 - k_g) f_m \sin \varepsilon_1], \quad (1)$$

де L_B – переміщення зрізаної частинки гички, м;

\mathcal{G}_0 – швидкість польоту зрізаної гички до співудару з поверхнею направляючого каналу, м/с;

ε_1 – кут між напрямком вектора доударної швидкості \mathcal{G}_0 та дотичною до профілю направляючого каналу в точці удару, град.

k_g – коефіцієнт відновлення до ударної швидкості;

f_m – коефіцієнт тертя гички по матеріалу внутрішньої поверхні направляючого каналу.

Приймаючи час удару гички безкінцево малим за якого $k_g = 0$ з рівняння (1) визначаємо значення кута ε_1 , за якого можливий рух гички після її співудару з поверхнею направляючого каналу, при цьому

$$\varepsilon_1 \leq (\pi / 2) - \varphi_m, \quad (2)$$

де φ_m – кут тертя гички по матеріалу направляючого каналу, рад.

У разі неоптимального вибору профілю направляючого каналу частина зрізаної ножами роторного гичкоріза гички може, не досягаючи вихідної горловини, розкидатися по поверхні поля у захисну зону рядка коренеплодів. Цей недолік при виконанні умови $\varepsilon_1 \leq (\pi / 2) - \varphi_m$ усувається шляхом збільшення кутової швидкості ω_n ножів і, як наслідок, швидкості \mathcal{G}_0 .

Проте на практиці кутову швидкість ω_n ножів встановлюють з умови забезпечення якісного безпідпирного зрізування гички [17, 18]. Будь-яке ж збільшення ω_n призводить до зростання споживаної роторним гичкорізом потужності на опір повітря та надання додаткової кінетичної енергії гичці. Тому нормальне збирання гички повинно досягатися не за рахунок збільшення оборотів ножа, а обґрунтуванням профілю направляючого каналу.

Для подальшого аналізу розглянемо процес руху гички масою m_c по поверхні направляючого каналу (рис. 2.) та визначимо сили, які діють на її частинку. При цьому на частинку гички масою m_c діють такі сили: сила тяжіння частинки маси гички $P = m_c g$, Н; сила тертя гички по внутрішній поверхні направляючого каналу F_m , Н; сила нормальної реакції N_n , Н; сила дії повітряного потоку F_n , Н; сила опору повітряного середовища F_c , Н.

збільшення оборотів но
 я подальшого аналі
 ючого каналу та визна'

Рисунок 2 – Схема сил, які діють на частинку гички під час її руху

Джерело: розроблено авторами

Складемо диференціальні рівняння руху частинки зрізаної гички в формі рівнянь Ейлера для загального випадку:

$$\left. \begin{aligned} m_z \frac{d\mathcal{G}}{dt} &= F_n - F_m - F_c - m_z g \sin \xi; \\ m_z \rho_k \left(\frac{dL_B}{dt} \right)^2 &= N_n + m_z g \cos \xi \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

де \mathcal{G} – швидкість руху частинки гички, м/с;

$d\mathcal{G}/dt$ – прискорення руху частинки гички, м/с²;

ξ – кут між дотичною до профілю направляючого каналу та віссю Ox , град.;

ρ_k – кривина кривої профілю направляючого каналу.

При цьому:

- кривина кривої ρ_k профілю направляючого каналу, сила дії повітряного потоку F_n , сила опору повітряного середовища F_c визначаються за формулою:

$$\rho_k = \frac{|\ddot{x}\dot{z} - \dot{x}\ddot{z}|}{\sqrt{(\dot{x}^2 + \dot{z}^2)^2}} = \frac{|\ddot{x}\dot{z} - \dot{x}\ddot{z}|}{(\dot{x}^2 + \dot{z}^2)\sqrt{(\dot{x}^2 + \dot{z}^2)}}; \quad (4)$$

$$F_n = 0,5k_o S_z \gamma_n \left(\mathcal{G}_{n,n} - \frac{dL_B}{dt} \right)^2 \sin \left(\mathcal{G}_{n,n} - \frac{dL_B}{dt} \right); \quad (5)$$

$$F_c = 0,5k_o S_z \gamma_n \left(\frac{dL_B}{dt} \right)^2, \quad (6)$$

де k_o – коефіцієнт аеродинамічного опору;

S_z – площа перерізу Міделя, або площа січення гички, м²;

γ_n – щільність повітря, кг/м³;

$\mathcal{G}_{n,n}$ – швидкість повітряного потоку, м/с;

Приймаємо умову, що дія сили повітряного потоку F_n направлена в сторону переміщення частинки гички, тобто F_n є позитивною силою.

Тоді з врахуванням швидкості витання частинки \mathcal{G}_g (м/с), яка визначається за формулою $\mathcal{G}_g = \sqrt{2m_z g / k_o S_z}$ [16] залежність (5) набуде вигляду

$$F_n = m_z g \left(\mathcal{G}_{n,n} - \frac{dL_B}{dt} \right)^2 \sin \left(\mathcal{G}_{n,n} - \frac{dL_B}{dt} \right) / \mathcal{G}_g^2, \quad (7)$$

або

$$F_n = \frac{k_o S_z}{2} \left(\vartheta_{n,n} - \frac{dL_B}{dt} \right)^2 \operatorname{sign} \left(\vartheta_{n,n} - \frac{dL_B}{dt} \right). \quad (7^*)$$

Силу нормальної реакції N_n визначимо з другого рівняння системи (3), враховуючи, що $F_m = f_m N_n$. При цьому отримаємо:

$$N_n = m_z k_o \left(\frac{dL_B}{dt} \right)^2 - m_z g \cos \xi; \quad (8)$$

$$F_m = m_z f_m \left(k_o \left(\frac{dL_B}{dt} \right)^2 - g \cos \xi \right). \quad (9)$$

Тоді підставивши (7) – (9) у першу залежність системи (3), після перетворення та спрощення, отримуємо диференціальне рівняння руху частинки гички, зрізаної Г-подібними ножами роторного гичкоріза у направляючому каналі

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{k_o S_z \gamma_n}{2m_z} g (\vartheta_{n,n} - 2\vartheta_{n,n} \vartheta) \operatorname{sign} (\vartheta_{n,n} - \vartheta) - f_m \left[k_o \vartheta^2 - g \left(\cos \xi - \frac{\sin \xi}{f_m} \right) \right]. \quad (10)$$

Розроблене диференціальне рівняння (10) є вихідним положенням для подальшої розробки профілю внутрішньої поверхні направляючого каналу.

Відомо, що залежно від умов і характеру впливу частинок матеріалу на поверхню дотику та їх руху можуть бути змодельовані види поверхонь, по яких транспортується матеріал: рівних післяударних швидкостей; рівних швидкостей руху матеріалу; постійної кривизни; рівного тиску; вільного польоту матеріалу, рівноуповільнених швидкостей.

У нашому випадку для переміщення зрізаної і подрібненої гички 5 (рис. 1) коренеплодів 6 по внутрішній боковій поверхні 10 у задану точку С, або вивантаження гички через вихідну горловину 9 направляючого каналу 7 найбільш прийнятним є профіль поверхні направляючого каналу за принципом рівних післяударних швидкостей і рівних швидкостей руху зрізаної гички.

На першому етапі розглянемо розробку профілю направляючого каналу за принципом рівних післяударних швидкостей.

Приймаємо умову руху зрізаної гички згідно з (1) та те, що гичка 5 (рис. 1) коренеплодів 6 зрізується ножами 3 роторного гичкоріза 2 на куті його повороту, який близький до кута рівного $\pi/2$. При цьому зрізана гичка має різну довжину різання та під час свого переміщення до вихідної горловини співударяється з поверхнею направляючого каналу в різних точках, які належать площині його профілю по всій довжині.

Рівняння профілю направляючого каналу за принципом рівних післяударних швидкостей визначимо із умови, за якої кут профілю ε_1 (рис. 1) є постійним по всій довжині профілю та менший за граничний.

Згідно з рис. 1 маємо такі співвідношення:

$$\begin{cases} \psi_1 = \pi - \varepsilon_1 - \xi = \varphi_1 + \delta; \\ x = 0,5D_p \cos \delta + \frac{z - 0,5d_\sigma + l_n}{\operatorname{tg}(\varphi_1 + \delta)}; \\ \operatorname{tg} \xi = -dz / dx; \quad dz / dx = \operatorname{tg}(\varepsilon_1 + \varphi_1 + \delta) \end{cases}, \quad (11)$$

де φ_1 – кут між напрямком вильоту гички з Г-подібного ножа та діаметром

роторного гичкоріза D_p , град.;

δ – кут повороту Г-подібного ножа, або ротора гичкоріза, град.;

d_δ – діаметр барабана роторного гичкоріза, м;

l_n – довжина Г-подібного ножа, м.

Запишемо диференціальне рівняння (2.34) у полярних координатах, при цьому

$$x = \rho_c \cos \alpha; \quad z = \rho_c \sin \alpha, \quad (12)$$

де $\rho_c = OC$ – радіус-вектор точки C , м;

α – кут між радіусом-вектором точки C та віссю Ox , град.

Тоді, враховуючи (12) друга рівність (11) після перетворення матиме вигляд

$$\varphi_1 + \delta = \alpha + \arcsin\left(\frac{(d_\delta + l_n) \sin \varphi_1}{2\rho_c}\right), \quad (13)$$

а третє диференціальне рівняння системи (11) із врахуванням отриманої залежності (13) та після проведення математичного перетворення і спрощення запишеться у вигляді

$$\frac{dz}{dx} = \left(1 + \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_c}{d\alpha} \operatorname{tg} \alpha\right) / \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_c}{d\alpha} \operatorname{tg} \alpha, \quad (14)$$

або

$$d\alpha = \frac{\left[(0,5d_\delta + l_n) \sin \varphi_1 + \operatorname{tg} \varepsilon_1 \sqrt{\rho_c^2 - (0,5d_\delta + l_n)^2 \sin^2 \varphi_1}\right] d\rho_c}{\rho_c \sqrt{\rho_c^2 - (0,5d_\delta + l_n)^2 \sin^2 \varphi_1} - (0,5d_\delta + l_n) \sin \varphi_1 \operatorname{tg} \varepsilon_1}. \quad (15)$$

Після інтегрування лівої частини (15) від α_0 до α , а правої частини від $MC = \rho_{c0}$ до ρ_c , отримаємо рівняння профілю кривини поверхні направляючого каналу в полярних координатах

$$\alpha = \alpha_0 + \operatorname{tg} \varepsilon_1 \ln \left| \frac{\sqrt{\rho_c^2 - \Theta^2} - \Theta \operatorname{tg} \varepsilon_1}{\sqrt{\rho_{c0}^2 - \Theta^2} - \Theta} \right| + \arccos \frac{\Theta}{\rho_c} - \arccos \frac{\Theta}{\rho_{c0}}, \quad (16)$$

де $(0,5d_\delta + l_n) \sin \varphi_1 = \Theta$.

У рівнянні (16) невизначеним є лише кут профілю поверхні ε_1 направляючого каналу. Цей кут ε_1 регламентує положення за якого частинки зрізаної гички масою m_c , які знаходяться в найгіршому стані при надходженні до внутрішньої поверхні направляючого каналу, як до поверхні вхідної горловини з параметрами ρ_{c0} , α_0 , так і до поверхні вихідної горловини з параметрами ρ_c , α завжди мали умову, за якої $\mathcal{G} > 0$ та $N_n > 0$.

Визначення кута профілю поверхні ε_1 направляючого каналу проведемо наступним чином. Запишемо рівняння (10) прискорення руху частинки зрізаної гички масою m_c у полярних координатах

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \rho_c}{dt^2} = & \left(\frac{d\rho_c}{dt}\right)^2 \frac{\Theta \left(\Theta + \operatorname{tg} \varepsilon_1 \sqrt{\rho_c^2 - \Theta^2} - f_m \rho_c^2 \operatorname{tg} \varepsilon_1\right)}{\rho_c \sqrt{\rho_{c0}^2 - \Theta^2} \left(\sqrt{\rho_{c0}^2 - \Theta^2} - \Theta \operatorname{tg} \varepsilon_1\right)} - \frac{g}{\rho_c \left(\sqrt{\rho_{c0}^2 - \Theta^2} - \Theta \operatorname{tg} \varepsilon_1\right)} \times \\ & \times \left[\left(\sqrt{\rho_{c0}^2 - \Theta^2} - \Theta \operatorname{tg} \varepsilon_1\right) (\sin \alpha + f \cos \alpha) - \left(\Theta + \operatorname{tg} \varepsilon_1 \sqrt{\rho_{c0}^2 - \Theta^2}\right) (\sin \alpha - \cos \alpha) \right] \end{aligned} \quad (17)$$

Необхідно зазначити, що кут α , або кут між радіусом-вектором точки C та віссю Ox визначається із рівняння (16).

При цьому початковими вихідними умовами є

$$\left. \begin{aligned} \rho_{c0} &= R_p + b_k + \Delta_{min}; \quad \alpha_0 = \varphi_1 + \delta_0 \arcsin(\Theta / \rho_{c0}); \\ \delta_0 &\leq 0; \quad \dot{\rho}_{co} = \mathcal{G}_n \left[(\rho_c^2 - \Theta^2 - \Theta \operatorname{tg} \varepsilon_1) / \rho_{co} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varepsilon_1} \right] (\cos \varepsilon_1 - f_m \sin \varepsilon_1) \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

де b_k – найбільша ширина направляючого каналу, м;

Δ_{min} – мінімально допустимий зазор між зовнішньою поверхнею направляючого каналу та твірною роторного гичкоріза, м;

δ_0 – кут повороту барабана роторного гичкоріза за якого відбувається сходження зрізаної гички з Γ -подібного ножа, град.

На другому етапі розглянемо обґрунтування форми профілю направляючого каналу за принципом рівних швидкостей руху зрізаної і подрібненої гички 5 (рис. 1) коренеплодів 6, яка переміщується по внутрішній частині 10 направляючого каналу 7 та післяударної швидкості частинки зрізаної гички в будь-якій точці C , яка належить профілю кривої довжиною AC .

Згідно з (1) та прийнятої умови, що коефіцієнт відновлення доударної швидкості дорівнює нулю, або $k_g = 0$, післяударна швидкість руху частинки зрізаної гички коренеплодів для абсолютно непружного тіла буде визначатися за формулою

$$\mathcal{G}_n = \mathcal{G}_n (\cos \varepsilon_1 - f_m \sin \varepsilon_1), \quad (19)$$

де \mathcal{G}_n – колова швидкість руху Γ -подібного ножа, за якої відбувається сходження зрізаної частинки гички з його ріжучої поверхні, м/с.

Запишемо в (1) значення післяударної швидкості \mathcal{G}_n частинки зрізаної гички в будь-якій точці C , яка належить профілю кривої довжиною AC та її першої похідної $d\mathcal{G}_n / dt$, які визначимо з залежності (19).

При цьому маємо такі співвідношення:

$$\sin \xi = \frac{-\frac{dz}{dt}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}}; \quad \cos \xi = \left(\sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \right)^{-1}; \quad k_g = \sqrt[3]{1 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}; \quad \frac{d\mathcal{G}_n}{dt} = \frac{-\mathcal{G}(d\mathcal{G})}{\sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} dx} \leq 0. \quad (20)$$

Визначимо в (20) значення z' , або швидкість переміщення частинки зрізаної гички відносно осі Oz та другої похідної z'' , або прискорення руху частинки гички відносно осі Oz

$$z' = \frac{dz}{dx}; \quad z'' = \frac{d^2z}{dx^2}. \quad (21)$$

Враховуючи (17) і (20), (21) та після перетворення і спрощення залежності, отримаємо диференціальне рівняння профілю направляючого каналу, який встановлено за принципом рівних швидкостей

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{-\sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \left[g \left(f_m + \frac{dz}{dt} \right) + \mathcal{G} \left(\sqrt{(x^2 + z^2) - (0,5D_p \sin \varphi_1)^2} \eta + 0,5D_p \sin \varphi_1 \lambda \right) \mu \right]}{(x^2 + z^2) \sqrt{(x^2 + z^2) - (0,5D_p \sin \varphi_1)^2} [\mathcal{G}(f_m \mathcal{G} + \mu)]}, \quad (22)$$

де $\eta = z - x \frac{dz}{dt}$; $\lambda = x + z \frac{dz}{dt}$;

$$\mu = \frac{\mathcal{G}_n \left[\begin{array}{l} f_m \left(\sqrt{(x^2 + z^2) - (0,5D_p \sin \varphi_1)^2} \left(x + z \frac{dz}{dt} \right) - \right. \\ \left. -0,5D_p \sin \varphi_1 \eta \right) \\ - \left(\sqrt{(x^2 + z^2) - (0,5D_p \sin \varphi_1)^2} \left(z - x \frac{dz}{dt} \right) + 0,5D_p \sin \varphi_1 \left(x + z \frac{dz}{dt} \right) \right) \end{array} \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 (x^2 + z^2)}};$$

$$\mathcal{G} = \frac{\mathcal{G}_n \left[\begin{array}{l} f_m \left(\sqrt{(x^2 + z^2) - (0,5D_p \sin \varphi_1)^2} \left(x + z \frac{dz}{dt} \right) - \right. \\ \left. -0,5D_p \sin \varphi_1 \eta \right) \\ + \left(\sqrt{(x^2 + z^2) - (0,5D_p \sin \varphi_1)^2} \left(z - x \frac{dz}{dt} \right) + 0,5D_p \sin \varphi_1 \left(x + z \frac{dz}{dt} \right) \right) \end{array} \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 (x^2 + z^2)}}.$$

Отримане диференціальне рівняння (22) буде забезпечувати рівність післяударної швидкості та швидкості руху частинки зрізаної гички масою m_c в будь-якій точці профілю внутрішньої поверхні направляючого кожуха незалежно від того, у якій точці частинки гички співударялися з цією поверхнею.

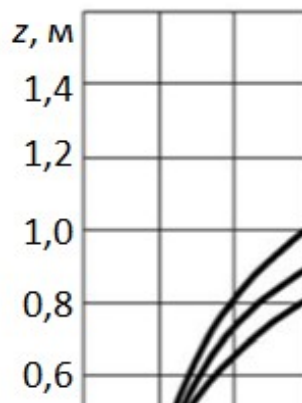
Диференціальне рівняння (17) профілю направляючого каналу вирішується за початкових умов (18). При цьому в диференціальному рівнянні (17) необхідно визначити раціональний кут $\varepsilon_{1paц.}$ за якого забезпечується переміщення зрізаної частинки гички по внутрішній боковій поверхні профілю направляючого каналу до його вихідної горловини в точку С.

Диференціальне рівняння (22) вирішується за початкових умов x_0 , z_0 і dz_0/dt та дотримання на кожному кроці інтегрування умови $N_n = m_c k_o (dL_B/dt)^2 - m_c g \cos \xi$, за якої $N_n \geq 0$, або безвідривного руху частинок гички по поверхні профілю направляючого каналу.

Шляхом підстановки конструктивних і кінематичних параметрів роторного гичкоріза в розроблені диференціальні рівняння (17) і (22) та їх рішення методом Рунге-Куты за допомогою програмного забезпечення було визначено кутові параметри профілю направляючого каналу.

У результаті рішення диференціальних рівнянь профілю направляючого каналу було встановлено, що за вхідних даних параметрів роторного гичкоріза, а саме діаметра роторного гичкоріза $D_p = 0,35 \dots 0,4$ м, частоти обертання роторного гичкоріза $\omega = 62,8$ рад/с (колова швидкість руху Г-подібного ножа $\mathcal{G}_n = 11,0 \dots 12,6$ м/с), $\Delta_{min} = 0,045$ м, коефіцієнта тертя $f_m = 0,95$, кута $\varphi_1 = 85$ град, або кута між напрямком вильоту зрізаної гички з Г-подібного ножа та біжучим радіусом роторного гичкоріза R_p , кута повороту Г-подібного ножа, або роторного гичкоріза ($-\delta_0 = 8$ град.), раціональний кут між напрямком вектора доударної швидкості \mathcal{G}_0 та дотичною до профілю направляючого каналу в точці удару знаходиться в діапазоні $\varepsilon_{1paц.} = 30 \dots 35$ град.

На рис. 3 наведено графічне відтворення залежності зміни дальності вертикального переміщення гички в направляючому каналі від зміни абсциси Ox , при цьому можна констатувати, що:



1, 2, 3 – відповідно, кут зіткнення $\varepsilon_{10} = 35^\circ, 25^\circ$ і 15°

Рисунок 4 – Залежність зміни висоти транспортування зрізаної гички від абсциси x

Джерело: розроблено авторами

- мінімальна висота профілю $z_1 \leq 1$ м направляючого каналу досягається за кута зіткнення $\varepsilon_{10} = 35$ град., крива 1. Але згідно конструктивних особливостей і габаритних розмірів модулів для викопування коренеплодів їх габаритна висота завжди більше 1 м, тобто за такого профілю виникатимуть проблеми конструктивного характеру при проектуванні коренезбиральної техніки;

- профіль, у якого кут зіткнення $\varepsilon_{10} = 15$ град. (крива 3) призводить до значного збільшення матеріаломісткості направляючого каналу та збільшення кутової швидкості ω роторного гичкоріза, або збільшення енергозатрат процесу;

- найбільш прийнятним є профіль, у якого кут зіткнення $\varepsilon_{10} = 25$ град. (крива 2), при цьому висота профілю направляючого каналу становить 1,2 м, яка є достатньою для вільного розміщення за роторним гичкорізом робочих органів наступного модуля для викопування коренеплодів.

Висновки. Розроблені диференціальні рівняння з визначення профілю направляючого каналу дозволяють на аналітичному рівні оптимізувати основні параметри роторного гичкоріза та розмірні параметри розміщення конструктивних елементів гичкозбирального модуля в просторі компоувальної схеми коренезбиральної машини.

За значення кута $\varepsilon_{1\text{рац.}} = 30\dots35$ град. початкова швидкість руху \mathcal{G}_0 зрізаної частинки гички знаходиться у діапазоні $\mathcal{G}_0 = 9,5\dots10,5$ м/с, а на виході з вихідної горловини $\mathcal{G}_c = 2,5\dots3,5$ м/с, при цьому час переміщення гички по направляючому каналу становить $0,15\dots0,2$ с.

За значення кута ε_1 більше ніж $30\dots35$ град. зрізана частинка гички буде відриватися від поверхні направляючого каналу перш ніж переміститися до точки С. При цьому можливий випадок коли частинка гички не буде досягати свого переміщення до вихідної горловини направляючого каналу.

Список літератури

1. Барановський В. М., Береженко Є. Б., Паньків М. Р., Береженко Б. М., Бойко В. А. Технологічні аспекти процесів роботи гичкозбиральних модулів : монографія. Тернопіль : Редакційно-видавничий відділ Тернопільського національного технічного університету імені Івага Пулюя, 2022. 294 с.
2. Boyko Volodymyr. Mathematical model of the process of contact interaction of the copier with the head of the chicory root crop. *Scientific Journal of the TNTU*. Tern.:TNTU, 2023. Vol. 111. No 3. С. 115–125.
3. Віктор Барановський, Галина Герасимчук, Наталя Дубчак, Євген Береженко, Володимир Бойко. Експериментальні дослідження агробіологічних характеристик коренеплодів. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2020. № 24. С 13–21.
4. Барановський В. М. Основи розробки адаптованих транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин : монографія / В. М. Барановський, М. І. Підгурський, М. Р. Паньків, В. В. Теслюк, В. Б. Онищенко. Видавництво Тернопільського національного технічного університету. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2014. 351 с.
5. Гурченко О. П., Барановський В. М. Результати випробування модернізованої коренезбиральної машини МКК-6А. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 1995. Вип. 81. С. 57–60.
6. Барановський В. М. Транспортно-технологічні системи очисних робочих органів адаптованої коренезбиральної машини. *Сільськогосподарські машини*. 2013. С. 18–29.
7. Рамш В. Ю. Аналіз тенденцій розвитку робочих органів для сепарації вороху коренеплодів / В. Ю. Рамш, В. М. Барановський, М. Р. Паньків, Г. А. Герасимчук. *Наукові нотатки*. 2011. № 31. С. 298–305.
8. Сміль М. В., Герасимчук О. О., Барановський В. М. Математичні моделі процесу копіювання головок коренеплодів копіром пасивного дообрізника залишків гички. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2012. Том 1. № 11. С. 206–212.
9. Войтюк Д. Г. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку : підручник; за ред. Д. Г. Войтюка / Д. Г. Войтюк, В. М. Барановський, В. М. Булгаков та ін. К.: Вища освіта, 2005. 464 с.
10. Барановський В. М. Результати теоретично-експериментальних досліджень секундної подачі вороху коренеплодів. *Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2008. Том 1. С. 111–118.
11. Борис М.М. Обґрунтування конструктивної схеми машини для відокремлення гички цукрових буряків. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2012. № 11. Т. 1(65). С. 98–102.
12. Булгаков В.М., Черновол М.И., Свирень Н.А. Теория свеклоуборочных машин : монография. Кировоград: "КОД", 2009. 256 с.
13. Мартынов В.М. Разработка устройства для уборки ботвы кормовой свеклы : дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук : 05.20.11 . Харьков, 1989. 202 с.
14. Volodymyr Boyko. The results of the study of the cutter of the remains of root crops haulm / Boyko Volodymyr, Viktor Baranovsky, Vitalii Pankiv, Volodymyr Onyshchenko, Sergey Marinenko. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. 2023, № 1 (109). P. 99–109.
15. Барановський В.М., Виговський А.Ю., Сторожук І.М., Паньків В.Р. Розрахунок параметрів робочих органів гичкозбиральних машин : монографія. К.: Компринт, 2015. 242 с.
16. Experimental research of the module for gathering plant of chicory roots / E. Berezhenko, M. Pankiv, Jan Jobbagy, V. Berezhenko *Scientific Journal of TNTU*. Ternopil, 2021. No. 1 (101). P. 56–67.
17. Baranovsky V., Potapenko M. Theoretical analysis of the technological feed of lifted root crops. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 51. No. 1/2017. P. 29–38.
18. Baranovsky V., Dubchak N., Pankiv M. Experimental research of stripping the leaves from root crops. *Acta Technologica Agriculturae*. 2017. Vol. 20. No. 3.P. 69–73.

References

1. Baranovskyi, V. M., Berezhenko, Ye. B., Pankiv, M. R., Berezhenko, B. M., Boiko, V. A. (2022). *Tekhnolohichni aspekty protsesiv roboty hychkozbyralnykh moduliv* [Technological aspects of the processes of the work of the ginseng harvesting modules]. Ternopil : Redaktsiino-vydavnychiy viddil Ternopilskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu imeni Ivaha Puliuia [in Ukrainian].

2. Boyko Volodymyr (2023). Mathematical model of the process of contact interaction of the copier with the head of the chicory root crop. *Scientific Journal of the TNTU. Tern.:TNTU, Vol. 111. No 3. P. 115–125* [in English].
3. Viktor Baranovskyi, Halyna Herasymchuk, Natalia Dubchak, Yevhen Berezhenko, Volodymyr Boiko. (2020). Eksperymentalni doslidzhennia ahrobiolohichnykh kharakterystyk koreneplodiv [Experimental studies of agrobiological characteristics of root crops]. *Visnyk Lvivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu: ahroinzhenerni doslidzhennia – Bulletin of the Lviv National Agrarian University: agricultural engineering research, № 24, 13–21.* [in Ukrainian].
4. Baranovskyi, V.M., Pidhurskyi, M.I., Pankiv, M.R., Tesliuk, V.V. & Onyshchenko, V.B. (2014). *Osnovy rozrobky adaptovanykh transportno-tekhnologichnykh system korenezbyralnykh mashyn* [Basics of development of adapted transport and technological systems of root harvesting machines]. Vydavnytstvo Ternopilskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Ternopil: TNTU im. I. Puliuia [in Ukrainian].
5. Hurchenko O.P. & Baranovskyi V.M. (1995). Rezultaty vyprobuvannya modernizovanoi korenezbyralnoi mashyny MKK-6A [Test results of the modernized MKK-6A root harvester]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva – Mechanization and electrification of agriculture . Issue 81, 57–60* [in Ukrainian].
6. Baranovskyi, V.M. (2013). Transportno-tekhnologichni systemy ochysnykh robochykh orhaniv adaptovanoi korenezbyralnoi mashyny [Transport and technological systems of cleaning working bodies of the adapted root harvester]. *Silskohospodarski mashyny – Agricultural machinery, 18–29* [in Ukrainian].
7. Ramsh, V.Yu., Baranovskyi, V.M., Pankiv, M.R., Herasymchuk, H.A. (2011). Analiz tendentsii rozvytku robochykh orhaniv dlia separatsii vorokhu koreneplodiv [Analysis of trends in the development of working organs for the separation of a pile of root crops] . *Naukovi notatky – Scientific notes, № 31, 298–305* [in Ukrainian].
8. Smal, M.V., Herasymchuk, O.O. & Baranovskyi, V.M. (2012). Matematychni modeli protsesu kopiiuvannya holovok koreneplodiv kopirom pasyvnoho doobrizchkyka zalyshkiv hychky [Mathematical models of the process of copying the heads of root crops with the copier of the passive trimmer of the remains of the ghee]. *Zbirnyk naukovykh prats Vinnytskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky – Collection of scientific works of the Vinnytsia National Agrarian University. Series: Technical sciences, Vol.1. № 11, 206–212* [in Ukrainian].
9. Voitiuk, D.H. Baranovskyi, V.M., Bulhakovet, V.M. al. (2005). Silskohospodarski mashyny. Osnovy teorii ta rozrakhunku [Agricultural machinery. Basics of theory and calculation] . D. H. Voitiuka (Eds.). Kyiv: Vyscha osvita [in Ukrainian].
10. Baranovskyi, V.M. (2008). Rezultaty teoretychno-eksperymentalnykh doslidzhen sekundnoi podachi vorokhu koreneplodiv [The results of theoretical and experimental studies of the second supply of a pile of root crops]. *Mekhanizatsiia silskohospodarskoho vyrobnytstva – Mechanization of agricultural production, Vol. 1, 111–118.* [in Ukrainian].
11. Borys, M.M. (2012). Obhruntuvannya konstruktyvnoi skhemy mashyny dlia vidokremlennia hychky tsukrovoykh buriakiv [Rationale of the construction scheme of the machine for separating sugar beet pulp]. *Zbirnyk naukovykh prats Vinnytskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky – Collection of scientific works of the Vinnytsia National Agrarian University. Series: Technical sciences, № 11, Vol. 1(65), 98–102.* [in Ukrainian].
12. Bulgakov, V.M., Chernovol, M.Y. & Svyren, N.A. (2009). *Teoriya sveklouborochnykh mashyn* [Theory of beet harvesting machines]. Kyrovohrad: "KOD", 256 s. [in Ukrainian].
13. Martynov, V.M. (1989). Razrabotka ustroystva dlya uborki botvyi kormovoy sveklyi : dis. na soiskanie uch. stepeni kandidata tehniceskikh nauk [Development of a device for harvesting fodder beet tops]. *Candidate's thesis.* Harkov [in Russian]
14. Volodymyr Boyko, Viktor Baranovsky, Vitalii Pankiv, Volodymyr Onyshchenko, Sergey Marinenko. (2023). The results of the study of the cutter of the remains of root crops haulm. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University, № 1 (109), P. 99–109* [in English].
15. Viktor Baranovsky, Maria Pankiv, Oleksiy Kukhar et al. (2022). Results of the experimental investigations of fodder beets harvesting technologies. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. No 2 (106). P. 16–26* [in English].
16. Berezhenko E., Pankiv M., Jobbagy Jan, Berezhenko B. Experimental research of the module for gathering plant of chicory roots / E. Berezhenko, M. Pankiv, Jan Jobbagy, B. Berezhenko *Scientific Journal of TNTU. Ternopil, 2021. No. 1 (101). P. 56–67.*
17. Baranovsky V., Potapenko M. Theoretical analysis of the technological feed of lifted root crops.

- INMATEH – Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 51. No. 1/2017. P. 29–38.
18. Baranovsky V., Dubchak N., Pankiv M. Experimental research of stripping the leaves from root crops. *Acta Technologica Agriculturae*. 2017. Vol. 20. No. 3.P. 69–73.

Oleg Lyashuk, Prof., DSc., **Yevhen Berezhenko**, Phd tech. sci.

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

Oleksiy Kozachenko, Prof., DSc.

State Biotechnological Institute, Kharkiv, Ukraine

Mathematical Model of the Movement of the Cut end of Chicory Roots in the Guide Channel

The increase in the production of root crops of chicory, which is a valuable technical crop, is restrained by the low level of mechanization of the main technological processes of their collection. The increased content of vegetable impurities or the remains of ghee in the collected root crops of chicory significantly reduces the quality of the raw material and, accordingly, the output of its processing products.

On the basis of the analysis of the technological process of cutting root vegetables with L-shaped knives of a rotary vegetable cutter, a mathematical model was developed that functionally describes the movement of the cut vegetable in the guide channel of the vegetable cutting machine depending on the structural and kinematic parameters of the working organs of the cutting apparatus.

On the basis of the solution of the mathematical model, the equation of the profile of the surface of the casing of the guide channel was obtained from the conditions of equal post-shock velocities and equal speeds of movement of the cut-off beam.

It was established that the most acceptable is the profile in which the angle of collision, or the angle between the direction of the pre-impact velocity vector and the tangent to the profile of the guide channel at the point of impact is equal to 25 degrees, while the height of the profile of the guide channel is 1.2 m. For the value of the angle between in the direction of the pre-impact velocity vector and tangential to the profile of the guide channel at the point of impact 30...35 degrees. the initial speed of movement of the cut particle of the string is in the range of 9.5...10.5 m/s, and at the exit from the outlet throat – 2.5...3.5 m/s, while the time of moving the string along the guide channel is 0.15 ...0.2 s.

root vegetables of chicory, process, cut scallion, model, profile, parameters

Одержано (Received) 02.09.2023

Прорецензовано (Reviewed) 23.09.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

М.І. Підгурський, проф., д-р техн. наук

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

e-mail: pidhurskyu@gmail.com

М.М. Борис, доц., канд. техн. наук

Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна

Г.Б. Цьонь, доц., канд. техн. наук

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

Експериментальні дослідження ширини утвореного валка зрізаної гички коренеплодів цикорію

У статті наведено результати перевірки адекватності розробленої аналітичної моделі, яка функціонально описує процес вивантаження зрізаної гички на поверхню зібраного поля шнековим конвеєром гичкозрізувального модуля. На основі обробки експериментального масиву даних отримано рівняння регресії зміни ширини утвореного валка зрізаної гички залежно від швидкості руху модуля, урожайності гички та частоти обертання шнека.

Встановлено, за швидкості руху модуля у межах 1,6-2,4 м/с, урожайності гички 120-180 ц/га і частоти обертання шнека 40-100 об/хв ширина утвореного валка знаходиться в діапазоні від 0,5 до 1,4 м, а розбіжність експериментальних і теоретичних значень знаходиться у межах 5...10 %. Отримані результати наукових досліджень є подальшим кроком удосконалення методології оптимізації раціональних параметрів робочих органів коренезбиральних машин.

коренеплоди цикорію, процес, зрізана гичка, залишки гички, модель, фактори, параметри

Постановка проблеми. Пошук ефективних технічних рішень і наукових напрямків обґрунтування раціональних параметрів робочих органів гичкозрізувальних апаратів, які забезпечують збільшення виробництва стратегічно-важливої для провідних галузей економіки України (енергетичної – біопаливо, харчової – кава, фармацевтичної – інулін) культури, або коренеплодів цикорію є актуальним і значущим напрямком досліджень, як для науки, так і практики [1].

Важливість і цінність коренеплодів цикорію визначається вмістом у коренеплодах різних видів цукринів – інуліну, фруктози, глюкозиду інтибіну та корисних для організму різних типів вітамінів і мікроелементів [2-4].

При цьому гичка коренеплодів є харчовим продуктом для галузі тваринництва, а безпосередньо коренеплоди – сировиною для виробництва біостанолу [5].

Збільшення виходу кінцевого продукту, шляхом переробки сировини (коренеплодів цикорію) досягається шляхом дотримання агротехнічних вимог до машин для збирання коренеплодів цикорію за рахунок зменшення втрат коренеплодів, які становлять більше 1,5 %, забрудненості залишками гички (від 3 до 5 %), кількості обрізаних головок нижче встановлених вимог (від 7 до 9 %), пошкоджень коренеплодів, які більше за 15 %, із них сильнопошкоджених – більше 6...8 % [6-9].

Шляхами підвищення ефективності роботи гичкозбиральних модулів коренезбиральних машин, або забезпечення показників якості роботи гичкозбиральних модулів, а відповідно, і показників якості роботи сучасних

самохідних коренезбиральних машин загалом є пошук нових технологій збирання основного масиву гички коренеплодів і подальше обрізування залишків гички з їх головок шляхом удосконалення конструкції та обґрунтування раціональних конструктивно-кінематичних параметрів робочих органів гичкозбиральних модулів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретично-експериментальному аналізу технологічних процесів зрізування основного масиву гички коренеплодів шляхом обґрунтування раціональних конструктивно-кінематичних параметрів робочих органів гичкозрізувальних апаратів присвячено значну кількість наукових праць [9–14].

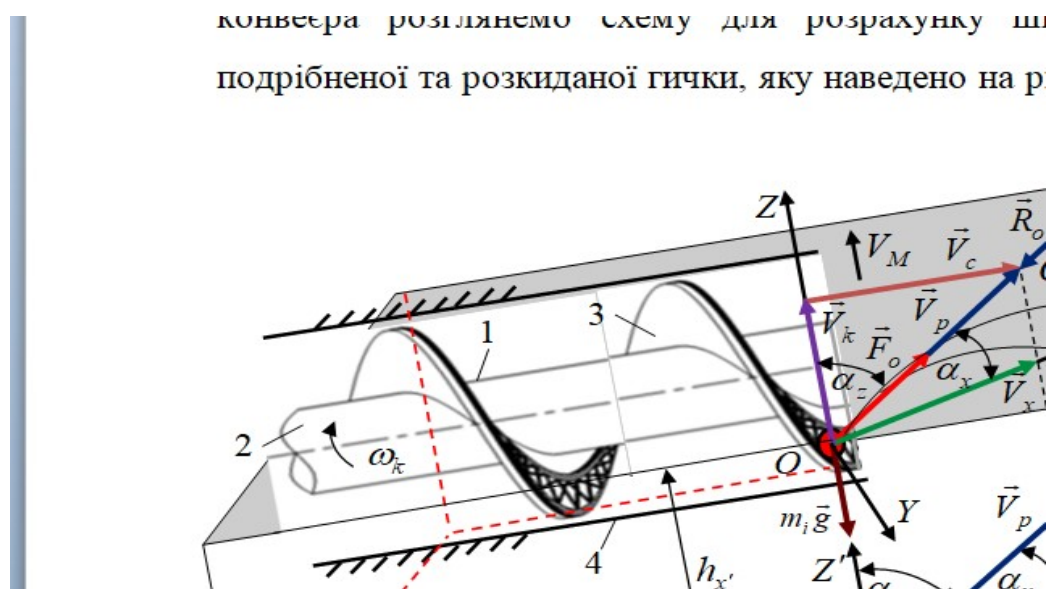
У них викладено основні аспекти, які характеризують наукові підходи та методологію опису, розробки математичних аналітичних і емпіричних моделей та аналізу процесів роботи апаратів для зрізування основного масиву гички та обрізування залишків гички з головок коренеплодів різними типами обрізників.

Проте, питання наукового дослідження формування ширини утвореного валка зрізаної гички, яка вкладається на поверхню зібраного поля досліджено не в повному та недостатньому обсязі – ширина утвореного валка зрізаної гички регламентує необхідну ширину міжосьової відстані між колесами транспортних засобів, які рухаються поруч з гичко-, або коренезбиральною машиною.

Тому і виникла потреба подальшого дослідження та аналізу процесів роботи гичкозбиральних модулів коренезбиральних машин.

Постановка завдання. Завданням дослідження є розробка емпіричної моделі, яка описує характер зміни ширини утвореного валка зрізаної гички, який формується шляхом вивантаження гички на поверхню зібраного поля шнековим конвеєром гичкозбирального модуля залежно від основних параметрів процесу.

Викладення основного матеріалу. З метою формалізації технологічного процесу транспортування подрібненої гички коренеплодів цикорію та для обґрунтування раціональних параметрів шнекового конвеєра розглянемо схему для розрахунку ширини валка зрізаної гички, яку утворено шнековим конвеєром (рис. 1) та яка поєднує в собі функціональну схему технологічного процесу роботи гичкозбирального модуля (рис. 2).

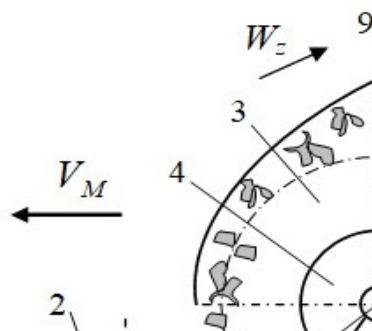


1 – шнековий конвеєр; 2 – барабан; 3 – виток шнекового конвеєра; 4 – кожух

Рисунок 1 – Схема для розрахунку ширини утвореного валка зрізаної гички коренеплодів

Джерело: розроблено авторами

Ширина утвореного валка b розкиданої гички по поверхні зібраного поля є наслідком функціонально-пов'язаних між собою багатьох об'єктивних і суб'єктивних факторів: параметрів шнека 1 (рис. 1); початкового положення подрібненої гички (точкової маси гички) на площині спірального витка 3 шнека (миттєвих координат гички), які визначають координати початкового моменту вильоту гички з витка шнека; кліматичних умов роботи гичкозбирального модуля (швидкість і напрямок руху повітря тощо), маси гички, яка сходить з робочого органу, фізико-механічних характеристик гички тощо.



- 1 – основна рама модуля; 2 – колесо опорне; 3 – гичкоріз;
4, 10 – відповідно, барабан гичкоріза та шнека; 5 – Г-подібний ніж; 6 – шнек; 7 – виток шнека;
8 – жолоб шнека; 9 – кожух гичкоріза; 11 – вихідна частина шнека

Рисунок 2 – Схема технологічного процесу роботи гичкозбирального модуля

Джерело: розроблено авторами

Після проведення теоретичного аналізу технологічного процесу роботи гичкозбирального модуля було отримано аналітичну модель, яка описує функціональну зміну ширини b утвореного валка зрізаної гички залежно від параметрів процесу [15]

$$b = \frac{\pi n_k}{60} \frac{\Psi \sin \left(\operatorname{arctg} \frac{n \pi_k}{\operatorname{tg}(0,5\pi - \alpha_k)} \right) \cos \beta}{g k_o m_i} \times \left[1 - \frac{\pi n_k k_o m_i \Psi \cos \left(\operatorname{arctg} \frac{n \pi_k}{\operatorname{tg}(0,5\pi - \alpha_k)} \right)}{60} \right]^{-1} e^{k_o m_i g} (e^{t_{21}} - e^{t_{22}}) \quad (1)$$

де $D^2 + (D \operatorname{tg}(0,5\pi - \alpha_k) - \delta_v)^2 k_a^2 k_y^2 = \Psi^2$ [13].

Було встановлено, що максимальна ширина валка b розкиданої гички на теоретичному рівні змінюється в діапазоні від 0,2 до 1,57 м за таких значень параметрів: діаметра шнека $D = 0,2 \dots 0,3$ м; частоти обертання шнека n_k 40 - 100 об/хв; маси гички m_i від 0,15 до 0,5 кг.

Практичне застосування отриманої моделі(1) в реальних практичних розрахунках показника b потребує експериментальної перевірки її адекватності, або відповідності аналітичних значень ширини b утвореного валка реальному процесу.

Реалізацію експериментальних досліджень з визначення параметра оптимізації, або встановлення функціональної залежності (емпіричної моделі), яка описує взаємозв'язок зміни ширини утвореного валка від основних параметрів робочих органів гичкозбирального модуля як функція $b_e = f(x_1; x_2; x_3)$ провели в польових умовах з застосуванням макетного експериментального зразка, рис. 2.

Було розроблено схему моделі реалізації багатофакторного експерименту типу ПФЕ 3^3 [16] за три повторності кожного окремого експерименту (рис. 3), при цьому вхідними параметрами функціональної залежності $b_e = f(x_1; x_2; x_3)$ приймали:

- робочу швидкість руху V_M гичкозбирального модуля;
- урожайність U_g гички коренеплодів цикорію;
- частоту обертання шнека n_k .

експеримент типу ПФЕ 3^3 .



Рисунок 3 – Схема моделі планованого факторного експерименту типу ПФЕ 3^3

Джерело: розроблено авторами

Характеристику вхідних факторів експерименту типу ПФЕ 3^3 наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристику вхідних факторів експерименту типу ПФЕ 3^3 з визначення ширини утвореного валка як функція $b_e = f(x_1; x_2; x_3)$

Фактори	Позначення	Інтервал варіювання	Рівні варіювання, натуральні/кодовані		
Робоча швидкість руху модуля, V_M , м/с	x_1	0,4	1,6/-1	2,0/0	2,4/+1
Урожайність гички коренеплодів цикорію, U_g , ц/га	x_2	30,0	120/-1	150/0	180/+1
Частота обертання шнека, n_k , об/хв	x_3	250	350/-1	600/0	850/+1

Джерело: розроблено авторами

Черговість реалізації порядкових номерів (першого експерименту та наступного номера) кожного експерименту визначали шляхом рандомізації основної план-матриці багатофакторного експерименту ПФЕ 3^3 [17].

Основні базові елементи методики реалізації експерименту типу ПФЕ 3^3 були наступними:

- для визначення довжини гону L_{zi} кожної залікової ділянки за встановленої згідно табл. 1 робочої швидкості руху модуля приймали умовний час руху модуля

рівним $t_Q = 2$ с;

- тоді визначали довжину гону L_{3i} за робочої швидкості руху модуля $V_M = 1,6$; 2,0 і 2,4 м/с, відповідно, отримали значення довжини гону $L_{31} = 3,2$ м ($V_M = 1,6$ м/с), $L_{32} = 4,0$ м ($V_M = 2,0$ м/с) та $L_{33} = 4,8$ м ($V_M = 2,4$ м/с);

- регулювання частоти n_k обертання шнека, або встановлення її значень $n_k = 350$, 600 і 850 об/хв проводили за рахунок зміни передаточного числа привода шнека;

- ширину b_e валка, яка утворювалася з 6-ти рядків після реалізації кожного експерименту вимірювали послідовно на інтервалі рівному 1 м з проміжками між інтервалом 0,5 м з точністю ± 1 см;

- визначали середнє значення b_e , яке заносили в таблицю результатів експериментів.

Обробку результатів експериментальних досліджень проводили за стандартною методикою, при цьому алгебраїчний вигляд функціональної залежності (апроксимуючої функції) визначали за найбільшим значенням коефіцієнта множинної детермінації. Перевірку адекватності емпіричної моделі провели за F -критерієм Фішера.

При цьому було встановлено вигляд апроксимуючої функціональної залежності, яку записано у вигляді логарифмічної функції

$$b_e = b_0 + b_1 \ln x_1 + b_2 \ln x_2 + b_3 \ln x_3, \quad (2)$$

де b_0, b_1, b_2, b_3 – коефіцієнти відповідних значень x_i ;

x_1, x_2, x_3 – відповідні кодовані фактори.

Визначення значущості коефіцієнтів b_1, b_2, b_3 емпіричної моделі (рівняння регресії) провели за t -критерієм Стюдента [18], при цьому було встановлено, що всі коефіцієнти b_1, b_2, b_3 є значимими.

Числові значення коефіцієнтів b_1, b_2, b_3 у натуральних величинах наведено у табл. 2

Таблиця 2 – Натуральні значення коефіцієнтів b_1, b_2, b_3 рівняння регресії

Позначення	Натуральні значення коефіцієнтів рівняння регресії			
	b_0	b_1	b_2	b_3
$b_e = f_b(V_M; U_g; n_k)$	-8,74	0,27	1,21	0,79

Джерело: розроблено авторами

Отримане рівняння регресії, яке функціонально описує зміну параметра оптимізації, або ширину b_e утвореного валка гички має вигляд

$$b_e = -8,74 + 0,27 \ln(V_M) + 1,21 \ln(U_g) + 0,79 \ln(n_k). \quad (3)$$

Згідно з функціональною залежністю (3) побудовано поверхні відгуку та їх двомірний переріз, які характеризують зміну ширини b_e утвореного валка b_e залежно від зміни вхідних факторів у межах їх варіювання: $1,6 \leq V_M \leq 2,4$ м/с; $120 \leq U_g \leq 180$ ц/га; $350 \leq n_k \leq 850$ об/хв, які наведено у табл. 1.

Відповідна графічна інтерпретація функціональної зміни емпіричної математичної моделі $b_e = f_b(V_M; U_g; n_k)$, яка характеризує зміну параметра оптимізації

наведена на: рис. 4 – як функція $b_e = f_b(V_M; U_g)$; рис. 5 – як функція $b_e = f_b(V_M; n_k)$; рис. 6 – як функція $b_e = f_b(U_g; n_k)$.

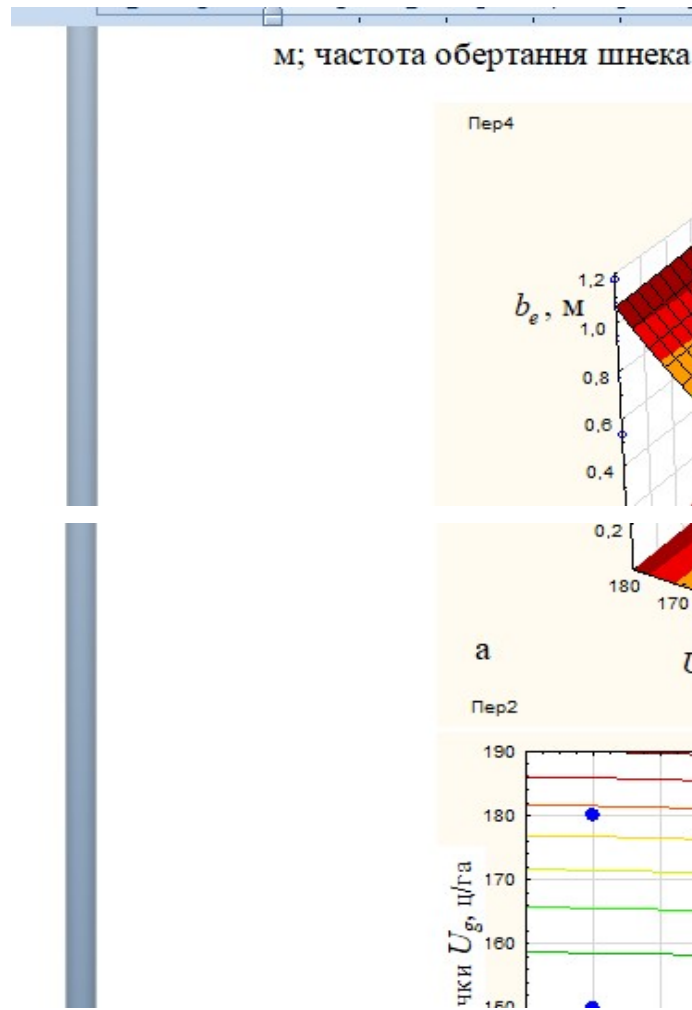
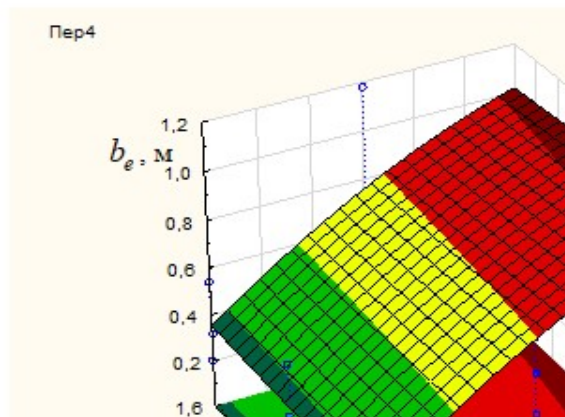


Рисунок 4 – Поверхня відгуку (а) та її двомірний переріз ширини b_e валка гички як функція $b_e = f_b(V_M; U_g)$

Джерело: розроблено авторами

$$= f_b(U_g; n_k).$$



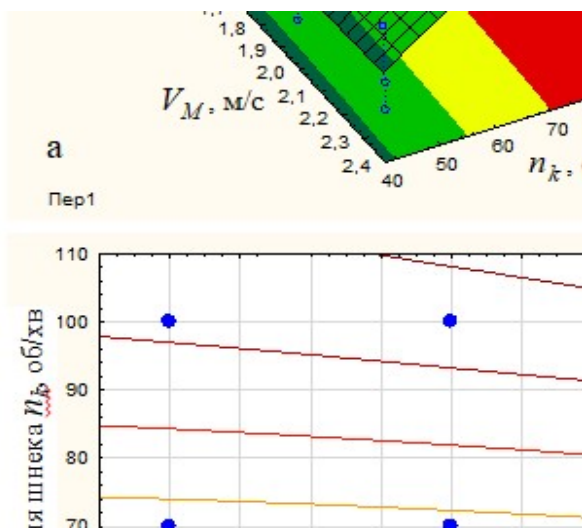


Рисунок 5 – Поверхня відгуку (а) та її двомірний переріз зміни ширини b_e валка гички як функціонал $b_e = f_b(V_M; n_k)$

Джерело: розроблено авторами

Згідно з проведеним аналізом графічних побудов (рис. 4-рис. 6) можна констатувати, що:

- за зміни робочої швидкості руху модуля у межах від 1,6 до 2,4 м/с, урожайності гички у межах від 120 до 180 ц/га та частоти обертання шнека у межах від 40 до 100 об/хв ширина b_e утвореного валка зрізаної роторним гичкорізом гички знаходиться в загальному діапазоні від 0,5 до 1,4 м;

- збільшення значень вхідних факторів V_M , U_g і n_k призводить до зростання параметра оптимізації b_e , а характер зміни b_e підкоряється прямопропорційній функціональній залежності;

- доміантними факторами, які регулюють характер значного діапазону зміни ширини b_e утвореного валка зрізаної гички роторним гичкорізом є урожайність гички U_g та частота обертання шнека n_k , при цьому:

- збільшення n_k за діапазону варіювання $350 \leq n_k \leq 850$ об/хв призводить до збільшення параметра оптимізації в середньому на 0,7 м (рис. 7а), а збільшення урожайності гички U_g за діапазону варіювання $120 \leq U_g \leq 180$ ц/ призводить до збільшення параметра оптимізації в середньому на 0,5 м (рис. 7б);

- зміна робочої швидкості руху V_M гичкозбирального модуля в діапазоні варіювання фактора $1,6 \leq V_M \leq 2,4$ м/с не вносить суттєвих корективів на показник b_e – параметр оптимізації b_e зростає тільки на 0,05...0,1 м (рис. 7а, б, в).

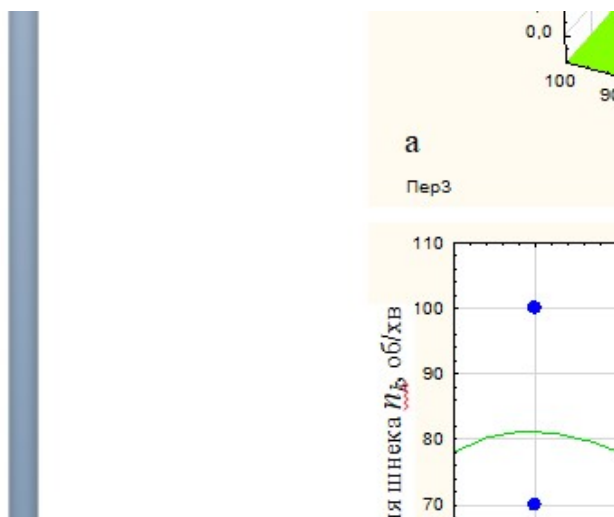


Рисунок 6 – Поверхня відгуку (а) та її двомірний переріз зміни ширини b_e валка гички як функціонал $b_e = f_b(U_g; n_k)$

Джерело: розроблено авторами

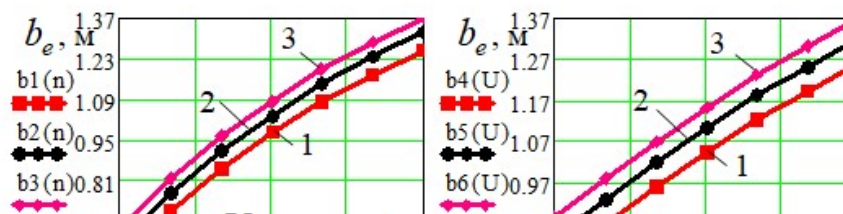


Рисунок 7 – Залежність зміни ширини b_e валка гички як функція:

а – $b = f_b(n_k)$, 1, 2, 3 – відповідно, $V_M = 1,6; 2,0; 2,4$ м/с; б – $b = f_b(U_g)$, 1, 2, 3 – відповідно, $V_M = 1,6; 2,0; 2,4$ м/с; в – $b = f_b(V_M)$, 1, 2, 3 – відповідно, $U_g = 120; 150; 180$ ц/га

Джерело: розроблено авторами

Отримані результати експериментальних досліджень ширини b_e утвореного валка зрізаної гички роторним гичкоріз дозволяють прогнозувати та регулювати параметри технологічного процесу збирання коренеплодів цикорію за двостадійною технологією, яка передбачає навантаження зібраних коренеплодів у транспортні засоби, які рухаються поряд з збиральною машиною та подальше відвезення коренеплодів до місця призначення, або на переробку.

У цьому аспекті важливим є показник транспортної колії (міжосьової відстані коліс) технологічного транспорту, який у цьому випадку повинен узгоджуватися з шириною b_e утвореного валка зрізаної гички, яка укладена на поверхню зібраного поля. Тобто, необхідно забезпечити необхідну технологічність роботи транспортних засобів (відсутність буксування рушіїв під час переміщення по зібраному полю за умови, що колеса не переміщуються по валку укладеної гички) за умови, що ширина b_e утвореного валка зрізаної гички та яка укладена на поверхню зібраного поля не повинна перевищувати транспортну колію, або міжосьову відстані B_m між колесами причепа та трактора транспортного агрегату.

Як правило, більшість транспортних засобів на відвезенні коренеплодів мають

встановлену ширину транспортної колії рівною $B_m = 1,8$ м.

Враховуючи отримані результати експериментальних досліджень можна стверджувати, що умова $B_m \leq b_e \leq 1,8$ м забезпечується в всьому діапазоні зміни $1,6 \leq V_M \leq 2,4$ м/с, $120 \leq U_g \leq 180$ ц/га, $350 \leq n_k \leq 850$ об/хв.

Отримані значення розбіжності аналітичних значень ширини b утвореного валка зрізаної роторним гичкорізом гички (залежність (1) та значень b_e , які отримано на емпіричному рівні згідно з (3) становить 5...10 % (рис. 8), що є наслідком того, що отримана аналітична модель (1) є адекватною, або задовільно характеризує функціональну зміну ширини b утвореного валка відносно функціональної зміни b_e згідно з рівнянням регресії (3).

Висновки. Отримані значення функціональної зміни ширини b утвореного валка зрізаної роторним гичкорізом гички, які одержано шляхом реалізації експериментальних досліджень визначають оптимальні умови технологічного процесу механізованого збирання коренеплодів цикорію в плані забезпечення технологічності роботи транспортних засобів, які рухаються поряд з коренезбиральним агрегатом.

Для забезпечення технологічності роботи транспортних засобів ширина b утвореного валка гички, яка укладена на поверхню зібраного поля не повинна бути більшою за 1,8 м, при цьому за результатами проведених експериментів b_e змінюється від 0,5 до 1,4 м.

Розбіжність експериментальних та теоретичних значень ширини утвореного валка b_e знаходиться у межах 5...10 %.

Список літератури

1. Технологічні аспекти процесів роботи гичкозбиральних модулів : монографія. / Барановський В. М. та ін. Тернопіль : Редакційно-видавничий відділ Тернопільського національного технічного університету імені Івага Пулюя, 2022. 294 с.
2. Boyko Volodymyr. Mathematical model of the process of contact interaction of the copier with the head of the chicory root crop. *Scientific Journal of the TNTU*. Tern.:TNTU. 2023. Vol. 111. No 3. С. 115–125.
3. Віктор Барановський, Галина Герасимчук, Наталя Дубчак, Євген Береженко, Володимир Бойко. Експериментальні дослідження агробіологічних характеристик коренеплодів. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2020. № 24. С 13–21.
4. Барановський В. М. Основи розробки адаптованих транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин : монографія / В. М. Барановський та ін. Видавництво Тернопільського національного технічного університету. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2014. 351 с.
5. Гурченко О. П., Барановський В. М. Результати випробування модернізованої коренезбиральної машини МКК-6А. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 1995. Вип. 81. С. 57–60.
6. Барановський В. М. Транспортно-технологічні системи очисних робочих органів адаптованої коренезбиральної машини. *Сільськогосподарські машини*. 2013. С. 18–29.
7. Аналіз тенденцій розвитку робочих органів для сепарації вороху коренеплодів / В. Ю. Рамш, В. М. Барановський, М. Р. Паньків, Г. А. Герасимчук. *Наукові нотатки*. 2011. № 31. С. 298–305.
8. Смаль М. В., Герасимчук О. О., Барановський В. М. Математичні моделі процесу копіювання головок коренеплодів копіром пасивного дообрізчика залишків гички. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2012. Том 1. № 11. С. 206–212.
9. Войтюк Д. Г. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку : підручник; за ред. Д. Г. Войтюка / Д. Г. Войтюк, В. М. Барановський, В. М. Булгаков та ін. К.: Вища освіта, 2005. 464 с.
10. Барановський В. М. Результати теоретично-експериментальних досліджень секундної подачі вороху коренеплодів. *Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2008. Том 1. С. 111–118.

11. Viktor Baranovsky, Maria Pankiv, Oleksiy Kukhar et al. Results of the experimental investigations of fodder beets harvesting technologies. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. 2022, No 2 (106). P. 16–26.
12. Volodymyr Boyko. The results of the study of the cutter of the remains of root crops haulm / Boyko Volodymyr, Viktor Baranovsky, Vitalii Pankiv, Volodymyr Onyshchenko, Sergey Marinenko. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. 2023, № 1 (109). P. 99–109.
13. Pankiv V.R., Tokarchuk O.A. Investigation of constructive geometrical and filling coefficients of combined grinding screw conveyor. *INMATEH–Agricultural engineering*. 2017. Vol. 51. No. 1/2017. P. 59–68.
14. Feasibility study of mixture transportation and stirring process in continuous-flow conveyors / R.B Hevko, B.O. Yazlyuk, V.R. Pankiv et al. *INMATEH–Agricultural engineering*. 2017. Vol. 51. No. 1/2017. P. 49–58.
15. Барановський В.М., Виговський А.Ю., Сторожук І.М., Паньків В.Р. Розрахунок параметрів робочих органів гичкозбиральних машин : монографія. К.: Компринт, 2015. 242 с.
16. Berezhenko E., Pankiv M., Jobbagy Jan, Berezhenko B. Experimental research of the module for gathering plant of chicory roots. *Scientific Journal of TNTU*. 2021. No. 1 (101). P. 56–67.
17. Baranovsky V., Potapenko M. Theoretical analysis of the technological feed of lifted root crops. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 51. No. 1/2017. P. 29–38.
18. Baranovsky V., Dubchak N., Pankiv M. Experimental research of stripping the leaves from root crops. *Acta Technologica Agriculturae*. 2017. Vol. 20. No. 3. P. 69–73.

References

1. Baranovskyi, V.M., Berezhenko, Ye.B., Pankiv, M.R., Berezhenko, B.M. & Boiko, V.A. (2022). *Tekhnologichni aspekty protsesiv roboty hychkozbyralnykh moduliv [Technological aspects of the processes of the work of the ginseng harvesting modules]* Ternopil : Redaktsiino-vydavnychiy viddil Ternopils'koho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu imeni Ivaha Puliuia [in Ukrainian].
2. Boyko Volodymyr (2023). Mathematical model of the process of contact interaction of the copier with the head of the chicory root crop. *Scientific Journal of the TNTU, Vol. 111. No 3*. P. 115–125.
3. Viktor Baranovskyi, Halyna Herasymchuk, Natalia Dubchak, Yevhen Berezhenko, Volodymyr Boiko. (2020). Eksperymentalni doslidzhennia ahrobiologichnykh kharakterystyk koreneplodiv [Experimental studies of agrobiological characteristics of root crops]. *Visnyk Lvivskoho natsionalnoho ahrarynoho universytetu: ahroinzhenerni doslidzhennia – Bulletin of the Lviv National Agrarian University: agricultural engineering research, № 24*, 13–21. [in Ukrainian].
4. Baranovskyi, V.M., Pidhurskyi, M.I., Pankiv, M.R., Tesliuk, V.V. & Onyshchenko, V.B. (2014). Osnovy rozrobky adaptovanykh transportno-tekhnologichnykh system korenezbyralnykh mashyn []. Vydavnytstvo Ternopils'koho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Ternopil: TNTU im. I. Puliuia [in Ukrainian].
5. Hurchenko, O.P. & Baranovskyi, V.M. (1995). Rezultaty vyprobuvannya modernizovanoi korenezbyralnoi mashyny MKK-6A [Test results of the modernized MKK-6A root harvester]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva – Mechanization and electrification of agriculture, Issue 81*, 57–60. [in Ukrainian].
6. Baranovskyi, V.M. (2013). Transportno-tekhnologichni systemy ochysnykh robochykh orhaniv adaptovanoi korenezbyralnoi mashyny. Silskohospodarski mashyny [Transport and technological systems of cleaning working bodies of the adapted root harvester. Agricultural machinery]. 18–29. [in Ukrainian].
7. Ramsh, V. u., Baranovskyi, V. ., Pankiv, M.R. & Herasymchuk, H.A. (2011). Analiz tendentsii rozvytku robochykh orhaniv dlia separatsii vorokhu koreneplodiv [Analysis of trends in the development of working organs for the separation of a pile of root crops]. *Naukovi notatky – Scientific notes, № 31*, 298–305. [in Ukrainian].
8. Smal, M.V., Herasymchuk, O.O. & Baranovskyi, V.M. (2012). Matematychni modeli protsesu kopiiuvannya holovok koreneplodiv kopirom pasyvnoho doobrizchyka zalyshkiv hychky [Mathematical models of the process of copying the heads of root crops with the copier of the passive trimmer of the remains of the ghee]. *Zbirnyk naukovykh prats Vinnytskoho natsionalnoho ahrarynoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Collection of scientific works of the Vinnytsia National Agrarian University. Series: Technical sciences, Vol 1. № 11*, 206–212. [in Ukrainian].
9. Voitiuk, D.H., Baranovskyi, V.M., Bulhakov, V.M. et al. (2005). *Silskohospodarski mashyny. Osnovy teorii ta rozrakhunku [Agricultural machinery. Basics of theory and calculation]*. D. H. Voitiuka (Eds.). Kyiv: Vyscha osvita [in Ukrainian].
10. Baranovskyi, V.M. (2008). Rezultaty teoretychno-eksperymentalnykh doslidzhen sekundnoi podachi

- vorokhu koreneplodiv [The results of theoretical and experimental studies of the second supply of a pile of root crops]. *Mekhanizatsiia silskohospodarskoho vyrobnytstva – Mechanization of agricultural production, Vol. 1*, 111–118. [in Ukrainian].
11. Viktor Baranovsky, Maria Pankiv, Oleksiy Kukhar et al. (2022). Results of the experimental investigations of fodder beets harvesting technologies. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. No 2 (106)*. P. 16–26 [in English].
 12. Volodymyr Boyko, Baranovsky Viktor, Pankiv Vitalii, Onyshchenko Volodymyr, Marinenko Sergey (2023). The results of the study of the cutter of the remains of root crops haulm. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University, № 1 (109)*. P. 99–109[in English].
 13. Pankiv, V.R. & Tokarchuk, O.A. (2017). Investigation of constructive geometrical and filling coefficients of combined grinding screw conveyor. *INMATEH–Agricultural engineering. Vol. 51. No. 1/2017*. P. 59–68 [in English].
 14. Hevko R.B., Yazlyuk, B.O., Pankiv, V.R. et al. (2017). Feasibility study of mixture transportation and stirring process in continuous-flow conveyors. *INMATEH–Agricultural engineering. Vol. 51. No. 1/2017*. P. 49–58 [in English].
 15. Baranovskyi, V.M., Vyhovskyi, A.Iu., Storozhuk, I.M. & Pankiv, V.R. (2015). *Rozrakhunok parametriv robochykh orhaniv hychkozbyralnykh mashyn [Calculation of the parameters of the working bodies of the sorghum harvesting machines]*. Kyiv: Komprynt [in Ukrainian].
 16. Berezhenko, E., Pankiv, M., Jobbagy, Jan & Berezhenko, B. (2021). Experimental research of the module for gathering plant of chicory roots. *Scientific Journal of TNTU. No. 1 (101)*. P. 56–67 [in English].
 17. Baranovsky, V. & Potapenko, M. (2017). Theoretical analysis of the technological feed of lifted root crops. *INMATEH – Agricultural Engineering. Vol. 51. No. 1/2017*. P. 29–38 [in English].
 18. Baranovsky, V., Dubchak, N. & Pankiv, M. (2017). Experimental research of stripping the leaves from root crops. *Acta Technologica Agriculturae. Vol. 20. No. 3*. P. 69–73 [in English].

Mykola Pidhurskyi, Prof., DSc.

Ternopil I. Puluji national technical university, Ternopil, Ukraine

Mykola Boris, Assoc. Prof., Phd tech. sci.

Khmelnitskyi National University, Khmelnytskyi. Ukraine

Hanna Tsyon, Assoc. Prof., Phd tech. sci.

Ternopil I. Puluji national technical university, Ternopil, Ukraine

Experimental Studies of the Width of the Formed Swath of Cut Chicory Root Crops

The search for effective technical solutions and scientific directions for substantiating the rational parameters of the working bodies of hedge cutting devices, which ensure an increase in the production of the strategically important for the leading sectors of the economy of Ukraine (energy - biofuel, food - coffee, pharmaceutical - inulin) culture, or root crops of chicory is a relevant and significant direction research, both for science and practice.

The article provides the results of testing the adequacy of the developed analytical model, which functionally describes the process of unloading the cut stubble onto the surface of the harvested field by the transport element (screw conveyor) of the stubble cutting module of the root harvester depending on the parameters of the screw conveyor. Based on the processing of the experimental array of data, the regression equation of the change in the width of the formed swath of cut swath was obtained depending on the input parameters: the speed of the swath harvesting module, the swath yield and the rotation frequency of the screw conveyor.

It was found that within the range of variation of the input factors, the speed of movement of the module from 1.6 to 2.4 m/s, the yield of chicory root crops from 120 to 180 t/ha and the rotation frequency of the screw conveyor from 40 to 100 rpm, the width of the formed roll of chopped the width of the swath is in the range from 0.5 to 1.4 m. The difference between the experimental and theoretical values of the width of the formed swath is within 5...10%. The obtained results of scientific research are a further step in the improvement of the methodology for optimizing the rational parameters of the working bodies of root-harvesting machines.

root crops of chicory, process, cut scallions, remains of scallions, model, factors, parameters

Одержано (Received) 02.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 17.10.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.332

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.128-138](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.128-138)**Ів.Б. Гевко**, проф., д-р техн. наук, **В.З. Гудь**, проф., д-р техн. наук,**М.Г. Левкович**, доц., канд. техн. наук, **М.Д. Сіправська**, асист.*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна**e-mail: gupkab@gmail.com*

Дослідження захисних елементів технологічного устаткування та обладнання на автотранспортних підприємствах

Забезпечення надійності та безпеки при використанні обладнання є важливою задачею при проектуванні та виготовленні даного устаткування. Захисні елементи якими обладнано технологічне устаткування для ремонту на автотранспортних підприємствах є важливою запорукою показників надійності використання та довговічності такого обладнання. Саме такими елементами в даній статті є захисні муфти, які широко використовуються в устаткуванні. В даній статті проведено огляд використання та описано принцип роботи та конструкцію захисних муфт з підвищеними показниками надійності та точності спрацювання.

захисні елементи, муфти, автотранспортне підприємство, ремонт, надійність

Постановка проблеми У сучасному світі, де автомобільний транспорт є невід'ємною частиною повсякденного життя, забезпечення безпечної експлуатації автомобілів та іншого транспортного устаткування стає надзвичайно важливим завданням. Надійна робота автомобільного транспорту забезпечується постійним його обслуговуванням, технічним оглядом та ремонтом. Для цього автотранспортними підприємствами широко використовуються різноманітні засоби обслуговування та ремонту, які реалізуються з використанням технологічного обладнання та устаткування, невід'ємною частиною якого є запобіжні муфти, що є ефективним засобом запобігання непередбачуваних аварій та надійної роботи устаткування. Місце використання запобіжних муфт в обладнанні авторемонтних підприємств є досить широким. Вони використовуються у стапельному обладнанні при рихтуванні кузовів автомобілів, в обладнанні для випробування окремих елементів і механізмів автомобілів, у металообробному обладнанні, при ремонті та відновленні деталей автомобілів тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню діагностики і прогнозуванню технічного стану транспортних засобів посвячено цілий ряд досліджень та рекомендацій вчених: Авдонькін Ф.Н., Біліченко В.В., Говорущенко Н.Я., Горбик Ю.В., Дунаєв А. П., Канарчук В. Є., Крещенецький В.Л., Кузнецов Е.С., Кукурудзяк Ю.Ю, Лудченко О.А., Мاستикаш О.Л., Мирошников Л.В., Оліскевич М.С., Сапон Н.С., Формальчик Є.Ю., Цимбал С.В., Коваленко В. М., Ловейкін В.С. [8-12, 17, 22] та інші. Також підвищення надійності та довговічності технологічного обладнання висвітлена в працях Ауліна В.В., Ляшука О.Л. [1, 18].

Питання дослідження динамічних процесів, які виникають при експлуатації обладнання та машин, висвітлено в працях Комарова М.С. [10], Ловейкіна В.С. [11] та інших. Кінетостатичному та динамічному дослідженню запобіжних муфт приводів машин і механізмів, їх синтезу та конструюванню присвячені праці Полякова В.С., Ряховського О.А., Барбаша І.Д. [19], Тепинкичєва В.К. [21], Малащенко В.С. [15], Гевка Б.М. [20], Нагорняка С.Г. [17], Луціва І.В. [13, 14, 16, 20, 23], Кіндрацького Б.І. [9], Гевка Р.Б. [6] та багатьох інших [2-5]. Даними авторами були розроблені та досліджені різні типи запобіжних муфт різноманітного функціонального призначення.

Надійна робота парку автомобільного транспорту забезпечується його ефективним обслуговуванням, технічним оглядом та ремонтом. Для цього автотранспортні підприємства оснащуються різноманітним технологічним спеціальним устаткуванням та обладнанням, які оснащені запобіжними муфтами, оскільки вони забезпечують захист їх від поломок і безпосередньо впливають на безпеку роботи працівників автотранспортних підприємств.

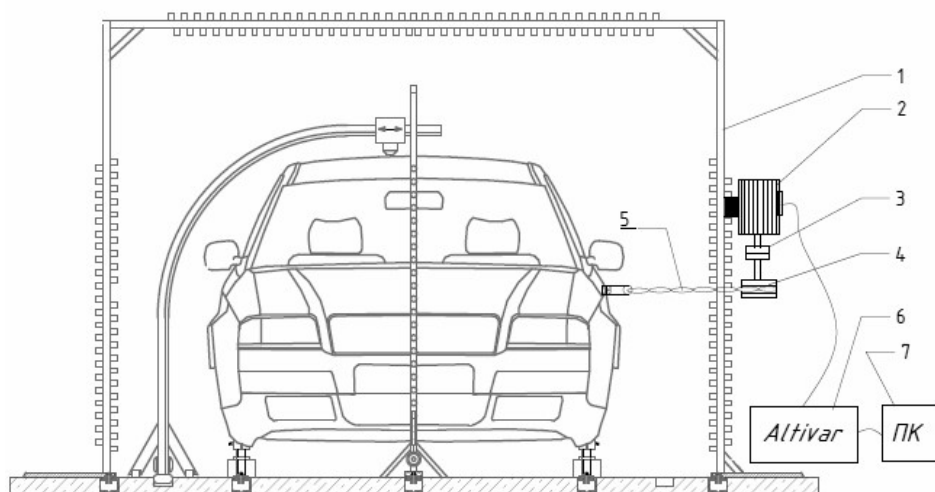
Запобіжні муфти – це пристрої, які встановлюються на різних частинах устаткування для запобігання аварійних ситуацій, таких як перевантаження, злам чи аварійний режим роботи. Вони призначені для блокування або відключення устаткування у випадку надмірного навантаження або несправностей, що дозволяє уникнути пошкодження обладнання, зберегти життя працівників та запобігти негативним наслідкам для автотранспортного підприємства. Некоректне використання запобіжних муфт може призвести до негативних наслідків, включаючи аварії, зупинки виробництва, втрати продуктивності та фінансові збитки.

Відтак розроблення і дослідження ефективних елементів захисту технологічного спеціального устаткування та обладнання автотранспортних підприємств із врахуванням їх функціональної придатності і надійної роботи є актуальним і важливим питанням.

Постановка завдання. Метою даної роботи є покращення ефективності і надійності роботи технологічного устаткування та обладнання автотранспортних підприємств за рахунок розроблення і дослідження захисних елементів.

Виклад основного матеріалу. Використання елементів захисту є доцільним і часто необхідним у технологічно - дослідному устаткуванні і обладнанні, яке використовується для ремонту і дослідження елементів автотранспортних засобів, оскільки вони забезпечують захист їх від поломок і безпосередньо впливають на безпеку роботи працівників автотранспортних підприємств. Місця використання таких захисних елементів є досить широкими, зокрема вони можуть бути використані у стапельному обладнанні при рихтуванні кузовів автомобілів (рис. 1), де необхідне прикладання значних зусиль для вирівнювання пошкоджених несучих частини кузова із значною жорсткістю елементів, у різноманітному технологічному обладнанні (рис. 2, рис. 3), для випробування окремих елементів і механізмів автомобілів, у металообробному обладнанні, при ремонті деталей автомобілів та іншому обладнанні. Для використання в такому устаткуванні муфти захисного типу повинні володіти високими показниками надійності і точності спрацювання.

Зокрема в конструкції стапеля для рихтування кузова автомобіля (рис. 1) для запобігання обриву ланцюга 5 при витягуванні деталей кузова автомобіля, використовується запобіжна муфта 3, яка запобігає передачі критичного навантаження на ланцюг і його розриву, що може призвести до травмування робітників і пошкодження деталей кузова автомобіля. При цьому керування навантаженням відбувається за допомогою перетворювача частоти (Altivar) 6, який, в свою чергу, керується з персонального комп'ютера 7.

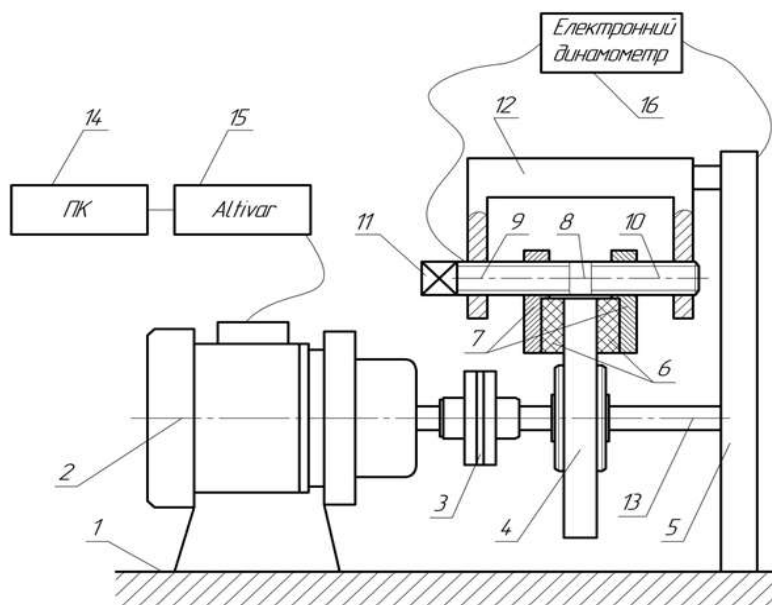


1 – кронштейн стапеля; 2 – електродвигун; 3 – запобіжна муфта; 4 – барабан; 5 – ланцюг;
6 - перетворювач частоти (Altivar); 7 – персональний комп'ютер

Рисунок 1 – Стапель для рихтування кузова автомобіля

Джерело: розроблено авторами

У експериментальному обладнанні (рис. 2) для дослідження характеристик гальмівних дисків запобіжна муфта 3 використовується для обмеження обертального моменту у випадку зупинки при злипанні досліджуваного гальмівного диска автомобіля 4 з фрикційними гальмівними елементами 6.

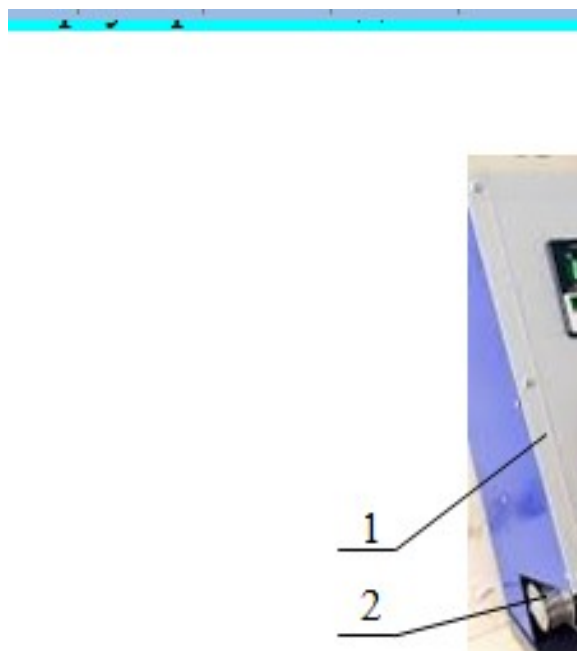


1 – опора; 2 – привід; 3 - запобіжна муфта; 4 - гальмівний диск автомобіля; 5 – рама;
6 – фрикційні гальмівні елементи; 7 – щоки; 8 – гвинт; 9 і 10 - різносторонні різі; 11 – багатогранник;
12 - навантажувальний механізм; 13 - кріпильні елементи; 14 - персональний комп'ютер;
15 - перетворювач частоти (Altivar)

Рисунок 2 – Стенд для дослідження характеристик гальмівних дисків автомобілів
з використанням запобіжної муфти (пат України № 150772)

Джерело: розроблено авторами

Також використання муфт є доцільним у дорогому обладнанні, такому як стенд для дослідження генераторів і стартерів. Оскільки процес випробувань може супроводжуватись заклинюванням даних механізмів і призводити до поломок самого стенда (рис. 3).



1 – стенд; 2 – запобіжна муфта; 3 – пасова передача; 4 – генератор

Рисунок 3 – Стенд для дослідження генераторів і стартерів автомобілів

Джерело: розроблено авторами

Відтак з метою забезпечення надійного захисту технологічного устаткування та обладнання автотранспортних підприємств від перевантажень запропоновано конструкцію фрикційної запобіжної муфти з підвищеними показниками точності спрацювання і надійності (рис. 4) [5, 7].

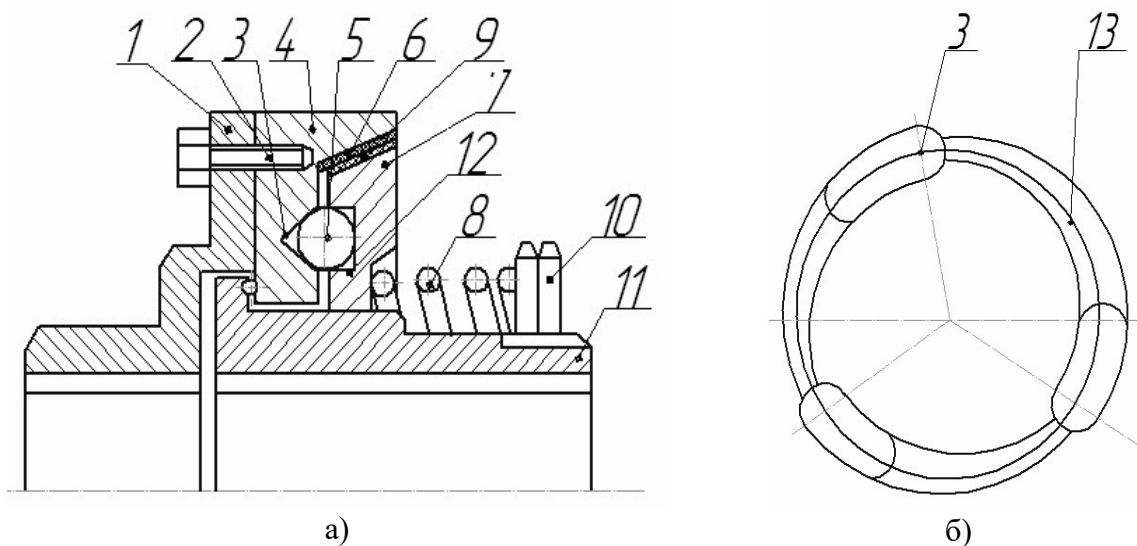


Рисунок 4 – Конструктивна схема фрикційної запобіжної муфти підвищеної точності та надійності:
а) загальний вигляд; б) конструкція пазів;

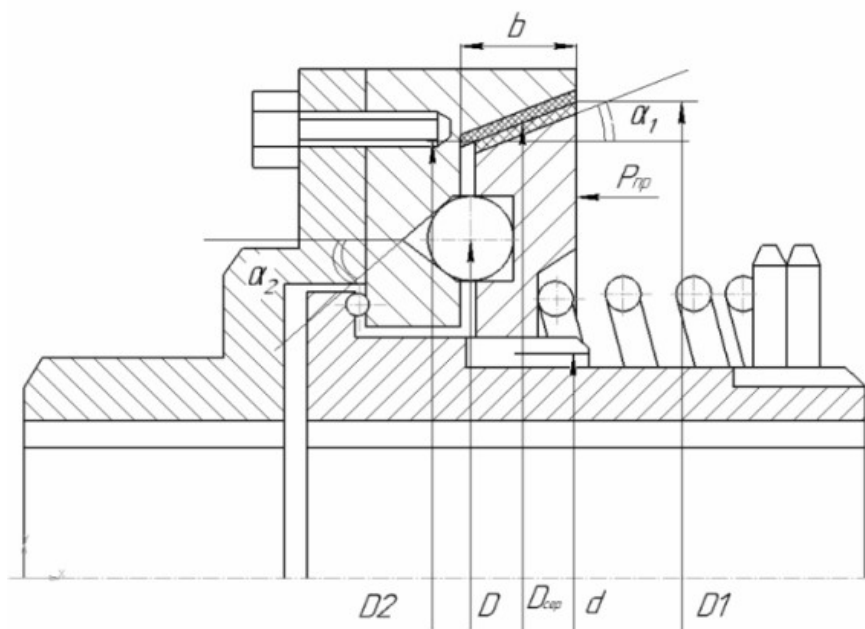
1 і 11 – ведена та ведуча півмуфти; 2 – болтове з'єднання; 3 і 13 – пази більшої та меншої глибини; 4 і 7 – диски; 5 – кульки; 6, 9 – фрикційні накладки; 8 – пружина стиснення; 10 – гайки регулювання стиснення пружини; 12 – гнізда для розташування кульок

Джерело: розроблено авторами

Робота запропонованої запобіжної муфти здійснюється наступним чином. У робочому режимі передача обертового моменту з ведучої півмуфти 11 на ведену півмуфту 1 здійснюється лише за рахунок сили тертя у фрикційних накладках 6 і 9, які встановлені на дисках 7 і 4, а кульки 5 без притиснення розташовуються в гніздах 12 і пазах більшої глибини 3. Величина притиску фрикційних накладок 6 до накладок 9 регулюється затиском гайками 10 пружини стиснення 8.

При виникненні перевантаження ведена півмуфта 1 з диском 4 і фрикційними накладками 6 зупиняється і відбувається повертання ведучої півмуфти 11 з дисками 7 та фрикційними накладками 9 відносно неї. Це спричиняє перекочування кульок 5 з пазів більшої глибини 3 до пазів меншої глибини 13 і поступового осьового зміщення диска 7 по шліцах півмуфти 11, що забезпечує більше стискання пружини 8 та розмикання фрикційних накладок 6 і 9 та подальшу передачу обертового моменту лише через кульки 5 аж до їх потрапляння в пази більшої глибини 3. Далі обертовий момент з ведучої 11 на ведену 1 півмуфти передається за рахунок сили тертя у фрикційних накладках 6 і 9. Відтак муфта працюватиме в режимі періодично повторюваного змикання-розмикання півмуфт аж до повного зникнення перевантаження. Включення в процес буксування додаткових елементів зачеплення «кулька-паз» дозволяє отримати високу точність передачі обертового моменту за рахунок періодичного розмикання і охолодження фрикційних накладок та підтримки стабільного коефіцієнту тертя і значно зменшити динамічні навантаження на елементи технологічного устаткування та обладнання при спрацюванні муфти.

Специфікою розробленої муфти є передача максимального обертового моменту через фрикційні накладки в робочому режимі та мінімального, через елементи зачеплення «кулька-паз», в процесі пробуксовування. Розрахункову схему розробленої фрикційної запобіжної муфти підвищеної точності та надійності представлено на рис. 5 [5, 7].



$P_{пр}$, - сила затиску пружини; b - ширина накладок; α_1 - кут нахилу поверхні тертя; α_2 - кут нахилу колових пазів; d - діаметр шліцевого з'єднання; D - діаметр розташування елементів зачеплення «кулька-паз»;
 $D_{ср}$, $D1$, $D2$ – відповідно середній, менший та більший діаметри поверхні тертя ($D_{ср} = (D1 + D2)/2$)

Рисунок 5 – Розрахункова схема фрикційної запобіжної муфти підвищеної точності та надійності
 Джерело: розроблено авторами

Враховуючи рекомендації [19] передача максимального та мінімального обертальних моментів розробленою фрикційною запобіжною муфтою підвищеної точності та надійності визначається по формулах [5, 19]:

$$T_1 = (P_{\text{пр}} \cdot D_{\text{ср}} \cdot f_0) / 2 \cdot \sin \alpha_1 = (c \cdot \Delta \cdot D_{\text{ср}} \cdot f_0) / 2 \cdot \sin \alpha_1, \quad (1)$$

$$T_2 = P_{\text{пр1}} \cdot D / 2 \cdot (\operatorname{tg}(\alpha_2 - \rho) - (D/d)f) = c \cdot (\Delta + \Delta_{\text{зм}}) \cdot D / 2 \cdot (\operatorname{tg}(\alpha_2 - \rho) - (D/d)f), \quad (2)$$

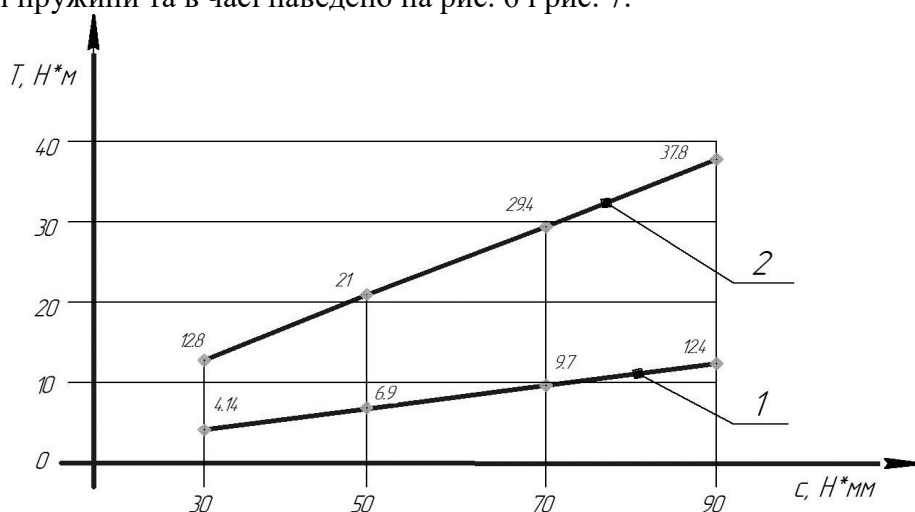
де $P_{\text{пр1}}$ – сила максимального стиснення пружини;

ρ – кут тертя між кульками та пазами, $\rho = 5^\circ \dots 6^\circ$;

f – коефіцієнт тертя в шліцьовому з'єднанні $f \approx 0,05$;

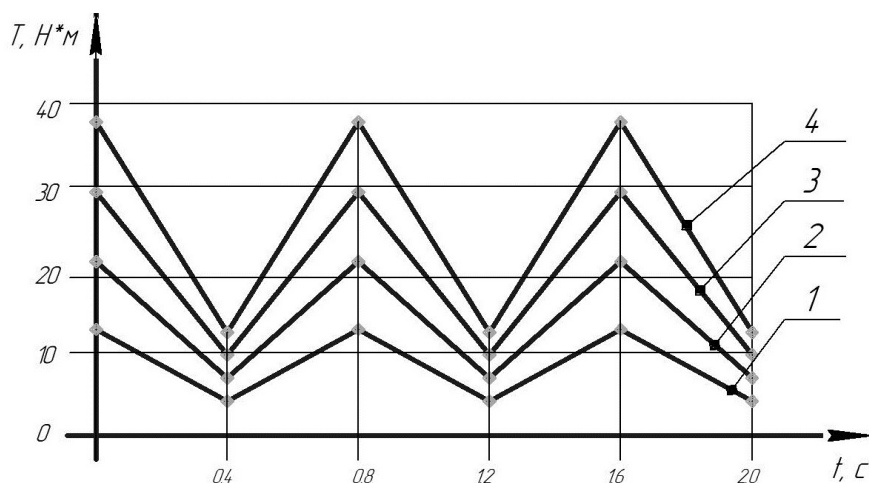
$\Delta_{\text{зм}}$ – додаткове стиснення пружини при перевантаженні, мм.

Графічні залежності передачі обертального моменту окремими елементами зачеплення фрикційної запобіжної муфти підвищеної точності та надійності від жорсткості пружини та в часі наведено на рис. 6 і рис. 7.



1 – передача через фрикційні накладки; 2 – передача через елементи зачеплення «кулька-паз»

Рисунок 6 – Графічні залежності величини передачі обертального моменту окремими елементами зачеплення фрикційної запобіжної муфти підвищеної точності та надійності від жорсткості пружини
Джерело: розроблено авторами

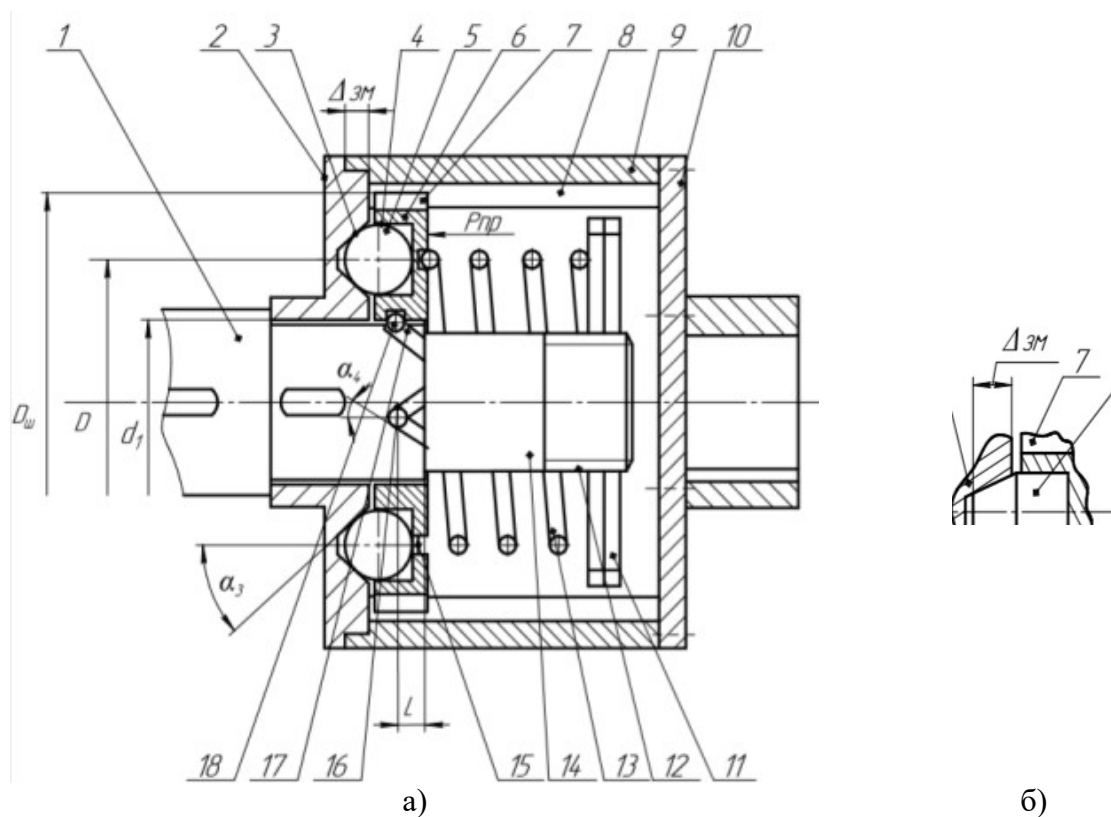


1 – $C = 30$ Н/мм; 2 – $C = 50$ Н/мм; 3 – $C = 70$ Н/мм; 4 – $C = 90$ Н/мм

Рисунок 7 – Графічні залежності передачі обертального моменту фрикційною запобіжною муфтою підвищеної точності та надійності від часу буксування при $n = 300$ об/хв.
Джерело: розроблено авторами

З рисунку 6 видно, що характер передачі обертального моменту через фрикційні накладки та елементи зачеплення «кулька-паз» в залежності від зміни жорсткості пружини змінюється лінійно. Аналізуючи рисунок 7 видно, що на початковому етапі спрацювання до розчеплення пів муфт, обертальний момент передається через фрикційне зчеплення, а на другому етапі - через елементи зачеплення «кулька-паз».

Також слід зазначити, що величина обертального моменту, яку дозволяє забезпечити муфта, відіграє важливу роль у сфері їх застосування. Можливість керуванням передачею обертального моменту через муфту робить її ефективнішою в ролі використання запобіжних елементів стапельних систем ремонтного обладнання автотранспортних підприємств. Саме такі характеристики мають муфти імпульсного типу. На рисунку 8 представлено конструктивну схему муфти, у якій є можливість використовувати різноманітні елементи зачеплення [5, 7]: «кулачок-кулачок», «кулька-лунка», «конусоподібний палець-лунка».



а) загальний вигляд; б) розташування гвинтових пазів;

1, 12, 14 – ділянки ведучого вала; 2, 10 – ведуча і ведена півмуфти; 3 – лунки; 4 – гнізда для розташування елементів зачеплення; 5 – елементи зачеплення; 6 – втулка підтиску; 7, 8 – елементи шліцьового з'єднання; 9 – пустотілий циліндр; 11 – гайки; 12 – різь; 13 – пружина стиснення; 15 – кільце ковзання; 16, 17 – гвинтові пази; 18 – кульки

Рисунок 8 – Конструктивно-розрахункова схема запобіжної муфти імпульсного типу
Джерело: розроблено авторами

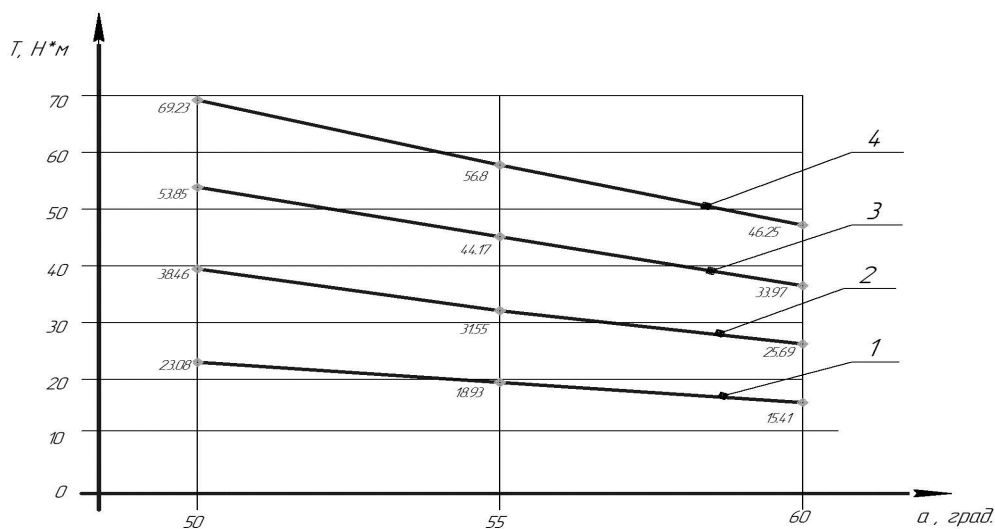
Загалом муфта (рис. 8) працює за принципом типових імпульсних запобіжних муфт, із періодичним розчепленням-зчепленням елементів зачеплення 3 і 5. Регулювання величини передавання обертального моменту забезпечується затиском пружини стиснення 13 гайками 11. Особливістю конструкції є те, що за рахунок викочування кульок 18 з гвинтових пазів 17 і закочування в гвинтові пази 16 в режимі

буксування забезпечується плавне розмикання-вмикання півмуфт. Слід відмітити, що за рахунок неоднакового виконання гвинтових пазів 16 і 17 включення муфти відбувається лише один раз за одне повне зміщення піфмуфт однієї відносно іншої в режимі буксування, яке забезпечує різке зменшення динамічних навантажень на привід та інші елементи технологічного устаткування чи обладнання при розмиканні-вмиканні муфти.

Розрахунок передачі обертального моменту запропонованої захисної муфти імпульсного типу здійснюється згідно рекомендацій[5, 19]:

$$T_3 = c \cdot (\Delta + \Delta_{3M}) \cdot D / 2 \cdot (\operatorname{tg}(\alpha_3 - \rho) - (D_{III} / D) f) \cdot \eta_M. \quad (3)$$

Визначення величини передачі обертального моменту від величини кута нахилу лунок даною запобіжною муфтою проведено з врахуванням наступних параметрів: $\Delta = 10$ мм; $\Delta_{3M} = 3$ мм; $D = 100$ мм; $D_{III} = 120$ мм; $\alpha_3 = 50^\circ \dots 60^\circ$; $d_3 = 10$ мм (діаметр елементів зачеплення); $\rho = 5^\circ$; $f = 0,12$; $C = 50 \dots 90$ Н/мм (рис. 9).



1 – C = 30 Н/мм; 2 – C = 50 Н/мм; 3 – C = 70 Н/мм; 4 – C = 90 Н/мм

Рисунок 9 – Графічні залежності обертального моменту запобіжної муфти імпульсного типу від величини кута нахилу лунок

Джерело: розроблено авторами

Аналізуючи графічні залежності (рис. 9) можна зробити висновок, що із збільшенням кута нахилу лунок, здатність передавати обертальний момент знижується. Проведені експериментальні дослідження розроблених запобіжних муфт показали високу точність (коефіцієнт точності знаходився в межах 1,09...1,24 і залежав від конструктивних особливостей) і надійність їх роботи [5, 14], що дає підстави вважати доцільним використанням запропонованих захисних пристроїв у технологічному устаткуванні та обладнанні автотранспортних підприємств.

Висновки. В роботі представлено розроблені конструкції фрикційної запобіжної муфти підвищеної точності та надійності та запобіжної муфти імпульсного типу, яка володіє низькою динамічністю. Проведено їх кінетостатичний розрахунок, на основі якого побудовано

Встановлено, що передача обертального моменту через фрикційні накладки та елементи зачеплення «кулька-паз» фрикційною запобіжною муфтою підвищеної точності та надійності в залежності від зміни жорсткості пружини змінюється лінійно, і

на початковому етапі спрацювання, до розчеплення півмуфт, обертальний момент передається через фрикційне зчеплення, а на другому етапі через елементи зачеплення «кулька-паз».

Встановлено, що запропонована запобіжна муфта імпульсного типу за рахунок неоднакового виконання гвинтових пазів забезпечує включення муфти в режимі буксування лише один раз за одне повне зміщення піфмуфт однієї відносно іншої, яке забезпечує різке зменшення динамічних навантажень на привід та інші елементи технологічного устаткування чи обладнання при розмиканні-вмиканні муфти. Також можна зробити висновок, що із збільшенням нахилу лунок здатність передавати обертальний момент знижується.

У результаті проведених досліджень можна зробити висновок, що запропоновані конструкції муфт доцільно широко використовувати в устаткуванні та обладнанні автотранспортних підприємств. Приведені технічні характеристики муфт забезпечують їхнє універсальне і ефективне використання в плані безпечних умов праці, точності і надійності роботи обладнання та оснащення, у якому вони використовуються.

Список літератури

1. Аулін В.В., Гриньків А.В., Замота Т.М. Забезпечення та підвищення експлуатаційної надійності транспортних засобів на основі використання методів теорії чутливості . *Вісник інженерної академії України*. 2015. № 3. С. 66-72.
2. Гевко І.Б. Дослідження характеристик запобіжних пристроїв машин. *Машинознавство*. 1997. № 4 - 6. С.17-21.
3. Гевко І.Б. Розробка і дослідження низькочастотних пристроїв для виконання технологічних процесів гнучкими гвинтовими конвеєрами: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.20.01 . Луцьк, 1997. 18 с.
4. Гевко І.Б. Технологічність та ремонтпридатність конструкцій запобіжних муфт сільськогосподарських машин. *Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету*. 2005. Вип. 23 . С. 225 - 231.
5. Гевко І.Б., Гудь В.З., Левкович М.Г. Елементи захисту від перевантажень технологічного оснащення для ремонту автотранспортних засобів . *Науково-прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузей* : Матеріали VI всеукр. наук.-прак. конф. Луцьк, 2020. С. 23-27.
6. Гевко Р. Б. Предохранительные муфты повышенной плавности срабатывания . *Машиностроитель*. 1986. № 3. 19 с.
7. Гудь В.З. Механіко-технологічні основи розробки багатofункціональних секційних шнеків для зернового матеріалу : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : 05.05.11 . Тернопіль, 2021. 43 с.
8. Коваленко В.М., Щуріхін В.К. Диагностика і технологія ремонту автомобілів: підруч. Київ: Літера ЛТД, 2017. 224 с
9. Кіндрацький Б.І. Концепція і алгоритм багатокритеріального структурно-параметричного синтезу машинобудівних конструкцій . *Вісн. ДДТУ імені Івана Пулюя*. 2003. Т.8, №1. С. 73-82.
10. Комаров М.С. Динамика машин . М.: Машиностроение, 1979. 342 с.
11. Ловейкин В.С., Нестеров А.П. Динамическая сила оптимизация подъемных машин . Луганск : Вид-во ЛНУ, 2002. 387 с.
12. Лудченко О.А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів: підруч. К.: Знання, 2007. 527с.
13. Луців І.В., Гевко І.Б., Дубиняк Т.С., Манзій О.С. Defining parameters of elastic-safety clutches for screw conveyers. *Вісник ТНТУ*. 2017. № 3 (87). С.72-80.
14. Луців І.В., Гевко І.Б., Дубиняк Т.С., Гудь В.З. Результати експериментальних досліджень пружно-запобіжної муфти гнучкого гвинтового конвеєра. *Техніка, енергетика, транспорт АПК: Всеукраїнський науково-технічний журнал*. 2018. № 1 (100). С. 111 – 116.
15. Малащенко В.О. Муфти приводів. Конструкції та приклади розрахунків. Львів: Вид-во Нац. Ун-ту «Львівська політехніка», 2006. 196 с.
16. Нагорняк С.Г., Луцив И.В. Предохранительные механизмы метало-обрабатывающего оборудования: Справочник. Киев: Техника, 1992. 72 с.
17. Основи технічної діагностики колісних транспортних засобів : навчальний посібник / Біліченко В. В., Крещенецький В. Л., Кукурудзяк Ю.Ю., Цимбал С. В. Вінниця : ВНТУ, 2012. 118 с.

18. Основи технології виробництва та ремонту автомобілів / Уклад. Гевко І.Б., Рогатинський Р.М., Ляшук О.Л., Левкович М.Г., Гудь В.З., Сташків М.Я., Сіправська М.Д. Тернопіль: Видавництво ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. 550 с.
19. Поляков В.С. Барабаш И.Д., Реховский О.А. Справочник по муфтах . Машиностроение, 1974. 352 с.
20. Пружно-запобіжні муфти: конструкції, розрахунок, дослідження / Гевко Б. М., Луців І. В, Гевко І. Б., Комар Р. В., Дубиняк Т. С. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 200 с.
21. Тепинкичиев В.К. Предохранительные устройства от перегревки станков. М. Машиностроение, 1964. 157 с.
22. Форнальчик Є.Ю., Олісевич М.С. Технічна експлуатація та надійність: навч. посіб. [для студ. вищ. навч. закл.] . Львів: Афіша, 2004. 492 с.
23. Lutsiv I.V., Hevko Iv.B., Lyashuk O.L., Dubynyak T.S. Investigation of dynamical impact loads in screw conveyer drives with safety clutches. *INMATEH - Agricultural Engineering* . Polytechnic University of Bucharest. 2017. Vol. 51, № 1. P. 69-76.

References

1. Aulin, V.V. Hrynkiv, A.V. & Zamota, T.M. (2015). Zabezpechennia ta pidvyshchennia ekspluatatsiinoi nadiinosti transportnykh zasobiv na osnovi vykorystannia metodiv teorii chutlyvosti [Ensuring and increasing operational reliability of vehicles based on the use of sensitivity theory methods]. *Visnyk inzhenernoi akademii Ukrainy – Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine* , № 3, 66-72 [in Ukrainian].
2. Hevko, I.B. (1997). Doslidzhennia kharakterystyk zapobizhnykh prystroiv mashyn [Study of characteristics of safety devices of machines]. *Mashynoznavstvo – Mechanical engineering*, № 4 -6, 17-21 [in Ukrainian].
3. Hevko, I.B. (1997). Rozrobka i doslidzhennia nyzkochastotnykh prystroiv dlia vykonannia tekhnolohichnykh protsesiv hnuchkymy hvyntovymy konveieramy [Development and research of low-frequency devices for performing technological processes with flexible screw conveyors] . *Extended abstract of candidate's thesis*. Lutsk [in Ukrainian].
4. Hevko, I.B. (2005). Tekhnolohichnist ta remontoprydatnist konstruksii zapobizhnykh muft silskohospodarskykh mashyn [Technology and maintainability of constructions of safety clutches of agricultural machines.]. *Zbirnyk naukovykh prats Vinnytskoho derzhavnoho ahrarnoho universytetu – Collection of scientific works of the Vinnytsia State Agrarian University, Issue 23*, 225 – 231 [in Ukrainian].
5. Hevko, I.B., Hud, V.Z. & Levkovich, M.H. (2020). Elementy zakhystu vid perevantazhen tekhnolohichnoho osnashchennia dlia remontu avtotransportnykh zasobiv [Elements of protection against overloads of technological equipment for the repair of motor vehicles] . *Scientific and applied aspects of automobile and transport and road industries : VI Vseukr. Nauk.-Prak. konf. – VI All-Ukrainian science-practice conference* (pp. 23-27) . Lutsk [in Ukrainian].
6. Hevko, R.B. (1986). Predohranitel'nye mufty povyshennoj plavnosti s rabatyvaniya [Safety clutches with increased smooth operation]. *Mashinostroitel' – Mechanical engineer*, № 3, 19 [in Russian].
7. Hud, V.Z. (2021). Mekhaniko-tekhnolohichni osnovy rozrobky bahatofunktsionalnykh sektsiinykh shnekiv dlia zernovoho materialu [Mechanical and technological basics of the development of multifunctional sectional augers for grain material] . *Extended abstract of doctor's thesis*. Ternopil [in Ukrainian].
8. Kovalenko, V.M. & Shchurikhin, V.K. (2017). *Diahnostyka i tekhnolohiia remontu avtomobiliv [Diagnostics and technology of car repair]* . Kyiv: Litera LTD [in Ukrainian].
9. Kindratskyi, B.I. (2003). Kontseptsii i alhorytm bahatokryterialnoho strukturno-parametrychnoho syntezy mashynobudivnykh konstruksii [Concept and algorithm of multi-criteria structural-parametric synthesis of machine-building structures.]. *Visn. TDTU imeni Ivana Puliuia – Visn. TDTU named after Ivan Pulyuy, Vol. 8, №1*, 73-82 [in Ukrainian].
10. Komarov, M.S. (1979). *Dinamika mashin . [Machine dynamics]* . M.: Mashinostroenie [in Russian].
11. Lovejkin, V.S. & Nesterov, A.P. (2002). *Dinamicheskaja sila optimizacija pod'emnykh mashin [Dynamic force optimization of lifting machines]*. Lugansk : Vid-vo LNU [in Russian].
12. Ludchenko, O.A. (2007). *Tekhnichne obsluhovuvannia i remont avtomobiliv [Maintenance and repair of cars]*. Kyiv: Znannia [in Ukrainian].
13. Lutsiv, I.V., Hevko, I.B., Dubyniak, T.S. & Manzii, O.S. (2017). Defining parameters of elastic-safety clutches for screw conveyers. *Visnyk TNTU – Bulletin of TNTU, № 3 (87)*, 72-80 [in Ukrainian].

14. Lutsiv, I.V., Hevko, Iv.B., Dubyniak, T.S. & Hud, V.Z. (2018). Rezultaty eksperymentalnykh doslidzhen pruzhno-zapobizhnoi mufty hnuchkoho hvyntovoho konveiera [The results of experimental studies of the elastic safety coupling of a flexible screw conveyor]. *Vseukrainskyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal: Tekhnika, enerhetyka, transport APK – Engineering, energy, transport of agricultural industry: All-Ukrainian scientific and technical journal, № 1 (100)*, 111 – 116 [in Ukrainian].
15. Malashchenko, V.O. (2006). *Mufty pryvodiv. Konstruktsii ta pryklady rozrakhunkiv [Drive clutches. Designs and examples of calculations]*. Lviv: Vyd-vo Nats. Un-tu «Lvivska politehnika» [in Ukrainian].
16. Nahorniak, S.H. & Lutsyv, Y.V. (1992). *Predohranitel'nye mehanizmy metalo-obrabatyvayushhego oborudovaniya [Safety mechanisms of metal processing equipment]*. Kiev: Tekhnika, [in Ukrainian].
17. Bilichenko, V.V., Kreshchenetskyi, V.L., Kukurudziak, Yu.Iu. & Tsymbal, S.V. (2012). *Osnovy tekhnichnoi diahnostyky kolisnykh transportnykh zasobiv [Basics of technical diagnostics of wheeled vehicles]*. Vinnytsia : VNTU [in Ukrainian].
18. Hevko, I.B., Rohatynskyi, R.M., Liashuk, O.L., Levkovich, M.H., Hud, V.Z., Stashkiv, M.Ia. & Sipravska, M.D. (2021). *Osnovy tekhnologii vyrobnytstva ta remontu avtomobiliv [Fundamentals of automobile production and repair technology]*. Ternopil: Vydavnytstvo TNTU imeni Ivana Puliuia [in Ukrainian].
19. Poliakov, V.S., Barabash, Y.D. & Rekhovskiy, O.A. (1974). *Spravochnyk po muftakh [Coupling Handbook]*. Mashynostroenye [in Russian].
20. Hevko, B.M., Lutsiv, I.V., Hevko, I.B., Komar R.V. & Dubyniak T.S. (2019). *Pruzhno-zapobizhni mufty: konstruktsii, rozrakhunok, doslidzhennia [Spring-safety couplings: designs, calculation, research]*. Ternopil: FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
21. Tepinkichiev, V.K. (1964). *Predohranitel'nye ustrojstva ot peregreivki stankov [Safety devices against overheating of machines]*. M. : Mashynostroenie [in Russian].
22. Fornalchuk, Ye.Iu. & Oliskevych, M.S. (2004). *Tekhnichna ekspluatatsiia ta nadiinist [Technical operation and reliability]*. Lviv: Afisha [in Ukrainian].
23. Lutsiv I.V., Hevko Iv.B., Lyashuk O.L. & Dubynyak T.S. (2017). Dubynyak Investigation of dynamical impact loads in screw conveyer drives with safety clutches. *INMATEH - Agricultural Engineering* . Polytechnic University of Bucharest. Vol. 51, № 1. P. 69-76 [in English].

Ivan Hevko, Prof., DSc., **Victor Hud**, Prof., DSc., **Mykhailo Levkovich**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Maria Sipravska**, assist.

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

Research of Protective Elements of Technological Equipment and Equipment of Motor Transport Enterprises

Protective equipment is used in any equipment of motor vehicle enterprises, both to protect the equipment itself to reduce damage and for the worker. The protective elements of the equipment must provide high indicators of reliability and accuracy, therefore the purpose of this article is to conduct a study of these protective elements to improve their efficiency and reliability of operation when used on the equipment of motor vehicle enterprises.

In the work, research on the design of protective couplings of various types, as well as experimental studies of the torque of the protective elements of these couplings. The places of use of these couplings were given with justification of their effectiveness and expediency in this equipment. Design schemes of these couplings are presented and the principles of their operation are described. Experimental studies of the torque depending on the design features of these couplings, calculations of the transmission of the maximum and minimum torque of the proposed protective couplings were carried out. Also, the experimental method was used to determine the indicators of the accuracy of operation due to the load on the protective elements of the proposed couplings, which showed good results. The proposed pulse-type coupling showed the possibility of load control without special design changes, which makes its use universal and effective in equipment.

So, summing up, both experimental and theoretical studies can be concluded about the effectiveness of using these safety clutches in the equipment of motor vehicle enterprises. These protective clutches showed high indicators of accuracy and reliability of operation, which are confirmed by the results of research. Design features of the proposed protective couplings make their use universal, both for equipment with high load requirements and for mild loads, high accuracy of their operation makes them safe for workers.

safety clutches, reliability, car repair, design parameters, a stand for car repair

Одержано (Received) 11.09.2023

Прорецензовано (Reviewed) 23.09.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

О.Л. Ляшук, проф., д-р техн. наук, **У.М. Плекан**, канд. екон. наук, **О.П. Цьонь**, доц., канд. техн. наук, **Б.Р. Гевко**, канд. екон. наук

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

e-mail: tson_oleg_@ukr.net

Розвиток технологій гібридних силових установок автомобілів

У статті розглянуто питання підвищення коефіцієнта корисної дії силових установок автомобілів, збільшення паливної економічності та зниження викидів токсичних газів у сучасних транспортних засобах. Новітні технології в автомобільній промисловості постійно еволюціонують, включаючи й силові установки легкових автомобілів. Окреслено тенденції останніх років у розвитку електромобілів, які використовують електричні силові установки замість двигунів внутрішнього згорання. Проаналізовано сучасний розвиток гібридних автомобілів та встановлено, що головною особливістю гібридних автомобілів є поєднання роботи двох різних типів двигунів (внутрішнього згорання і електричного) та розподілення енергії між ними за допомогою спеціальної трансмісії. Основним завданням трансмісії в гібридних автомобілях є забезпечення ефективного розподілу потужності між двигунами внутрішнього згорання і електромоторами. Одним з основних типів трансмісій для гібридних автомобілів є планетарна трансмісія (також відома як планетарна шестерня). В цілому, комбінація роботи двигуна внутрішнього згорання і електричного у гібридних автомобілях дозволяє досягти оптимального балансу між паливною ефективністю та екологічністю, забезпечуючи зручність і продуктивність при русі на автошляхах.

гібрид, автомобілі, силова установка, трансмісія, двигун, рекуперація енергії, режими керування

Постановка проблеми. В сучасній автомобільній промисловості існують кілька перспективних напрямків розвитку, що стосуються покращення якості функціонування автомобільного транспорту. Одним з них є підвищення коефіцієнта корисної дії силових установок, збільшення паливної економічності та зниження викидів токсичних газів.

До складу силової установки входять двигун, трансмісія та ведучі колеса. Двигун внутрішнього згорання, який є основною силовою установкою автомобілів, на певних режимах роботи працює дуже неефективно та має високий рівень шкідливих викидів. У зв'язку зі зростаючим дефіцитом палива і підвищенням їх вартості, стає все більш актуальним завданням зменшення витрат останнього.

Одним із способів досягнення більш екологічно чистих та економічних силових установок для автотранспортних засобів є використання комбінованих їх типів. Це відкриває широкі можливості для зменшення споживання палива, зниження викидів шкідливих речовин та покращення загальної ефективності використання автомобілів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Велика кількість вчених та науковців працювали над дослідженням та розвитком технологій силових установок автомобілів протягом багатьох років. Вагомий внесок у галузь внесли Н. Тесла, Р. Дізель, К. Бенц, І. Маск.

Дослідження у сфері гібридних силових установок для автомобілів здійснюють як приватні організації, так і державні установи:

- Інститут електродинаміки Національної академії наук України. Проводяться дослідження в галузі електромобільності, включаючи розробку електричних та гібридних силових установок, акумуляторних батарей та систем керування [1].

- Київський національний університет технологій та дизайну. Дослідження в галузі гібридних силових установок для автомобілів, включаючи використання електромоторів та різних технологій енергозбереження на базі відділення "Альтернативна енергетика та транспорт" [2].

- Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". Дослідження використання розумних систем керування та оптимізації режимів роботи силових установок [3].

Українські вчені активно займаються дослідженнями в галузі та розробляють нові технології, спрямовані на підвищення ефективності та сталості силових установок автомобілів. Так у наукових дослідженнях [4] було розглянуто концептуальний підхід до створення системи діагностики силових елементів електропривода гібридного автомобіля. У роботі [5] автором зібрано та наведено деякі методики дослідників, за якими можливо здійснювати аналіз компоновальних схем та робочих процесів, що протікають у системах постачання енергій для руху легкових гібридних автомобілів.

Науковцями В. М. Павленко, В. І. Богдан, О. М. Тімков було розглянуто рівень розвитку впровадження альтернативних силових установок, а саме гібридних, в автомобілях та проаналізовано їх готовність до широкого використання [6, 7].

Разом з тим, новітні технології в автомобільній промисловості постійно еволюціонують, а тому зазначена проблематика залишається актуальною і потребує подальших досліджень.

Постановка завдання. Метою статті є висвітлення нововведень і трендів у галузі силових установок гібридних автомобілів. Мета дослідження обумовила виконання таких завдань:

- проаналізувати сутність силової установки автомобіля;
- описати спеціальну трансмісію гібридних автомобілів;
- окреслити режими роботи силової установки в гібридному автомобілі;
- проаналізувати сучасні технології силових установок транспортних засобів.

Виклад основного матеріалу. Комбіновані силові установки представляють собою поєднання декількох двигунів, що працюють за різними фізичними принципами. Це дозволяє досягти кращої ефективності, знизити викиди шкідливих речовин в атмосферу та оптимально використовувати паливо для ДВЗ.

Створення ефективних гібридних автотранспортних засобів через проведення дослідно-конструкторських робіт є актуальним та перспективним завданням з великим соціально-економічним значенням.

Практичне використання комбінованих силових установок дозволяє суттєво знизити вартість транспортування вантажів і пасажирів транспортним засобом, а також покращити його енергетичні та екологічні характеристики.

Гібридні автомобілі мають два типи двигунів: внутрішнього згорання (наприклад, бензиновий або дизельний двигун) і електричний двигун. Обидва типи двигунів працюють разом, але залежно від ряду факторів можуть функціонувати окремо або одночасно[8].

Гібридні транспортні засоби мають спеціальну трансмісію, яка дозволяє керувати передачею енергії між двигунами та колесами: механічну трансмісію, автоматичну трансмісію або поєднання обох типів. Основним завданням трансмісії в гібридних автомобілях є забезпечення ефективного розподілу потужності між двигунами внутрішнього згорання і електромоторами. Одним із широко використовуваних типів трансмісій для гібридних автомобілів є планетарна трансмісія (також відома як планетарна шестерня). Вона складається з набору шестерень із зубчатыми колесами, які можуть обертатися навколо спільної осі. Планетарна трансмісія забезпечує можливість

різних комбінацій між рухом двигуна внутрішнього згорання і електромоторів, що дозволяє досягати оптимального розподілу потужності залежно від умов їзди та вимог водія.

Іншим поширеним типом трансмісії є постійно змінна трансмісія. Вона працює на основі принципу використання різних комбінацій розміщення ременів і шківів, які забезпечують безступінчасте перемикання передач. Постійно змінна трансмісія дозволяє гібридним автомобілям плавно змінювати передачі, щоб підтримувати ефективність руху і оптимальний рівень обертового моменту.

Окрім цих основних типів, існують й інші варіанти трансмісій для гібридних автомобілів, такі як механічні трансмісії з електричним варіатором або з подвійним зчепленням. Кожен з цих типів має свої унікальні особливості будови і принципи функціонування, але загальна мета залишається незмінною – забезпечити оптимальний режим роботи автомобіля з урахуванням потужності обох двигунів.

Основні режими роботи силової установки у гібридному автомобілі включають:

1) Електричний режим. У цьому режимі автомобіль використовує тільки електричний двигун для приводу коліс. Електрична енергія постачається з батареї, яка зазвичай заряджається під час рекуперації енергії під час гальмування або зовнішнього джерела заряду. Цей режим зазвичай використовується під час низької швидкості або в міських умовах, де вимоги до потужності не настільки високі.

2) Гібридний режим. У гібридному режимі обидва двигуни працюють разом для приводу автомобіля. ДВЗ та електричний двигун спільно використовуються для забезпечення більшої потужності та кращої реакції на прискорення. Електричний двигун може допомагати ДВЗ під час розгону або при високих навантаженнях.

3) Режим заряду. У цьому режимі двигун внутрішнього згорання працює як генератор для батареї. Цей режим використовується, коли рівень заряду батареї досить низький і виникає потреба у підзарядці. ДВЗ використовує свою енергію для створення електричної енергії, яка потім направляється до батареї для подальшого використання електричним двигуном[9].

Режими роботи силової установки в гібридному автомобілі автоматично вибираються і керуються комп'ютером, який аналізує різні фактори, такі як швидкість руху, навантаження, рівень заряду батареї та ступінь прискорення. Система керування вибирає оптимальний режим роботи, забезпечуючи високу паливну ефективність і ефективне використання енергії. Цей гнучкий підхід до використання двох типів двигунів дозволяє гібридним автомобілям досягати кращої паливної економічності, особливо в умовах міської їзди, де часті зупинки та прискорення сприяють рекуперації енергії і використанню електричного режиму (рис. 1). Крім того, в гібридних автомобілях зазвичай є можливість ручного вибору режиму роботи, щоб водій міг впливати на використання енергії залежно від своїх потреб і умов на дорозі.

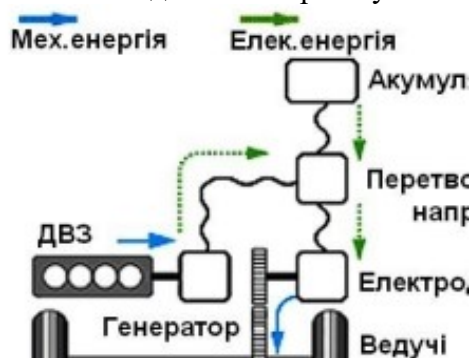


Рисунок 1 – Послідовна схема гібридного автомобіля

Джерело: [9]

Новітні технології в автомобільній промисловості постійно еволюціонують, включаючи й силові установки легкових автомобілів. Окреслимо тенденції останніх років у розвитку електричних автомобілів, які використовують електричні силові установки замість двигунів внутрішнього згорання.

Зростання діапазону ходу. Виробники електричних автомобілів працюють над покращенням ємності батарей та ефективності системи, щоб забезпечити більший діапазон ходу на одному заряді. Застосування нових матеріалів та покращена технологія батарей значно збільшують пробіг електромобілів.

Швидке заряджання. Розробники працюють над розширенням мережі зарядних станцій та розвитком технологій швидкого заряджання, що дозволяє автомобілям швидше заряджатись і зменшує час, необхідний для повної зарядки батареї.

Удосконалення силових електронних систем. Електричні автомобілі використовують складні системи керування та силову електроніку. Виробники постійно вдосконалюють ці системи для покращення продуктивності, безпеки та зручності водіїв.

Крім повністю електричних автомобілів, гібридні автомобілі стають все популярнішими, оскільки вони дозволяють зменшити споживання палива та знизити викиди в атмосферу. Розвиток гібридних автомобілів також характеризується кількома новими тенденціями (рис. 2).

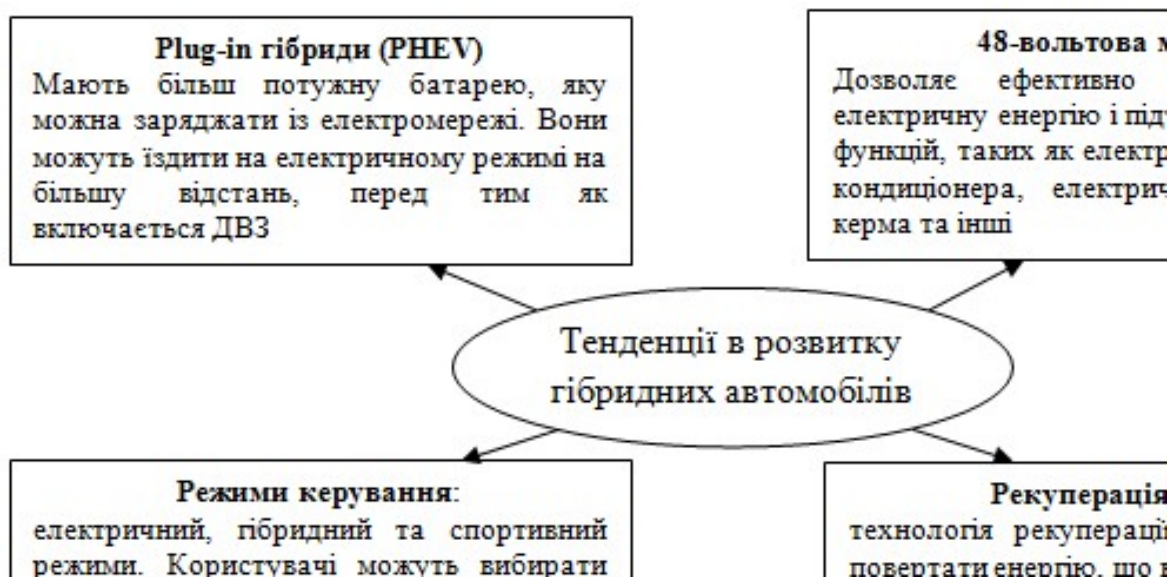


Рисунок 2 – Тенденції в розвитку гібридних автомобілів

Джерело: власна розробка

Plug-in гібридні автомобілі (PHEV) є типом гібридних автомобілів, які поєднують в собі два джерела енергії: електромотор та двигун внутрішнього згорання. PHEV відрізняються від звичайних гібридів тим, що в них є можливість заряджати батарею із електричної мережі, що дозволяє проїжджати більшу відстань на електричному заряді. Основна перевага PHEV полягає в тому, що вони дозволяють здійснювати поїздки виключно у електричному режимі, що зменшує споживання палива та викиди шкідливих речовин у повітря. Крім того, вони мають додаткову можливість заряджатися із електромережі, що розширює їх потенціал та дозволяє економити на паливі. Зазвичай PHEV мають меншу електричну потужність порівняно з повністю електричними автомобілями, але вони компенсують це наявністю ДВЗ. Це

означає, що водії PHEV можуть мати значно більший запас ходу порівняно з електромобілями, оскільки вони можуть використовувати двигун внутрішнього згоряння у разі, якщо заряд батареї знижується до певного рівня.

Оскільки PHEV мають два джерела енергії, вони можуть працювати у кількох режимах. Електричний режим, коли автомобіль працює тільки на електромоторі. Гібридний режим, коли працюють як електромотор, так і ДВЗ. Режим зарядки, коли ДВЗ використовується для заряджання батареї. Таким чином, PHEV можуть бути більш гнучкими в експлуатації, оскільки вони комбінують переваги електромобілів і гібридів з ДВЗ. Основні переваги Plug-in гібридів:

- економія палива;
- нижчі викиди шкідливих речовин в атмосферу;
- більша дальність поїздки;
- зарядка з електричної мережі;
- більша потужність;
- режими регенерації з відновленням енергії під час гальмування або спуску.

Необхідно відзначити, що конкретні характеристики PHEV можуть варіюватися в залежності від моделі та виробника автомобіля. Також важливо враховувати інфраструктуру зарядних станцій у вашому регіоні та інші фактори, які можуть впливати на ефективність використання PHEV.

В гібридних автомобілях 48-вольтова мережа представляє собою додаткову електричну систему, яка працює при напрузі 48V. Вона використовується для підтримки різних функцій автомобіля, зокрема для підвищення енергоефективності та покращення функціональності. Основною причиною використання 48-вольтової мережі є потреба у більш потужних та ефективних електричних системах в гібридних автомобілях.

Завдяки 48-вольтовій мережі гібридні автомобілі можуть мати додаткові електричні системи, наприклад, м'як-гібридні системи (MHEV - Mild Hybrid Electric Vehicles). У таких системах використовується 48-вольтовий стартер-генератор, який допомагає запускати двигун, а також виконує функцію генератора, що допомагає заряджати батарею. Крім того, 48-вольтова мережа дозволяє використовувати більш ефективні електричні компоненти, такі як електричні компресори, які забезпечують більш точне та ефективне управління системою кондиціонування повітря та іншими системами, що вимагають компресорного пристрою. 48-вольтова мережа також використовується в електричних автомобілях з підвищеною потужністю та рівнем електричних компонентів. Такі автомобілі можуть використовувати 48-вольтові акумулятори для живлення великих електричних навантажень, таких як електричні мотори, системи рекуперації енергії та інші. Ця система стає все більш поширеною у новітніх автомобільних технологіях, спрямованих на зменшення впливу на довкілля та підвищення продуктивності.

За останні роки режими керування в гібридних автомобілях зазнали значних змін, що зумовили:

- розширення діапазону режимів руху (залежно від умов дороги, стилю водіння та вимог ефективності);
- покращення режиму рекуперації енергії (можливість вибрати більшу або меншу міру рекуперації залежно від умов дороги та вимог водія);
- здатність прогнозування маршруту (системи навігації та зв'язку для прогнозування маршруту та оптимізації режиму роботи двигуна);
- розширення інтеграції зі смартфонами (віддалений контроль певних аспектів автомобіля за допомогою смартфона або іншого пристрою з підключенням до Інтернету) [10, 11].

Функція віддаленого контролю автомобіля за допомогою смартфона включають:

1. Дистанційний доступ та запуск двигуна, блокування або розблокування автомобіля, відкриття дверей.
2. Моніторинг рівня заряду батареї.
3. Управління системою кондиціонування повітря.
4. Діагностика стану автомобіля: рівня палива, стану шин тощо.

Важливою характеристикою гібридних автомобілів, яка допомагає зменшити споживання палива та покращити показники паливної ефективності є рекуперація енергії. Сучасні тенденції в рекуперації енергії спрямовані на постійне вдосконалення технологій, щоб забезпечити більш ефективний процес відновлення енергії.

Рекуперація енергії полягає у зборі та використанні енергії, яка виникає під час гальмування або руху транспортного засобу на спуск. У звичайних автомобілях ця енергія просто розсіюється у вигляді тепла, тоді як у гібридних автомобілях вона може бути перетворена на електричну енергію і збережена для подальшого використання. Виробники автомобілів використовують різні технології, такі як системи рекуперації гальмівної енергії, що дозволяють конвертувати кінетичну енергію руху автомобіля в електричну енергію, яка зберігається в акумуляторах. Деякі гібридні автомобілі використовують так званий "рекуперативний гальмівний ефект". Під час гальмування електромотори автомобіля перетворюються на генератори, що збирають енергію, яка зазвичай втрачалася би під час гальмування. Ця енергія перенаправляється до акумулятора для подальшого використання. Таким чином використовуючи рекуперацію, гібридні автомобілі можуть ефективно використовувати енергію, яка зазвичай була б втрачена під час гальмування. Це дозволяє збільшити загальну паливну ефективність автомобіля і зменшити його споживання.

На початкових етапах впровадження системи рекуперації енергії була обмежена гальмівними системами, але можливості акумуляування енергії із різних джерел розширюються. Наприклад, енергія отримується під час розгону автомобіля, зниження швидкості, під час руху на нерівностях дороги. Це дозволяє максимально використовувати можливості для рекуперації енергії та забезпечити ще більшу паливну ефективність. Рекуперація енергії поєднується з іншими технологіями енергозбереження. Загалом, сучасні тенденції в рекуперації енергії в гібридних автомобілях спрямовані на постійне вдосконалення технологій, щоб забезпечити більш ефективне і широкомасштабне її використання. Виробники автомобілів вкладають зусилля в розробку нових систем рекуперації, які забезпечують більше акумуляування та зберігання електричної енергії.

Крім того, розглядаються можливості інтеграції рекуперації з іншими джерелами енергії, такими як паливні елементи або сонячні панелі. Це дозволяє автомобілю отримувати додаткову електроенергію з різних джерел і забезпечувати більшу ефективність та незалежність від її зовнішніх джерел.

Зрозумілим є те, що рекуперація енергії в гібридних автомобілях є перспективним напрямом, а сучасні технології та тенденції спрямовані на максимально ефективне використання та збереження її для підвищення паливної ефективності і зниження викидів шкідливих речовин.

Висновки. Головна особливість гібридних автомобілів полягає в тому, що вони поєднують в собі роботу двох різних типів двигунів (внутрішнього згорання і електричного) та уможливають розподілення енергії між ними за допомогою спеціальної трансмісії. Це дозволяє досягти більшої паливної ефективності, зменшити викиди шкідливих речовин та покращити екологічні показники автомобіля. В цілому, комбінація роботи ДВЗ і електричного двигунів у гібридних автомобілях дозволяє

досягти оптимального балансу між паливною ефективністю та екологічністю, забезпечуючи зручність і продуктивність при русі на дорозі.

Розробка ефективних комбінованих силових установок для автотранспортних засобів є надзвичайно важливим завданням із високою економічною перевагою.

Список літератури

1. Національна академія наук України. Інститут електродинаміки: веб-сайт. URL: <https://ied.org.ua/innovacijni-propozycziyi/> (дата звернення: 06.07.2023).
2. Екологічний клуб Green University. КНЕУ імені Вадима Гетьмана: веб-сайт. URL: https://green.kneu.edu.ua/ua/form_eco/ (дата звернення: 06.07.2023).
3. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»: веб-сайт. URL: <https://www.kpi.kharkov.ua/ukr/nauka/> (дата звернення: 06.07.2023).
4. Борошенко Ю. М., Черевач А. В. Концепція діагностики електропривода гібридного автомобіля. *Автомоб. трансп.* 2012. Вип. 30. С. 59-64.
5. Кубіч В. І. Гібридні силові установки легкових автомобілів : навч. посіб. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 193 с.
6. Павленко В. М., Богдан В. І. Гібридні силові установки для сучасних автомобілів. *Вісн. Вінниць. політехн. ін-ту.* 2009. № 5. С. 108-111.
7. Тімков О. М., Григорашенко О. В. Поява гібридних силових установок на транспортних засобах. *Вісник Донецької академії автомобільного транспорту.* 2014. № 1. С. 42-47.
8. Гібридні автомобілі : монографія / О. В. Бажинов та ін. Харк. нац. автомоб.-дор. ун-т. Х.: Крок, 2008. 327 с.
9. ДВЗ з нетрадиційними робочим циклами. Напрямки розвитку транспортних енергетичних установок / Укл. : О. М. Артюх, О. В. Дударенко, А. Ю. Сосик, А. В. Щербина. *Запоріжжя : ЗНТУ,* 2019. 82 с.
10. Осетров О. О., Кравченко С.С., Чучуменко Б.С. Обґрунтування параметрів послідовної гібридної силовій установки легкового автомобіля. *Двигуни внутрішнього згоряння.* 2022. №1. С.78-85 DOI: 10.20998/0419-8719.2022.1.10
11. Тімков О. М., Ященко Д. М. До вибору типу гібридної силовій установки автомобіля категорії М1. *Вісник Донецької академії автомобільного транспорту.* 2014. № 2. С. 72-75.

References

1. National Academy of Sciences of Ukraine. Institute of Electrodynamics: Website. Retrieved from <https://ied.org.ua/innovacijni-propozycziyi/> [in Ukrainian].
2. Ecological club "Green University". KNEU named after Vadym Hetman : website. Retrieved from https://green.kneu.edu.ua/ua/form_eco/ [in Ukrainian].
3. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Website. Retrieved from <https://www.kpi.kharkov.ua/ukr/nauka/> [in Ukrainian].
4. Borodenko, Yu. N., & Cherevach, A. V. (2012). Konceptija diagnostiki elektroprivoda gibridnogo avtomobilja [The concept of diagnosis of the electric drive of a hybrid car]. *Avtomob. transp. – Automobile transport, (30)*, 59-64 [in Ukrainian].
5. Kubich, V. I., & Kubych, V. Y. (2021). *Hibrydni sylovi ustanovky lehkovykh avtomobiliv [Hybrid power plants of passenger cars]*. Zaporizhzhia : NU «Zaporiz'ka politekhnika» [in Ukrainian].
6. Pavlenko, V. M., & Bohdan, V. I. (2009). Hibrydni sylovi ustanovky dlia suchasnykh avtomobiliv [Hybrid power plants for modern cars] . *Visn. Vinnyts. politekhn. in-tu – Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute, № 5*, 108-111 [in Ukrainian].
7. Timkov, O.M., & Hryhorashenko, O.V. (2014). Poiava hibrydnykh sylovykh ustanovok na transportnykh zasobakh [The emergence of hybrid power plants on vehicles.]. *Visnyk Donetskoï akademii avtomobilnoho transportu – Bulletin of the Donetsk Academy of Automobile Transport, (1)*, 42-47 [in Ukrainian].
8. Bazhynov, O.V. et al. (2008). *Hibrydni avtomobili [Hybrid cars]*. Kh.: Krok [in Ukrainian].
9. Artiukh, O. M., Artiukh, A. N., Dudarenko, O. V., Dudarenko, O. V., Sosyk, A. Yu. et al. (2019). *Teksty (konspekt lektzii) z dystsypliny "Transportni enerhetychni ustanovky"*. Part. 4 . Zaporizhzhia : ZNTU [in Ukrainian].
10. Osetrov, O.O., Kravchenko, S.S., & Chuchumenko, B.S. (2022). Obhruntuvannia parametriv poslidovnoi hibrydnoi sylovoi ustanovky lehkovoho avtomobilja [Justification of the parameters of a sequential hybrid power plant of a passenger car]. *Dvyhuny vnutrishnoho zgoriannia – Internal combustion engines, (1)*, 78-85 [in Ukrainian].

11. Timkov, O.M., & Yashchenko, D.M. (2014). Do vyboru typu hibrydnoi sylovoi ustanovky avtomobilia katehorii M1 [Before choosing the type of hybrid power plant of the M1 category car.]. *Visnyk Donetskoï akademii avtomobilnoho transportu – Bulletin of the Donetsk Academy of Road Transport*, (2), 72-75 [in Ukrainian].

Oleg Lyashuk, Prof., DSc., **Uliana Plekan**, PhD econ. sci., **Oleg Tson**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Bogdan Gevko**, PhD econ. sci.

Ternopil Ivan Puluĵ National Technical University, Ternopil, Ukraine

Development Technologies of Cars Hybrid Power Plants

Innovations and trends in the field of power plants of hybrid cars were covered in the article. The essence of the car's power plant was analyzed. The special transmission of hybrid cars was described. The modes of operation of the power plant in a hybrid car were outlined. Modern technologies of power plants of cars were given.

The issue of increasing the efficiency of propulsion system of cars, increasing fuel efficiency and reducing toxic gas emissions in modern automotive industry was considered. It was emphasized that the practical use of combined power plants allows to significantly reduce the cost of transporting goods and passengers by vehicle, as well as to improve energy and environmental characteristics. The main modes of operation of the power plant in a hybrid car were listed by the authors, in particular: electric mode, hybrid mode, charge mode. Trends in the development of electric cars, which use electric propulsion systems instead of internal combustion engines, have been outlined. The trend of recent years in the development of electric cars included: an increase in the range of travel, fast charging and improvement of power electronic systems. The modern development of hybrid cars was analyzed in the article, in particular: Plug-in hybrid cars, use of a 48-volt network, an improvement of control modes in hybrid cars and energy recovery systems. Special attention was paid to changes in driving modes of hybrid cars.

In general, the technologies of power plants of cars are developing rapidly, are aimed at reducing fuel consumption. A combination of internal combustion and electric motors in hybrid cars makes it possible to achieve an optimal balance between fuel efficiency and environmental friendliness, and ensures convenience and performance when driving on the road.

hybrid, cars, propulsion system, transmission, engine, energy recovery, control modes

Одержано (Received) 27.09.2023

Прорецензовано (Reviewed) 08.10.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

UDC 629.017

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.146-152](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.146-152)

Michael Podryhalo, Prof., DSc., **Olexand Polyanskyi**, Prof., DSc., **Yevgeniy Dubinin**, Prof., DSc., **Dmytro Klets**, Prof., DSc., **Vladyslava Baidala**, Assist., **Maksym Krasnokutskyi**, post graduate

Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

e-mail: dubinin-rmn@ukr.net

Improving the Accuracy of Wheeled Vehicle Acceleration Estimation During Testing

The study considers the influence of installation errors during the installation of linear acceleration sensors on the accuracy of measurements during testing of wheeled vehicles, including the dynamic stability of the position. The possibility of automatic correction of these errors to improve measurement accuracy is considered. The work includes establishing the dependence of linear acceleration components on the angular deviations of the axes of the wheeled vehicle coordinate system and developing a method of automatic correction in real time to ensure high quality measurements and maintain the reliability of measurement systems.

wheeled machine, measurement error, deviation, acceleration, automation

© M. Podryhalo, O. Polyanskyi, Ye. Dubinin, D. Klets, V. Baidala, M. Krasnokutskyi, 2023

Formulation of the problem. The installation error of linear acceleration sensors can significantly affect the measurement accuracy. To increase the accuracy, it is necessary to correct the position of the sensors relative to the selected wheeled vehicle coordinate system. This is especially true for certification tests of wheeled vehicles, when the results of measurements determine the subsequent decision on the approval and operation of new or modernized wheeled vehicles.

Therefore, research aimed at improving the accuracy of estimating wheeled vehicle accelerations during testing is timely and relevant.

Analysis of recent research and publications. Paper [1] investigated the dynamics of parameter changes during the calibration of linear acceleration sensors to quickly check the sensitivity of the developed mobile registration and measurement complex before starting road tests. The author of [2] developed a methodology for determining the angle of longitudinal inclination of a vehicle and the slope of the road during dynamic tests. This technique significantly reduces the error when recording the parameters of wheeled vehicle movement, as well as tests on a road irregularities or uneven slope. The authors of [3] developed a mobile registration and measurement complex (MRMC) for dynamic testing of wheeled vehicles, which contributed to the development of software for analyzing signals received from the sensors. The mobile registration and measuring complex has been improved and received a more modern version [4, 5], which automatically takes into account measurement errors when using.

Setting objectives. The aim of the work is to clarify the dependencies of linear acceleration components on angular deviations of the axes of the wheeled vehicle coordinate system to improve the accuracy and reliability of measurements.

Achieving this goal involves solving the following tasks:

- to establish the dependence of linear acceleration components on the angular deviations of the axes of the wheeled vehicle coordinate system;
- estimate the error values that may occur when installing acceleration sensors on a wheeled vehicle based on the obtained equations;
- develop methods and strategies for automatic real-time correction to ensure high quality measurements and maintain the reliability of measurement systems.

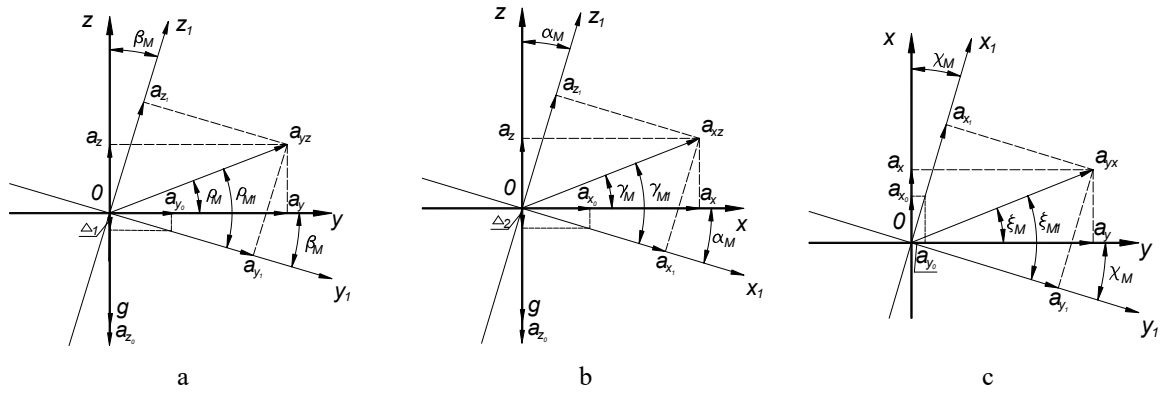
Presenting main material. During installation, the sensor axes are set according to the signal values: OZ axis – signal $a_z = g$; OX axis – signal $a_x = 0$; OY axis – signal $a_y = 0$ (a_x, a_y, a_z – the values of the linear acceleration components along the coordinate axes). However, the machine itself may be located on a support surface that is not horizontal. Therefore, it is necessary to introduce an automatic correction for the deviation of signals of linear acceleration sensors along the coordinate axes caused by the mismatch of their axes with the directions of the selected axes of the wheeled vehicle [6].

Consider the case of a mismatch between the location of the axes of a wheeled vehicle and acceleration sensors in the vertical transverse plane, which is a priority when assessing position stability. Let's assume that in the transverse plane, the coordinate system of the YOZ sensors is rotated relative to the Y_1OZ_1 , coordinate system associated with the machine by an angle of β_m (Fig. 1).

When the machine coordinate system is rotated clockwise relative to the sensor coordinate system, the angle β_m is considered negative, and counterclockwise – positive. Determination of the angle β_m is possible when moving from a standstill by generating test signals a_{z0} and a_{y0} .

In this case, the angle of rotation of the sensor coordinate system relative to the machine coordinate system is determined by the test signal value

$$\beta_m = \frac{\Delta_1}{a_{y0}} = \operatorname{arctg} \left(\frac{a_{z0} - g}{a_{y0}} \right) \quad (1)$$



a – in the transverse plane; b – in the longitudinal plane; c – in the horizontal plane
 Figure 1 – Determining the relationships between coordinates

Source: developed by the author

Suppose that the coordinate system of the sensors is shifted relative to the coordinate system of the wheeled vehicle only in the transverse plane by an angle β_M ($a_{y0} = 0, \chi_M = 0$). In this case, there is no axis shift in other planes.

In this case

$$\begin{cases} a_{yz}^2 = a_{z1}^2 + a_{y1}^2 = a_z^2 + a_y^2; \\ \frac{a_z}{a_y} = \operatorname{tg} \rho_M; \\ \frac{a_{z1}}{a_{y1}} = \operatorname{tg} \rho_{M1}; \\ \rho_{M1} = \rho_M + \beta_M. \end{cases} \quad (2)$$

Equation (2) is reduced to the form

$$a_{y1}^2 \cdot \left(1 + \frac{a_{z1}^2}{a_{y1}^2} \right) = a_y^2 \cdot \left(1 + \frac{a_z^2}{a_y^2} \right). \quad (3)$$

Where we get it from

$$\begin{aligned} a_{y1} &= a_y \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{a_z^2}{a_y^2}}{1 + \frac{a_{z1}^2}{a_{y1}^2}}} = a_y \cdot \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \rho_M}{1 + \operatorname{tg}^2 (\rho_M + \beta_M)}} = a_y \cdot \frac{\cos(\rho_M + \beta_M)}{\cos \rho_M} \\ &= a_y \cdot \cos \beta_M \left(1 - \frac{a_z}{a_y} \operatorname{tg} \beta_M \right) = a_y \cdot \delta_y, \end{aligned} \quad (4)$$

where δ_y – the correction in the value of the sensor readings oriented along the OY axis

$$\delta_y = \cos \beta_M \left(1 - \frac{a_z}{a_y} \operatorname{tg} \beta_M \right). \quad (5)$$

After similar transformations, we get

$$a_{z1} = a_z \cos \beta_M \left(1 + \frac{a_z}{a_y} \operatorname{tg} \beta_M \right) = a_z \cdot \delta_z, \quad (6)$$

$$\delta_z = \cos \beta_M \left(1 + \frac{a_y}{a_z} \operatorname{tg} \beta_M \right), \quad (7)$$

where δ_z – correction in the value of sensor readings oriented along the OZ axis.

For other coordinate axes, the correction for the installation error can be determined as follows: the angle of rotation of the sensor coordinate system relative to the wheeled vehicle coordinate system in the longitudinal plane is determined by the following relationship

$$a_m = \frac{\Delta_2}{a_{x0}} = \operatorname{arctg}\left(\frac{a_{z0} - g}{a_{x0}}\right). \quad (8)$$

We assume that the coordinate system of the sensors is shifted relative to the coordinate system of the wheeled vehicle only in the longitudinal plane by an angle α_m . At the same time, $\beta_m = 0$ and $\chi_m = 0$. In this case

$$\begin{cases} a_{yz}^2 = a_{z1}^2 + a_{y1}^2 = a_z^2 + a_y^2; \\ \frac{a_z}{a_y} = \operatorname{tg}\rho_m; \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \frac{a_{z1}}{a_{y1}} = \operatorname{tg}\rho_{m1}; \\ \rho_{m1} = \rho_m + \beta_m. \end{cases} \quad (10)$$

Equation (9) is reduced to the form

$$a_{x1}^2 \cdot \left(1 + \frac{a_{z1}^2}{a_{x1}^2}\right) = a_x^2 \cdot \left(1 + \frac{a_z^2}{a_x^2}\right) \quad (11)$$

we get

$$\begin{aligned} a_{x1} &= a_x \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{a_z^2}{a_x^2}}{1 + \frac{a_{z1}^2}{a_{x1}^2}}} = a_x \cdot \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2\gamma_m}{1 + \operatorname{tg}^2(\gamma_m + \alpha_m)}} = a_x \cdot \frac{\cos(\gamma_m + \alpha_m)}{\cos\gamma_m} = \\ &= a_x \cdot \cos\alpha_m \left(1 - \frac{a_z}{a_x} \operatorname{tg}\alpha_m\right) = a_x \cdot \delta_x, \end{aligned} \quad (12)$$

where δ_x – refinement by the value of the sensor readings, which is oriented along the OX axis

$$\delta_x = \cos\alpha_m \left(1 - \frac{a_z}{a_x} \operatorname{tg}\alpha_m\right). \quad (13)$$

From equation (10) we obtain

$$a_{z1} \cdot = a_{x1} \operatorname{tg}\gamma_m = a_{x1} \operatorname{tg}(\gamma_m + \alpha_m) = a_{x1} \frac{\frac{a_z}{a_x} + \operatorname{tg}\alpha_m}{1 - \frac{a_z}{a_x} \operatorname{tg}\alpha_m}. \quad (14)$$

Substituting (12) into (14), we obtain

$$a_{z1} \cdot = a_z \cos\alpha_m \left(1 + \frac{a_x}{a_z} \operatorname{tg}\alpha_m\right) = a_z \cdot \delta_z, \quad (15)$$

$$\delta_1 \cdot = \cos\alpha_m \left(1 - \frac{a_x}{a_z} \operatorname{tg}\alpha_m\right). \quad (16)$$

In the horizontal plane, the angle of rotation of the sensor coordinate system relative to the wheeled vehicle coordinate system is determined by the following relationship

$$\chi_m = \operatorname{arctg}\left(\frac{a_{y0}}{a_{x0}}\right). \quad (17)$$

Let's assume that the sensor coordinate system is offset from the wheeled vehicle coordinate system only in the horizontal plane by an angle χ_M . In this case, there is no axis shift in other planes ($\alpha_M = 0; \beta_M = 0$). After performing transformations similar to the previous ones, the following expressions are obtained

$$a_{y1} = a_y \cdot \cos \chi_M \left(1 - \frac{a_x}{a_y} \operatorname{tg} \chi_M \right) = a_y \cdot \delta_y, \quad (18)$$

$$\delta_1 = \cos \chi_M \left(1 - \frac{a_x}{a_y} \operatorname{tg} \chi_M \right), \quad (19)$$

$$a_{x1} = a_x \cdot \cos \chi_M \left(1 - \frac{a_y}{a_x} \operatorname{tg} \chi_M \right) = a_x \cdot \delta_x, \quad (20)$$

$$\delta_x = \cos \chi_M \left(1 + \frac{a_y}{a_x} \operatorname{tg} \chi_M \right). \quad (21)$$

Let us consider the general case when $\alpha_M \neq 0; \beta_M \neq 0; \chi_M \neq 0$. In this case, the expression

$$a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 = a_{x1}^2 + a_{y1}^2 + a_{z1}^2. \quad (22)$$

From expression (22) we define

$$a_{x1} = a_x \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{a_y^2}{a_x^2} + \frac{a_z^2}{a_x^2}}{1 + \frac{a_{y1}^2}{a_{x1}^2} + \frac{a_{z1}^2}{a_{x1}^2}}} = a_x \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \xi_M} + \operatorname{tg}^2 \gamma_M}{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \xi_{M1}} + \operatorname{tg}^2 \gamma_{M1}}}, \quad (23)$$

$$a_{y1} = a_y \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{a_x^2}{a_y^2} + \frac{a_z^2}{a_y^2}}{1 + \frac{a_{x1}^2}{a_{y1}^2} + \frac{a_{z1}^2}{a_{y1}^2}}} = a_y \cdot \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \xi_M + \operatorname{tg}^2 \rho_M}{1 + \operatorname{tg}^2 \xi_{M1} + \operatorname{tg}^2 \rho_{M1}}}, \quad (24)$$

$$a_{z1} = a_z \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{a_x^2}{a_z^2} + \frac{a_y^2}{a_z^2}}{1 + \frac{a_{x1}^2}{a_{z1}^2} + \frac{a_{y1}^2}{a_{z1}^2}}} = a_z \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \gamma_M} + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \rho_M}}{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \gamma_{M1}} + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \rho_{M1}}}}. \quad (25)$$

Given the ratio of

$$\operatorname{tg} \xi_M = \frac{a_x}{a_y}, \quad (26)$$

$$\operatorname{tg} \xi_{M1} = \frac{a_{x1}}{a_{y1}}, \quad (27)$$

$$\xi_{M1} = \xi_M + \varphi_M \quad (28)$$

we get

$$a_{x1} = a_x \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{a_y^2}{a_x^2} + \frac{a_z^2}{a_x^2}}{1 + \left(\frac{\frac{a_y}{a_x} \operatorname{ctg} \chi_M - 1}{\frac{a_y}{a_x} + \operatorname{ctg} \chi_M} \right)^2 + \left(\frac{\frac{a_z}{a_x} + \operatorname{tg} \alpha_M}{1 - \frac{a_z}{a_x} \operatorname{tg} \alpha_M} \right)^2}} = a_x \cdot \delta_x, \quad (29)$$

$$a_{y1} = a_y \cdot \frac{\sqrt{1 + \frac{a_x^2}{a_y^2} + \frac{a_z^2}{a_y^2}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\frac{a_x}{a_y} + \operatorname{tg} \chi_m}{1 - \frac{a_x}{a_y} \operatorname{tg} \chi_m} \right)^2 + \left(\frac{\frac{a_z}{a_y} + \operatorname{tg} \beta_m}{1 - \frac{a_z}{a_y} \operatorname{tg} \beta_m} \right)^2}} = a_y \cdot \delta_y, \quad (30)$$

$$a_{z1} = a_z \cdot \frac{\sqrt{1 + \frac{a_x^2}{a_z^2} + \frac{a_y^2}{a_z^2}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\frac{a_x}{a_y} \operatorname{ctg} \alpha_m - 1}{\frac{a_x}{a_y} + \operatorname{ctg} \alpha_m} \right)^2 + \left(\frac{\frac{a_y}{a_z} \operatorname{ctg} \beta_m - 1}{\frac{a_y}{a_z} + \operatorname{ctg} \beta_m} \right)^2}} = a_z \cdot \delta_z \quad (31)$$

Therefore, these established dependencies open up the possibility of implementing automatic correction of errors in the installation of acceleration sensors, including those related to the vertical transverse plane when assessing the stability of the position of wheeled vehicles.

Conclusions.

1. The obtained refined dependencies of linear acceleration components on angular deviations of the axes of the wheeled vehicle coordinate system are a significant step in the further development of measurement and control systems. These dependencies open up the possibility of automatic correction of inaccuracies in the installation of acceleration sensors, which is crucial for achieving high measurement accuracy.

2. Using the equations obtained, a qualitative and quantitative assessment of the potential errors that can occur during the installation of acceleration sensors on a wheeled vehicle can be made. This assessment is critical to ensuring the reliability and accuracy of measurements in real-world applications. In addition, based on these dependencies, methods and strategies can be developed for the automatic real-time correction, which will maintain high quality measurements even when sensor installation changes are possible

3. The results obtained have a high potential for further improvement of measurement and control systems in the field of wheeled vehicles. This will improve the quality and reliability of measurements and open up the possibility of automatic correction of systematic errors in real time.

List of references

1. Клец Д. М. Градуировка акселерометров методом постоянного ускорения . *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. 2012. Вип.2 (32), Т. 1. С. 87–92.
2. Клец Д. М. Определение угла продольного наклона автомобиля при проведении динамических испытаний . *Транспортне машинобудування: зб. наук. пр.* 2011. № 18 . С. 24–29.
3. Пат. 51031 Україна, МПК G01P 3/00. Система для визначення параметрів руху автотранспортних засобів при динамічних (кваліметричних) випробуваннях / Подригало М. А., Коробко А. І., Клец Д. М., Файст В. Л.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. університет. №u201001136; заявл. 04.02.10; опубл. 25.06.10, Бюл. № 12.
4. Клец Д.М., Дубінін Є.О., Полянський О.С. Мобільний реєстраційно-вимірювальний комплекс із застосуванням сучасних інформаційних технологій . *Новітні технології – для захисту повітряного простору: XVI наук. конф., ХУПС ім. І.Кожедуба; Харків, 15-16 квітня 2020 р. Харків, 2020. С. 529-530.*
5. Вдосконалення концепції забезпечення стабільності експлуатаційних властивостей колісних машин / Д.М. Клец та ін. *Збірник тез доповідей X міжнародної науково-практичної конференції, 29 жовтня*

- 2021 р. Харків: Національна академія Національної гвардії України, 2021. С. 121-124.
6. Подригало М. А. Повышение точности измерения ускорений мобильных машин путем снижения монтажной погрешности датчиков / М.А. Подригало та ін. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2012. Вип. 2, Т. 5. С. 84–92. URL: <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdata/V12T5.html> (дата звернення: 11.09.2023).

References

1. Klets, D.M. (2012). Graduirovka akselerometrov metodom postojannogo uskorenija [Calibration of accelerometers using the constant acceleration method]. – *Collection of scientific works (branch engineering, construction), Issue 2 (32), Vol. 1.* 87–92 [in Russian].
2. Klets, D.M. (2011). Opredelenie ugla prodol'nogo naklona avtomobilja pri provedenii dinamicheskikh ispytaniy [Determination of the longitudinal inclination angle of a vehicle during dynamic tests]. *Transportne mashynobuduvannia: zb. nauk. pr – Transport engineering: collection of scientific, No. 18,* 24–29 [in Russian].
3. Podryhalo M. A., Korobko A. I., Klets D. M., Feist V. L. (2010). [A system for determining the parameters of movement of motor vehicles during dynamic (qualimetric) tests] . Pat. 51031 Ukraine, IPC G01P 3/00.; applicant and patentee Kharkiv National Automobile and Highway University – №u201001136; application for a patent for Ukraine filed on February 04, 2010; published on June 25, 2010, Bulletin № 12.
4. Klets, D.M., Dubinin, Ye.O. & Polyansky, O.S. (2020). Mobil'nyj reestratsijno-vymiriuval'nyj kompleks iz zastosuvanniam suchasnykh informatsijnykh tekhnolohij [Mobile registration and measuring complex with the use of modern information technologies] . The latest technologies for airspace protection New technologies for airspace protection: *XVI nauk. konf., KhUPS im. I.Kozheduba (15-16 kvitnia 2020 r. Kharkiv) – XVI Scientific Conference, Kharkiv National University of Aeronautics and Space (P. 529-530).* Kharkiv [in Ukrainian].
5. Klets, D.M., Dubinin, Ye.O., Podryhalo, M.A., Polyansky, O.S. & Baidala, V.Y. (2021). [Improving the concept of ensuring the stability of the operational properties of wheeled vehicles] . Collection of abstracts of the X International Scientific and Practical Conference October 29, 2021 – Kharkiv: National Academy of the National Guard of Ukraine, P. 121-124 [in Ukrainian].
6. Podryhalo, M.A., Polyansky, A.S., Klets, D.M., Dubinin, E.A. & Artyomov N.P. (2012). Povyshenye tochnosti yzmerenya uskorenyj mobylnykh mashyn putem snyzheniya montazhnoj pohreshnosti datchykov. [Zadorozhnaya Increasing the accuracy of measuring acceleration of mobile vehicles by reducing the installation error of sensors]. *Naukovyj visnyk Tavrijs'koho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu – Scientific Bulletin of Tavria State Agrotechnological University , Issue 2, Vol. 5,* 84-92. Retrieved from <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdata/V12T5.html> [in Ukrainian]

М.А. Подригало, проф., д-р техн. наук, **О.С. Полянський**, проф., д-р техн. наук, **Є.О. Дубінін**, проф., д-р техн. наук, **Д.М. Клец**, проф., д-р техн. наук, **В.Ю. Байдала**, асист., **М.В. Краснокутський**, аспір.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м.Харків, Україна

Підвищення точності оцінювання прискорень колісних машин при випробуваннях

У дослідженні розглянуто вплив монтажною похибки під час установки датчиків лінійних прискорень на точність вимірювань при проведенні випробувань колісних машин, в тому числі – на динамічну стійкість положення. Розглянуто можливість автоматичного коригування цих похибок для поліпшення точності вимірювань. Робота включає встановлення залежності компонент лінійних прискорень від кутових відхилень осей системи координат колісної машини та розробку методу автоматичного коригування в реальному часі для забезпечення високої якості вимірювань і підтримання надійності вимірювальних систем.

Використовуючи отримані в роботі рівняння, можна провести якісну та кількісну оцінку потенційних похибок, що можуть виникнути під час монтажу датчиків прискорень на колісній машині. З урахуванням цих залежностей можна розробити методи та стратегії виправлення похибок у реальному часі при можливих змінах установки датчиків.

Отримані результати мають важливе значення для поліпшення систем вимірювань та контролю динамічних параметрів колісних машин, забезпечуючи надійність та автоматичне виправлення системних похибок.

колісна машина, похибка вимірювання, відхилення, прискорення, автоматизація

Одержано (Received) 02.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 22.10.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

І.Б. Гевко, проф., д-р техн. наук, **О.Л. Ляшук**, проф., д-р техн. наук,
Р.М. Рогатинський, проф., д-р техн. наук, **А.Й. Матвіїшин** доц., канд. техн. наук,
Р.В. Хорошун, асист.

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

e-mail: roman_086@ukr.net

Синтез підвіски автотранспортних засобів

З метою створення прогресивних конструкцій автомобільних амортизаторів, які б забезпечували підвищений комфорт і безпеку водіння за рахунок поглинання ударів і коливань, що виникають під час руху по дорозі, нами було проведено їх структурно-схемний синтез методом ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу. Загальна кількість базових генерованих варіантів підвіски автотранспортного засобу становитиме 167 варіантів, а кількість базових варіантів в залежності від типу амортизаційного принципу коливатиметься у межах від 96 до 148 варіантів. Використовуючи даний метод синтезу нами було розроблено і досліджено конструкцій гідропневматичних амортизаторів з активним пневмобалоном та демпфуючими елементами, які у порівнянні з традиційними стійками володіли високою адаптивністю та вібраційною стійкістю.

структурно-схемний синтез, адаптивна підвіска, автотранспортний засіб, конструктивні ознаки елементів, морфологічний аналіз

Постановка проблеми. Автомобільні амортизатори є важливими елементами підвіски автомобілів, які впливають на комфорт і безпеку водіння. Вони призначені для поглинання ударів і коливань, які виникають під час руху по дорозі. Проблеми з автомобільними амортизаторами можуть призвести до різних негативних наслідків, включаючи погіршення керованості автомобіля, знос інших деталей підвіски, а також збільшення ризику дорожньо-транспортних пригод. Проблема полягає в тому, що автомобільні амортизатори піддаються зносу і втраті ефективності внаслідок різних чинників, таких як нерівність доріг, великі навантаження, агресивна експлуатація і час. Недіагностовані та необслуговані амортизатори можуть створити низку проблем:

Погіршення комфорту водіння: Зношені амортизатори не можуть ефективно поглинати удари і коливання, що призводить до незручностей для водія та пасажирів під час руху по нерівних дорогах.

Втрата керованості: Погіршення стабільності та керованості автомобіля може виникнути через недостатню дію амортизаторів. Це може призвести до небезпеки на дорозі та збільшення ризику дорожньо-транспортних пригод.

Знос інших компонентів підвіски: Недіагностовані амортизатори можуть призвести до зносу інших деталей підвіски, таких як пружини, опорні підшипники, та інші елементи, що впливають на ефективність та безпеку водіння.

Збільшення витрат на паливе: Погіршення динаміки автомобіля і збільшення опору на дорозі може призвести до збільшення споживання пального, що впливає на економічну ефективність експлуатації автомобіля.

Для їх створення і подальшого дослідження необхідно здійснити розроблення окремих раціональних конструкцій, які б відповідали відповідним параметрам у царині досягнення якісних показників процесу, а також прийнятної собівартості виготовлення, експлуатації та обслуговування таких конструкцій. Задля цього і доцільно скористатись методикою структурно-схемного синтезу методом ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу для отримання відповідних технічних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Провідні автовиробники для підвищення плавності ходу автотранспортних засобів у їх конструкціях використовують керовані системи підвіски [10, 12, 14, 16], які позитивно впливають на плавність ходу і знижують коливні процеси, що спричиняються різноманітними факторами (нерівностями дороги, різкими поворотами тощо). У роботах [3, 5, 7, 13, 15, 17, 18] проведено дослідження коливань, спричинених різноманітними факторами, та засобів підвищення віброзахисних властивостей підвісок із застосуванням пневматичних, гідропневматичних і гідравлічних амортизаторів.

Розробці способів та методів пошуку нових ідей технічного спрямування загалом, й зокрема у галузі автомобілебудування, присвячені праці В. Одріна, С. Картавова [4], Ю. Кузнєцова [2], Б. Гевка [6], М. Левковича [1] та інших. На базі використаних методик було розроблено стендове обладнання для проведення досліджень підвіски автомобіля при статичному та динамічному навантаженнях [8, 9, 11]. Проте враховуючи потреби у покращенні безпеки та комфорту водіння, підвищення надійності і довговічності роботи елементів трансмісії автомобіля, а також економії витрат на його ремонт актуальним питанням залишається генерування прогресивних конструкцій підвіски автотранспортних засобів з подальшим їх дослідженням і використанням.

Постановка завдання. Метою роботи є генерування конструкцій підвіски автотранспортних засобів на основі застосування структурно-схемного синтезу методом ієрархічного групування за допомогою морфологічного аналізу.

Виклад основного матеріалу. З метою створення прогресивних конструкцій автомобільних амортизаторів, які б забезпечували підвищений комфорт і безпеку водіння за рахунок поглинання ударів і коливань, що виникають під час руху по дорозі, нами було проведено їх структурно-схемний синтез методом ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу [1, 6]. Здійснивши аналіз роботи підвіски автотранспортного засобу було визначено окремі конструктивні ознаки та елементи підвіски та їх взаємозв'язки. Це дало змогу здійснити побудову відповідної морфологічної таблиці конструктивних ознак та елементів (табл. 1), з якої, в подальшому, експертним методом було створено модель механічної системи «Підвіска автотранспортного засобу» (рис. 1).

При цьому було виділено такі базові морфологічні конструктивні ознаки та елементи:

- амортизаційний принцип, який включає такі ознаки: тип амортизаційного принципу; тип амортизаційної речовини; отвори протікання гідравлічної речовини в поршні (їх площу і кількість); кількість камер; розташування камер; кількість електромагнітних котушок;

- тип пружного елемента, що складається з двох основних ознак, а саме пружина, до конструктивних ознак якої віднесено наступні ознаки: конструкція; геометричний переріз; жорсткість; направленість; кількість; розташування; та пневмобалон, до конструктивних ознак якого віднесено наступне: геометричні параметри; керованість (адаптивність); конструкція; наповнення; жорсткість;

- демпфуючий елемент, який включає такі ознаки: розташування; кількість; матеріал; поєднання; конструктивні параметри.

Загальна кількість базових синтезованих варіантів при використанні даного методу визначається по формулі [1, 6]:

$$N = \sum_{z=1}^l \sum_{x=1}^q \prod_{i=1}^m K_i, \quad (1)$$

Таблиця 1 – Морфологічна таблиця конструктивних ознак та елементів підвіски автотранспортного засобу

Амортизаційний принцип	1. Тип		1.1. Гідравлічний; 1.2. Гідропневматичний; 1.3. Пневматичний; 1.4. Магніторідинний; 1.5. Гідровакуумний; 1.6. Пневмовакуумний.
	2. Тип амортизаційної речовини		2.1. Гідравлічні речовини низької в'язкості; 2.2. Гідравлічні речовини середньої в'язкості; 2.3. Гідравлічні речовини високої в'язкості; 2.4. Гідравлічні речовини з металевими частинками; 2.5. Гази низької в'язкості; гази середньої в'язкості; 2.6. Гази високої в'язкості.
	Отвори протікання гідравлічної речовини в поршні	3. Площа	3.1. Мала; 3.2. Середня; 3.3. Велика.
		4. Кількість	4.1. Низька; 4.2. Середня; 4.3. Значна.
	5. Кількість камер		5.1. Дві; 5.2. Три; 5.3. Чотири; 5.4. Більше чотирьох.
	6. Розташування камер		6.1. Послідовне; 6.2. Паралельне; 6.3. Послідовно-паралельне; 6.4. З бічним розташуванням.
	7. Кількість електромагнітних катушок		7.1. Дві; 7.2. Три; 7.3. Більше трьох.
Тип пружного елемента	Пружина	8. Конструкція	8.1. Циліндрична; 8.2. Конічна; 8.3. Еліпсна; 8.4. Телескопічна 8.5. Стрічкова стиснення; 8.6. Тарілчаста; 8.7. Кільцева; 8.8. Вигину.
		9. Геометричний переріз	9.1. Круглий; 9.2. Трикутний; 9.3. Квадратний; 9.4. Еліпсний; 9.5. Прямокутний; 9.6. Трапецеїдальний.
	10. Жорсткість		10. 1. Низька;

Пневмобалон		10.2. Середня. 10.3. Висока.
	11. Направленість	11.1. Лівнонаправлена; 11.2. Правоноправлена.
	12. Кількість	12.1. Одна; 12.2. Дві; 12.3. Більше двох; 12.4. Комплект.
	13. Розташування	13.1. По зовнішньому контуру амортизатора; 13.2. У внутрішній частині амортизатора; 13.3. Збоку амортизатора.
	14. Геометричні параметри	14.1. Циліндричні; 14.2. Конічні; 14.3. Еліпсні; 14.4. Гофровані. 14.5. Фасонні.
	15. Керованість (адаптивність)	15.1. Не регульовані; 15.2. Регульовані; 15.3. Активні.
	16. Конструкція	16.1. Однокамерні; 16.2. Двокамерні; 16.3. Багатокамерні.
	17. Наповнення	17.1. Одинарні; 17.2. Подвійні (один в одному); 17.3. З додатковим внутрішнім елементом.
	18. Жорсткість	18.1. Низька; 18.2. Середня. 18.3. Висока.
	Демпфуючий елемент	19. Розташування
20. Кількість		20.1. Один; 20.2. Два; 20.3. Три.
21. Матеріал		21.1. Гума високоеластична; 21.2. Гума низькоеластична; 21.3. Гума поліреутанова; 21.4. Гума армована; 21.5. Пневмоподушка; 21.6. Масляна подушка; 21.7. Пружина.
22. Поєднання		22.1. Однотипне; 22.2. Двотипне; 22.3. Багатотипне.

	23. Конструктивні параметри	23.1. Круглий профіль; 23.2. Трикутний профіль; 23.3. Квадратний профіль; 23.4. Еліпсний профіль; 23.5. Прямокутний профіль; 23.6. Трапецеїдальний профіль; 23.7. Гофровані. 23.8. Фасонні.
--	-----------------------------	--

де z – ієрархічний рівень;
 l – кількість ієрархічних рівнів;
 x – певна підгрупа відповідного ієрархічного рівня;
 q – кількість підгруп відповідного ієрархічного рівня;
 K_i – альтернатива конструктивної ознаки чи елемента певної підгрупи відповідного ієрархічного рівня;
 m – кількість альтернатив конструктивної ознаки чи елемента певної підгрупи відповідного ієрархічного рівня.

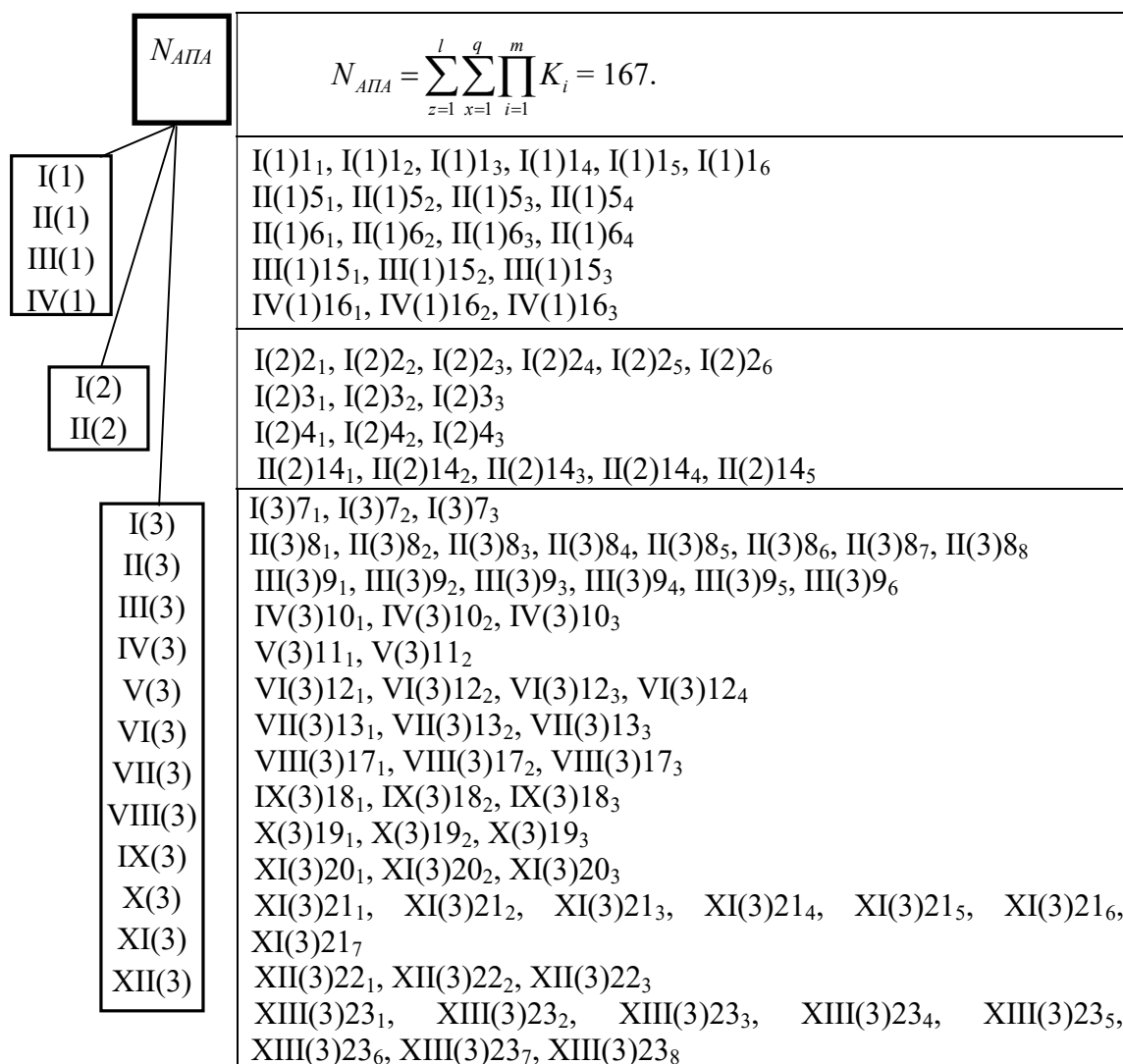


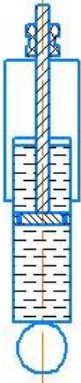
Рисунок 1 – Модель механічної системи «Підвіска автотранспортного засобу»:
 I - XIII – підгрупи ієрархічного рівня; (1) - (3) – відповідні ієрархічні рівні





Використавши дані моделі механічної системи «Підвіска автотранспортного засобу» (рис. 1) загальна кількість базових генерованих варіантів підвіски автотранспортного засобу становитиме:


$$\begin{aligned}
 N_{АПА} = & \begin{array}{|c|} \hline 1.1 \\ \hline 1.2 \\ \hline 1.3 \\ \hline 1.4 \\ \hline 1.5 \\ \hline 1.6 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline 5.1 \\ \hline 5.2 \\ \hline 5.3 \\ \hline 5.4 \\ \hline \end{array} \cap \begin{array}{|c|} \hline 6.1 \\ \hline 6.2 \\ \hline 6.3 \\ \hline 6.4 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline 15.1 \\ \hline 15.2 \\ \hline 15.3 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline 16.1 \\ \hline 16.2 \\ \hline 16.3 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline 2.1 \\ \hline 2.2 \\ \hline 2.3 \\ \hline 2.4 \\ \hline 2.5 \\ \hline 2.6 \\ \hline \end{array} \cap \begin{array}{|c|} \hline 3.1 \\ \hline 3.2 \\ \hline 3.3 \\ \hline \end{array} \cap \begin{array}{|c|} \hline 4.1 \\ \hline 4.2 \\ \hline 4.3 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline 14.5 \\ \hline 14.5 \\ \hline 14.5 \\ \hline 14.5 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline 7.1 \\ \hline 7.2 \\ \hline 7.3 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline 8.1 \\ \hline 8.2 \\ \hline 8.3 \\ \hline 8.4 \\ \hline 8.5 \\ \hline 8.6 \\ \hline 8.7 \\ \hline 8.8 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline 9.1 \\ \hline 9.2 \\ \hline 9.3 \\ \hline 9.4 \\ \hline 9.5 \\ \hline 9.6 \\ \hline \end{array} + \\
 & + \begin{array}{|c|} \hline 10.1 \\ \hline 10.2 \\ \hline 10.3 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline 11.1 \\ \hline 11.2 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline 12.1 \\ \hline 12.2 \\ \hline 12.3 \\ \hline 12.4 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline 13.1 \\ \hline 13.2 \\ \hline 13.3 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline 17.1 \\ \hline 17.2 \\ \hline 17.3 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline 18.1 \\ \hline 18.2 \\ \hline 18.3 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline 19.1 \\ \hline 19.2 \\ \hline 19.3 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline 20.1 \\ \hline 20.2 \\ \hline 20.3 \\ \hline \end{array} \cap \begin{array}{|c|} \hline 21.1 \\ \hline 21.2 \\ \hline 21.3 \\ \hline 21.4 \\ \hline 21.5 \\ \hline 21.6 \\ \hline 21.7 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline 22.1 \\ \hline 22.2 \\ \hline 22.3 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline 23.1 \\ \hline 23.2 \\ \hline 23.3 \\ \hline 23.4 \\ \hline 23.5 \\ \hline 23.6 \\ \hline 23.7 \\ \hline 23.8 \\ \hline \end{array} = 167.
 \end{aligned}$$

При генерування конструкцій окремих типів підвіски автотранспортного засобу з основним типам проєктованих амортизаторів ми розділили конструктивні ознаки та елементи з морфологічної таблиці 1 у відповідності до кожного типу (табл. 2).

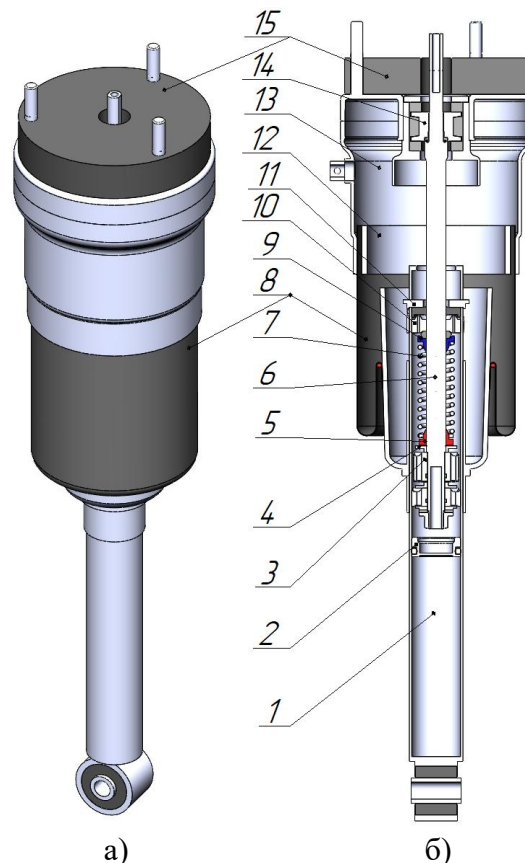
Таблиця 2 – Відповідність конструктивних ознак та елементів підвіски автотранспортного засобу з основним типам проєктованих амортизаторів

№	Тип	Приклади схем з конструктивними елементами	Кодовані конструктивні ознаки та елементи з табл. 1	Загальна кількість базових генерованих варіантів
1	2	3	4	5
1	Гідравлічний		2.1-2.4; 3.1-3.3; 4.1-4.3; 5.1-5.4; 6.1-6.4; 8.1-8.8; 9.1-9.6; 10.1-10.3; 11.1; 11.2; 12.1-12.4; 13.1-13.3; 14.1-14.5; 15.1-15.3; 16.1-16.3; 17.1-17.3; 18.1-18.3; 19.1-19.3; 20.1-20.3; 21.1-21.7; 22.1-22.3; 23.1-23.8.	$N_{ГПА} = 130.$

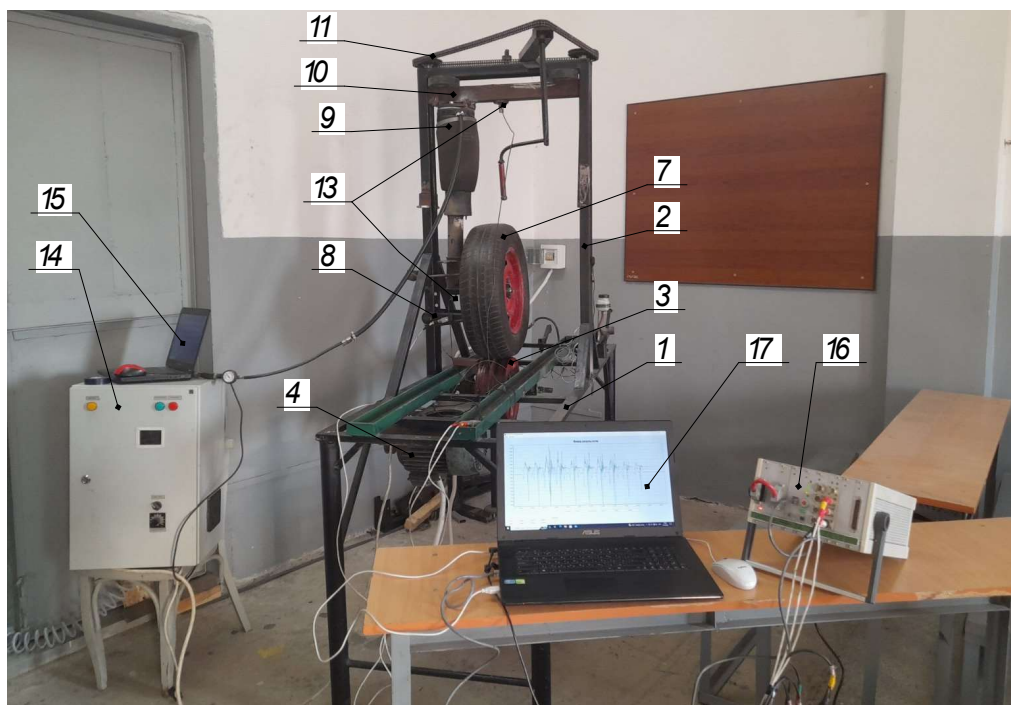
2	Гідро- пневматичний		<p>2.1-2.6; 3.1-3.3; 4.1-4.3; 5.1-5.4;6.1-6.4; 8.1-8.8; 9.1-9.6; 10.1-10.3; 11.1; 11.2; 12.1-12.4;13.1-13.3; 14.1-14.5; 15.1-15.3; 16.1- 16.3; 17.1-17.3; 18.1-18.3; 19.1-19.3; 20.1-20.3; 21.1- 21.7; 22.1-22.3; 23.1-23.8.</p>	$N_{ГПАПА} = 148.$
3	Пневматичний		<p>2.5; 2.6; 5.1-5.4;6.1-6.4; 8.1-8.8; 9.1-9.6; 10.1-10.3; 11.1; 11.2; 12.1-12.4;13.1- 13.3; 14.1-14.5; 15.1-15.3; 16.1-16.3; 17.1-17.3; 18.1- 18.3; 19.1-19.3; 20.1-20.3; 21.1-21.7; 22.1-22.3; 23.1- 23.8.</p>	$N_{ПАПА} = 96.$
4	Магніто- рідинний		<p>2.1-2.4; 3.1-3.3; 4.1-4.3; 5.1-5.4;6.1-6.4; 7.1-7.3; 8.1-8.8; 9.1-9.6; 10.1-10.3; 11.1;11.2; 12.1-12.4;13.1- 13.3; 14.1-14.5; 15.1-15.3; 16.1-16.3; 17.1-17.3; 18.1- 18.3; 19.1-19.3; 20.1-20.3; 21.1-21.7; 22.1-22.3; 23.1- 23.8.</p>	$N_{МРАПА} = 133.$
5	Гідровакуумний		<p>2.1-2.4; 3.1-3.3; 4.1-4.3; 5.1-5.4;6.1-6.4; 8.1-8.8; 9.1-9.6; 10.1-10.3; 11.1;11.2; 12.1-12.4;13.1- 13.3; 14.1-14.5; 15.1-15.3; 16.1-16.3; 17.1-17.3; 18.1- 18.3; 19.1-19.3; 20.1-20.3; 21.1-21.7; 22.1-22.3; 23.1- 23.8.</p>	$N_{ГВАПА} = 130.$

6	Пневмо-вакуумний		2.5; 2.6; 5.1-5.4; 6.1-6.4; 8.1-8.8; 9.1-9.6; 10.1-10.3; 11.1; 11.2; 12.1-12.4; 13.1- 13.3; 14.1-14.5; 15.1-15.3; 16.1-16.3; 17.1-17.3; 18.1- 18.3; 19.1-19.3; 20.1-20.3; 21.1-21.7; 22.1-22.3; 23.1- 23.8.	$N_{ПВАПА} = 96.$
---	------------------	---	--	-------------------

Використовуючи даний метод синтезу нами було розроблено і досліджено конструкції гідропневматичних амортизаторів з активним пневмобалоном та демпфуючими елементами (рис. 2), які у порівнянні з традиційними стійками володіли високою адаптивністю та вібраційною стійкістю [11]. Було експериментально доведено, що розроблені амортизатори з активним пневмобалоном та демпфуючими елементами в значній мірі виступають гасниками коливань.



а) б)
 1 – корпус; 2 – плаваючий поршень; 3 – поршень; 4 – шайба; 5 – упор пружини нижній; 6 – шток поршня; 7 – пружина; 8 – гумовий балон; 9 – упор пружини верхній; 10 – направляюча штока; 11 – кришка; 12 – фіксуюче кільце; 13 – верхня частина амортизатора; 14 – втулка; 15 – демпфуючий елемент



в)

а) загальний вигляд демпфуючих елементів; б) конструктивна схема; в) загальний вигляд експериментального обладнання із синтезованою адаптивною підвіскою

Рисунок 2 – Синтезована підвіска автомобіля: автомобіля

Джерело: розробка авторів

Висновок. Проведено структурно-схемний синтез підвіски автотранспортних засобів методом ієрархічного групування за допомогою морфологічного аналізу й отримано шість базових видів підвіски з оригінальними типами амортизаторів (гідрравлічного, гідропневматичного, пневматичного, магніторідинного, гідровакуумного та пневмовакуумного типу). При цьому було виділено такі базові морфологічні конструктивні ознаки та елементи:

- амортизаційний принцип, який включає такі ознаки: тип амортизаційного принципу; тип амортизаційної речовини; отвори протікання гідравлічної речовини в поршні (їх площу і кількість); кількість камер; розташування камер; кількість електромагнітних котушок;

- тип пружного елемента, що складається з двох основних ознак, а саме пружина, до конструктивних ознак якої віднесено наступні ознаки: конструкція; геометричний переріз; жорсткість; направленість; кількість; розташування; та пневмобалон, до конструктивних ознак якого віднесено наступне: геометричні параметри; керованість (адаптивність); конструкція; наповнення; жорсткість;

- демпфуючий елемент, який включає такі ознаки: розташування; кількість; матеріал; поєднання; конструктивні параметри.

Загальна кількість базових генерованих варіантів підвіски автотранспортного засобу становитиме 167 варіантів, а кількість базових варіантів в залежності від типу амортизаційного принципу коливатиметься у межах від 96 до 148 варіантів.

Список літератури

1. Структурний синтез гальмівних систем з техніко-економічним обґрунтуванням / І.Б. Гевко та ін. *Наукові нотатки: міжвуз. зб.* 2021. Вип. 71. С. 228-233.

2. Кузнецов Ю.М., Скляр Р.А. Прогнозування розвитку технічних систем ; під заг. ред. Ю. М. Кузнецова. К. : ТОВ «ЗМОК». ПП «ГНОЗІС», 2004. 323 с.
3. Мандрика В.Р., Шликова В.Г. Керованість і стійкість руху автомобіля В класу з системою. *Вісник НТУ "ХПИ"*. 2013. № 31 (1004). С. 60-65.
4. Одрин В.М., Картавов С.С. Морфологический анализ систем: Построение морфологических матриц . К. : Наукова думка, 1977. 183 с.
5. Павленко В.М., Криворучко О.О. Сучасний стан розвитку активних підвісок легкових автомобілів. *Вісник НТУ "ХПИ"*. 2014. № 9 (1052). С. 54-60.
6. Пружно-запобіжні муфти: конструкції, розрахунок, дослідження / Б.М. Гевко та ін. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 200 с.
7. Рогатинський Р.М. та ін. Модель обгону автомобілем на прямій трасі . *Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем* : матеріали V Міжнародної наук.-практ. конф., 2023. (19 - 21 квітня 2023 р.) . С. 17-20.
8. Стенд для дослідження характеристик підвіски автомобіля: пат. 148601 Україна: МПК G01N 17/00 (2021.01). № u202101835; заявл. 07.04.21; опубл. 26.08.21, Бюл. № 34.
9. Стенд для дослідження характеристик підвіски автомобіля: пат. 150771 Україна: МПК G01N 3/00, F16D 65/00. № u202106434; заявл. 15.11.21; опубл. 13.04. 22, Бюл. № 15.
10. Gysen B. L. J., Janssen J. L. G. Active Electromagnetic Suspension System for Improved Vehicle Dynamics. *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, 59, 3, pp.1156 – 1163 (2016)
11. Liashuk O., Hevko I., Hud V., Khoroshun R., Hevko B., Matviishyn A., Sipravska M. Stands for car suspension research. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Agroengineering Research*, No. 26 (2022). С 93-103.
12. I. Martins, J. Esteves, F. P. da Silva, P. Verdelho, Electromagnetics hybrid activepassive vehicle suspension system. Technical University of Lisbon. Lisbon, Portugal . 2015.
13. Methodology of Force Parameters Justification of the Controlled Steering Wheel Suspension. B. Sokil, O. Lyashuk, M. Sokil, Y. Vovk, I. Lebid, I. Hevko, M. Levkovich, R. Khoroshun, A. Matviyishyn. *COMMUNICATIONS*, 2022. Vol. 24, № 3, P. 247-258.
14. Mohammed Bello M., Babawuro A. Y., Fatai S., Active suspension force control with electro-hydraulic actuator dynamics. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 10, 23, pp.17327 – 17331 (2015)
15. Popp K., Schiehlen W. *Ground vehicle dynamics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. 396 pp.
16. Rosli R., Mailah M., Priyandoko G. Active Suspension System for Passenger Vehicle using Active Force Control with Iterative Learning Algorithm. *WSEAS Transactions on Systems and Control*. 9, 2, pp.120 – 127 (2014)
17. Schramm D., Hiller M., Bardini R. *Vehicle dynamics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. 396 pp.
18. Taghavifar H., Mardani A. *Off-road vehicle dynamics*. Cham: Springer International Publishing, 2016. 396 pp.

References

1. Hevko, I.B., Rohatyn'skyj, R.M., Levkovich, M.H., Klendij, V.M. & Hupka, V.V. (2021). Strukturnyj syntez hal'mivnykh system z tekhniko-ekonomichnym obgruntuvanniam [Structural synthesis of braking systems with technical and economic justification]. *Naukovi notatky : Mizhvuziv's'kyj zbirnyk – Scientific notes: interuniversity collection, Issue 71*, 228-233 [in Ukrainian].
2. Kuznetsov Yu.M. & Skliarov R.A. (2004). *Prohnozuvannia rozvytku tekhnichnykh system [Forecasting the development of technical systems]*. Yu. M. Kuznetsova (Eds.). Kyiv : TOV «ZMOK». PP «HNOZIS» [in Ukrainian].
3. Mandryka, V. R. & Shlykova, V.H. (2013). Kerovanist' i stijkist' rukhu avtomobilia V klasu z systemoiu [Controllability and stability of the car in class B with the system]. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "Khpi"*, № 31 (1004), 60-65 [in Ukrainian].
4. Odrin V.M. & Kartavov S.S. (1977). *Morfolohycheskyj analiz system: Postroenyje morfolohycheskykh matryts [Morphological analysis of systems: Construction of morphological matrices]* . Kyiv : Naukova dumka [in Ukrainian].
5. Pavlenko, V.M. & Kryvoruchko, O.O. (2014). Suchasnyj stan rozvytku aktyvnykh pidvisok lehkovykh avtomobiliv [The current state of development of active suspensions of passenger cars]. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "Khpi"*, № 9 (1052, 54-60 [in Ukrainian].

6. Hevko, B.M., Lutsiv, I.V., Hevko, I.B., Komar, R.V. & Dubyniak, T.S. (2019). *Pruzhno-zapobizhni mufty: konstruktzii, rozrakhunok, doslidzhennia* [Spring-safety couplings: designs, calculation, research]. Ternopil': FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
7. Rohatyns'kyj, R.M., Liashuk, O.L., Hevko, I.B., Khoroshun, R.V. & Bryksa, A.O. (2023). Model' obhonu avtomobilem na priamij trasi [A model of overtaking by a car on a straight track]. Increasing the reliability and efficiency of machines, processes and systems: *V Mizhnarodnoi nauk.-prakt. konf. (19 -21 kvitnia 2023 r., Kropyvnyts'kyj) – (Pp. 17-20)*, Kropyvnyts'kyj [in Ukrainian].
8. Stend dlia doslidzhennia kharakterystyk pidvisky avtomobilia [A stand for researching the characteristics of a car's suspension]: pat. 148601 Ukraina: MPK G01N 17/00 (2021.01). № u202101835; zaiavl. 07.04.21; opubl. 26.08.21, Biul. № 34 [in Ukrainian].
9. Stend dlia doslidzhennia kharakterystyk pidvisky avtomobilia [Stand for researching the characteristics of the car suspension]: pat. 150771 Ukraina: MPK G01N 3/00, F16D 65/00. № u202106434; zaiavl. 15.11.21; opubl. 13.04. 22, Biul. № 15 [in Ukrainian].
10. Gysen B. L. J. & Janssen J. L. G. (2016). Active Electromagnetic Suspension System for Improved Vehicle Dynamics. *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, 59, 3. Pp.1156 – 1163 [in English].
11. Liashuk, O., Hevko, I., Hud, V., Khoroshun, R., Hevko, B., Matviishyn, A. & Sipravska, M. (2022). Stands for car suspension research. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Agroengineering Research*, No. 26, 93-103 [in English].
12. Martins, J. Esteves, F. P. da Silva, &Verdelho, P. (2015). *Electromagnetics hybrid activepassive vehicle suspension system*. Technical University of Lisbon. Lisbon, Portugal [in English].
13. Sokil, B., Lyashuk, O., Sokil, M., Vovk, Y., Lebid, I., Hevko, I., Levkovych, M., Khoroshun, R. & Matviyishyn, A. (2022). Methodology of Force Parameters Justification of the Controlled Steering Wheel Suspension. *COMMUNICATIONS*, Vol. 24, № 3, P. 247-258 [in English].
14. Mohammed Bello M., Babawuro A. Y. & Fatai S., (2015). Active suspension force control with electro-hydraulic actuator dynamics. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10, 23, pp.17327 – 17331 [in English].
15. Popp, K. & Schiehlen, W. (2010). *Ground vehicle dynamics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 396 pp. [in English].
16. Rosli, R., Mailah, M. & Priyandoko, G. (2014). Active Suspension System for Passenger Vehicle using Active Force Control with Iterative Learning Algorithm. *WSEAS Transactions on Systems and Control*, 9, 2, pp.120 – 127 [in English].
17. Schramm, D., Hiller, M. & Bardini, R. (2014). *Vehicle dynamics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 396 pp. [in English].
18. Taghavifar, H. & Mardani, A. (2016). *Off-road vehicle dynamics*. Cham: Springer International Publishing [in English].

Ivan Hevko, Prof., DSc., **Oleg Lyashuk**, Prof., DSc., **Roman Rohatynskyi**, Prof., DSc., **Anatolii Matviishyn**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Roman Khoroshun**, assistant
Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu, Ternopil, Ukraine

Synthesis of Suspension of Motor Vehicles

In order to create progressive structures of car shock absorbers that would provide increased driving comfort and safety due to the absorption of shocks and vibrations that occur while driving on the road, we carried out their structural-schematic synthesis by the method of hierarchical groups with the help of morphological analysis. For this, the method of hierarchical grouping using morphological analysis was used and six basic types of suspension with original types of shock absorbers (hydraulic, hydropneumatic, pneumatic, magnetofluid, hydrovacuum and pneumovacuum type) were obtained. At the same time, the following basic morphological design features and elements were highlighted: a) depreciation principle, which includes the following features: type of depreciation principle; type of cushioning substance; hydraulic fluid flow holes in the piston (their area and number); number of cameras; location of cameras; the number of electromagnetic coils; b) a type of elastic element consisting of two main features, namely a spring, the structural features of which include the following features: construction; geometric section; rigidity; directionality; number; Location; and a pneumatic cylinder, the structural features of which include the following: geometric parameters; manageability (adaptability); construction; filling; rigidity; c) damping element, which includes the following features: location; number; material; combination; structural parameters.

The total number of basic generated vehicle suspension options will be 167 options, and the number of base options depending on the type of damping principle will range from 96 to 148 options. Thus, when generating the constructions of individual types of suspension of a motor vehicle with the main types of designed shock absorbers, the design features and elements from the morphological table were divided according to each type of shock absorbers, which made it possible to generate the corresponding number of their basic variants. In

particular, the number of basic variants of the hydraulic type car suspension is 130 units, hydropneumatic type - 148 units, pneumatic type - 96 units, magnetofluid type - 133 units, hydrovacuum type - 130 units and pneumovacuum type - 96 units.

USING this synthesis method, we developed and researched structures of hydropneumatic shock absorbers with an active pneumatic cylinder and damping elements, which, compared to traditional racks, had high adaptability and vibration resistance. It was experimentally proven that the developed shock absorbers with an active pneumatic cylinder and damping elements act as vibration dampers to a large extent.

structural and schematic synthesis, adaptive suspension, motor vehicle, structural features of elements, morphological analysis

Одержано (Received) 10.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 26.10.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

УДК 621.434.432

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.164-169](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.164-169)

Л.А. Тарандушка, проф., д-р техн. наук, **Д.О. Шалапко**, доц., канд. техн. наук
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна
e-mail: tarandushkal@ukr.net, shalapko.denys@gmail.com

Покращення показників автомобільних дизельних двигунів при додаванні водневої каталітичної добавки

У статті розглядається один із методів підвищення продуктивності автомобільних дизельних двигунів, а саме введення водню (від 0,2% до 2,0% за масою) у склад основного дизельного палива. Пропонується інтегрувати водень у паливопровід високого тиску між паливним насосом високого тиску (ПНВТ) та форсуною. Цей підхід дозволяє досягти зменшення споживання палива на рівні від 0,4...2,8% без суттєвого переобладнання конструкції двигуна.
дизельний двигун, водень, водневі добавки, спосіб подачі водню, каталізатор

Постановка проблеми. Навіть з урахуванням досягнень у розробці ефективних дизельних двигунів внутрішнього згоряння для транспортних та стаціонарних енергетичних систем, зниження споживання пального та обмеження викидів шкідливих речовин у вихлопних газах цих двигунів залишається важливою та актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним з можливих рішень вказаної проблеми є введення водню безпосередньо в робочий циліндр двигуна та його спалювання під час робочого ходу. У багатьох вітчизняних та закордонних наукових розробках цей підхід базується на подачі газоподібного водню безпосередньо до камери згоряння під час наповнення циліндра. Процес включає постачання водню до повітряного ресивера дизеля, а звідти разом з повітрям він потрапляє в циліндри [1].

Далі цей процес ґрунтується на принципі роботи газодизеля, де запалення водню в камері згоряння відбувається через запалення дизельного палива. Важливо відзначити, що водень може використовуватися як основне паливо, так і як додаткове, залежно від пропорцій (відношення за масою) між воднем та дизельним паливом.

Одним із основних недоліків даного процесу є зниження коефіцієнта надлишку повітря, що призводить до втрат потужності двигуна, значного підвищення

максимальної температури згоряння палива та збільшення концентрації оксидів азоту (NO_x) у вихлопних газах. Використання водню як основного палива для ДВЗ на даний момент не є практично доцільним через його високу вартість та труднощі зберігання великих обсягів.

Очевидно, що прийнятним варіантом для ДВЗ є часткова заміна вуглеводневого палива воднем, тобто введення в циліндри двигуна невеликих домішок водню поруч із основним паливом. Це може підвищити експлуатаційну ефективність ДВЗ та зменшити його вплив на навколишнє середовище. Використання водню у вигляді невеликих домішок до органічного палива ДВЗ не породжує проблем із виробництвом та зберіганням, що робить його варіантом, що логічно враховується.

Це особливо актуально при роботі дизельних двигунів в містах та рекреаційних зонах. Саме на ці райони припадають важливість запобігання викидам з відпрацьованими газами, або часткові та динамічні режими роботи двигуна. Такий підхід дозволяє покращити якість сумішоутворення та горіння палива в циліндрах двигуна, сповільнює швидкість процесів спалаху та скорочує період затримки запалення.

Виклад основного матеріалу. Іншим підходом до вирішення даної проблеми є використання невеликих домішок водню (від 0,2% до 1,0% за масою) до основного рідкого палива ДВЗ. Важливо відзначити, що в цьому випадку водень використовується не як основне паливо, що замінює вуглеводневе паливо, але як каталізатор процесу згоряння вказаного палива у циліндрах ДВЗ.

Твердження, що водень виступає саме в якості каталізатора процесу горіння, ґрунтується на тому, що при невеликій його концентрації, навіть при високій теплотворній здатності ($Q_H=120$ МДж/(кгК)), його кількість (до 1,0% за масою) не впливатиме на горіння як додаткове паливо. Однак наявність водню в циліндрі буде сприяти стимулюванню самого процесу горіння та функціонуватиме в якості каталізатора.

Дослідження, проведені в лабораторії перспективних енергетичних технологій НУК, щодо введення малих домішок водню до основного рідкого дизельного палива ДВЗ, свідчать про те, що ці домішки призводять до інтенсифікації процесу згоряння дизельного палива, особливо важких сортів. Це призводить до зсуву робочого процесу ДВЗ вліво, що наближає його до процесу при постійному об'ємі. Зауважено, що при цьому відбувається перерозподіл теплового балансу ДВЗ: зменшується кількість тепла, викиданого в навколишнє середовище через систему охолодження та випускні гази. Це сприяє підвищенню коефіцієнта корисної дії (ККД) двигуна на 0,5% до 5,0%, залежно від кількості домішок водню та режиму навантаження. Отримані результати також підтверджуються попередніми дослідженнями інших науковців [1-3].

Аналіз попередніх досліджень вказує на те, що малі домішки водню позитивно впливають на роботу ДВЗ в часткових та перехідних режимах, особливо при використанні стандартного дизельного палива (проводились експерименти з використанням альтернативних палив). В цих випадках спостерігається найбільший позитивний ефект.

Отримані результати досліджень мають якісний характер і наразі не дозволяють розробити методику розрахунку робочих процесів з використанням домішок водню, окреслити оптимальну кількість водню для введення у циліндри дизельного ДВЗ та надати конкретні практичні рекомендації щодо модернізації ДВЗ при використанні таких домішок.

Серед важливих факторів, що значно впливає на ефективність застосування домішок водню, є спосіб їх подачі у ДВЗ. Додавання водню під час всмоктування двигуна, хоча й є простим методом, зустрічає труднощі у якісному регулюванні ДВЗ та може становити певний ризик через можливість утворення вибухонебезпечної суміші у впускному тракті та її запалення.

Одним із можливих варіантів є подача невеликих домішок водню з використанням рішення, яке було запропоноване науковим колективом під керівництвом професора Тимошевського Б.Г. [5]. Згідно з цією концепцією, водень додається у дизельне паливо під високим тиском на етапі низького тиску за допомогою спеціального пристрою. Під час хвилі тиску дизельне паливо насичується воднем і подається у форсунку, а звідти в циліндр двигуна. Після впорскування та зниження тиску у циліндрі, водень вивільняється з дизельного палива, сприяє подальшому подрібненню крапель та швидко дифундує у об'єм надпоршневого простору. Кількість водню, яка додається до циклової подачі дизельного палива, регулюється тиском водню на вході у пристрій.

Однак наукова література не надає достатньої інформації щодо результатів експериментального дослідження впливу додавання водню до основного рідкого палива дизельного двигуна. Таким чином, головною метою нашого дослідження стало експериментальне підтвердження даної теорії та отримання якісних результатів.

Принципова схема цього рішення представлена на рис. 1, а на рис. 2 наведені осцилограми параметрів у вказаних елементах паливної системи [3].

Використання такого підходу дозволяє уникнути значних модифікацій в конструкції двигуна та паливної системи, забезпечуючи при цьому високий рівень якості регулювання та безпеки при використанні водню як домішки. Розглянута схема дозволяє ефективно впроваджувати водень у процес згорання, при цьому забезпечуючи необхідний рівень безпеки та функціональності двигуна.

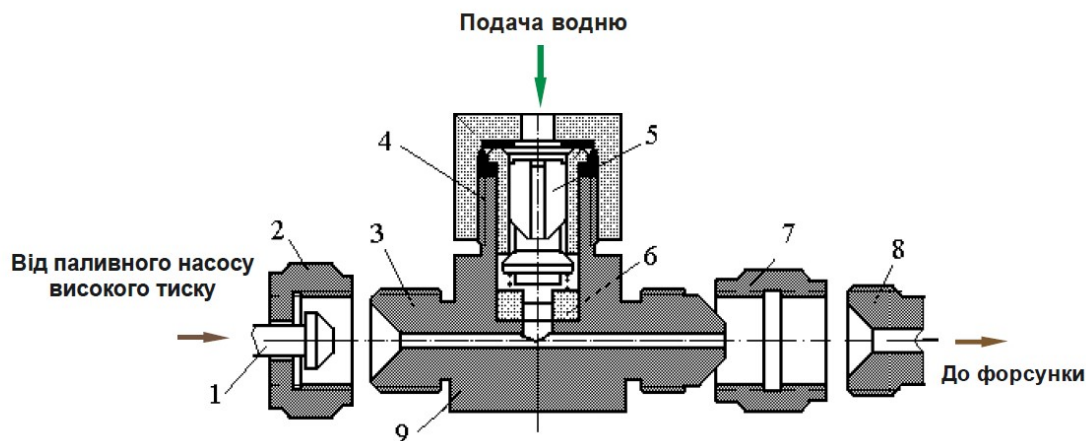


Рисунок 1 – Принципова схема пристрою для подачі каталітичних водневих домішок

Джерело: [3]

Раніше проведені дослідження в лабораторії перспективних енергетичних технологій НУК, використовуючи вдосконалений пристрій подачі водню, підтвердили ефективність цього методу в контексті раціонального введення водню до дизельного палива. Зазначений пристрій дозволяє підвищити ККД двигуна та зменшити споживання нафтового палива шляхом оптимізації передачі тепла у дизельному двигуні. Крім того, цей метод сприяє перерозподілу теплового балансу, зменшуючи втрати тепла через систему охолодження та викидами газів.

В результаті попередніх експериментів встановлено, що зменшення витрат дизельного палива для двигуна 8V12/12 (КАМАЗ 740.11-240) дорівнює 0,4–2,8%, в залежності від кількості водню (0,1–0,6% по масі) та навантаження на двигун (0,25–0,75 N_e). Додатково, отримані дані свідчать про поліпшення екологічних показників двигуна: викиди вуглеводнів (C_mH_n) зменшилися на 40–50%, монооксиду вуглецю (CO_2) – на 15–25%. Однак виявлено, що викиди оксидів азоту (N_xO_y) зросли на 3–7%, що пов'язано з певним підвищенням максимальної температури циклу.

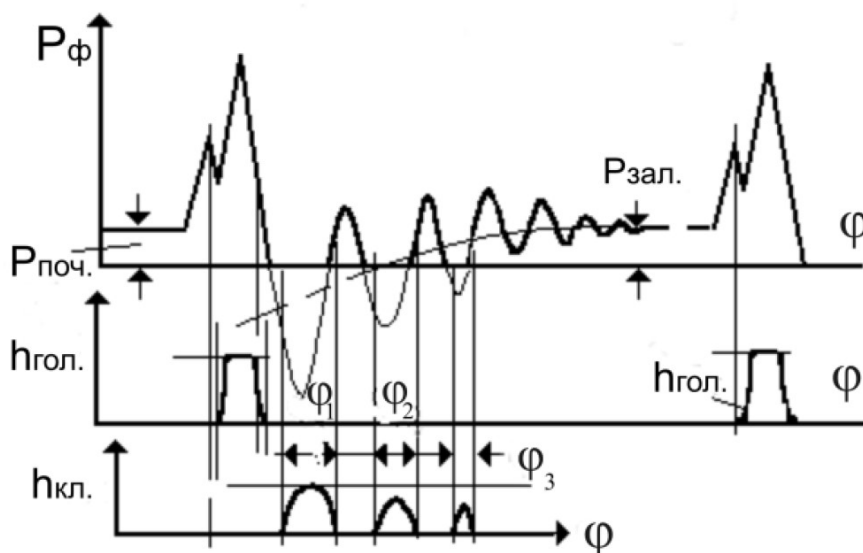


Рисунок 2 – Осцилограми хвильових коливань в паливній апаратурі дизеля та відносно переміщення голки форсунки

Джерело: розроблено авторами

Для визначення кількості водню на борту транспортного засобу, такого як автомобіль КАМАЗ 4308, при додаванні 0,5% водню до дизельного палива (що становить 2,1 кг), розглядайте різні варіанти для зберігання водню. Наприклад, якщо використовуєте металогідридний акумулятор із інтерметалідом $TiFe$, його маса може бути від 130 до 140 кг при об'ємі 20–22 л. Якщо обираєте композитні балони на основі полімерних матеріалів, їх маса може коливатися від 13 до 17 кг при об'ємі 28–30 л. Отже, важливо вибрати оптимальний варіант враховуючи конкретні потреби автомобіля КАМАЗ 4308.

Проте, ці дані переважно є описового характеру та не можуть служити основою для остаточних висновків і рекомендацій щодо впровадження зазначених заходів. Попередній економічний аналіз ефективності використання малих домішок водню у дизельному паливі дозволяє стверджувати, що витрати на додаткове обладнання та водень є невеликими у порівнянні з вартістю самого двигуна і становлять 0,09–1,14%. Додаткові витрати на водень складають приблизно 0,11–0,53% від вартості використаного дизельного палива (за умови використання технічного водню марки Б або нижчого гатунку). Зменшення витрат на дизельне паливо становить приблизно 4–9%, що призводить до загального позитивного економічного та екологічного впливу. На шляху впровадження цих заходів необхідно вирішувати комплекс завдань, перш за все, пов'язаних з експериментальним вивченням робочого процесу дизельного двигуна при використанні малих домішок водню, визначенням оптимальних параметрів цього

процесу та раціонального обсягу водню, що додається до дизельного палива для досягнення максимального ефекту.

Висновки:

1. Застосування невеликих кількостей водню як каталізатора для згоряння дизельного палива, включаючи важкі сорти, сприяє зменшенню витрат палива та навантаження на навколишнє середовище через зменшення викидів шкідливих речовин.

2. Необхідно розробити адекватні математичні моделі для опису робочого процесу у дизельних двигунах при використанні малих домішок водню. Також потрібні математичні моделі для процесів, які відбуваються в пристроях для подачі водню в паливній магістраль високого тиску.

3. Впровадження цього заходу має економічний сенс і може бути реалізоване на сучасному технічному рівні.

Список літератури

1. Gomes Antunes J.M, Mikalsen R., Roskilly A.P. An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine . *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, Issue 15, August 2009, P. 6516-6522.
2. Szwaja S, Grab-Rogalinski K. Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine. *Int. J. Hydrogen Energy* (2009), doi: 10.1016/2009.03.020.
3. Shalapko D. An experimental study of the wave effect in fuel equipment using hydrogen additives to diesel fuel . *Technology audit and production reserves*. 2018. № 6/1 (44). С. 36–40.
4. Шалапко, Д.О. Дослідження ефектів хвильових коливань в паливній апаратурі дизельного двигуна із застосуванням водневих добавок . *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2021. № 3 (486). С. 40-47.
5. Керимов З.Х. Математическое моделирование неустойчившихся процессов в двухфазном потоке в системе впрыска топлива дизельного двигателя . *Азербайджанское нефтяное хозяйство*. Баку. 2003. № 7. С. 42 – 47.
6. Керимов З.Х. Математическое моделирование гидродинамических процессов с учетом двухфазной среды в граничных полостях дизельной системы впрыска топлива . *Авиационно-космическая техника и технология*. 2004. № 8(16). 63-69 с.
7. Шалапко Д.О. Непрямі методи дослідження ефекту використання малих домішок водню до основного палива . *Авиационно-космическая техника и технология*. 2018. № 6 (150). С. 44–51.

References

1. Gomes Antunes, J. M., Mikalsen, R., & Roskilly, A. P. (2009). An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(15), 6516-6522 [in English].
2. Szwaja, S., & Grab-Rogalinski, K. (2009). Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*. doi: 10.1016/2009.03.020 [in English].
3. Shalapko, D. (2018). An experimental study of the wave effect in fuel equipment using hydrogen additives to diesel fuel. *Technology audit and production reserves*, 6(1), 36–40 [in English].
4. Shalapko, D. O. (2021). Doslidzhennia effektiv khvyl'ovykh kolyvan' v palyvnyj aparaturi dyzel'noho dyvhuna iz zastosuvanniam vodnevyykh dobavok . [Investigation of wave oscillation effects in the fuel equipment of a diesel engine using hydrogen additives]. *Zbirnyk naukovykh prats' Natsional'noho universytetu korablebuduvannia imeni admirala Makarova – Collection of Scientific Works of the National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov*, 3(486), 40-47 [in Ukrainian].
5. Kerimov, Z. K. (2003). Matematycheskoe modelyrovanye neustanovyvshykhsia protsessov v dvukhfaznom potoke v systeme vpryska toplyva dyzel'noho dyvhatelia [Mathematical modeling of unsteady processes in a two-phase flow in the fuel injection system of a diesel engine]. *Azerbajdzhanskoe nefyanoie khozjaystvo – Azerbaijan Oil Economy*, 7, 42–47 [in Ukrainian].
6. Kerimov, Z. K. (2004). Matematycheskoe modelyrovanye gidrodynamycheskykh protsessov s uchedom dvukhfaznoj sredy v hranychnykh polostiakh dyzel'noj systemy vpryska toplyva [Mathematical modeling

- of hydrodynamic processes considering a two-phase medium in the boundary chambers of the diesel fuel injection system]. *Avyatsyonno-kosmycheskaia tekhnika y tekhnolohiya – Aviation and Space Technology and Technology*, 8(16), 63-69 [in Ukrainian].
7. Shalapko, D. O. (2018). Nepriami metody doslidzhennia efektu vykorystannia malykh domishok vodniu do osnovnoho palyva [Indirect methods for investigating the effect of using small hydrogen admixtures to the base fuel]. *Avyatsyonno-kosmycheskaia tekhnika y tekhnolohiya – Aviation and Space Technology and Technology*, 6(150), 44–51 [in Ukrainian].

Ludmyla Tarandushka, Prof., DSc., **Denys Shalapko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

Enhancement of Automotive Diesel Engine Performance Through the Addition of Hydrogen Catalytic Additive

The aim of the study is to present a new proposed method for improving the efficiency of transportation diesel engines. Considering the rising cost of transportation, where 80% of the expenses are attributed to fuel costs, there is a necessity to develop methods for reducing fuel consumption. Among the main approaches are the use of alternative fuels or fuel additives. One of the most effective and promising options is the utilization of hydrogen, both as an alternative fuel and a fuel additive.

Among the crucial factors significantly influencing the efficiency of hydrogen additives is the method of their delivery to the internal combustion engine. Injecting hydrogen during the engine's intake stroke, although a simple method, faces challenges in achieving precise engine control and poses risks due to the potential formation of an explosive mixture in the intake tract and subsequent ignition.

A proposed solution involves introducing small hydrogen additives into the high-pressure fuel line, between the fuel pump and the injector. After the completion of the injection process in the high-pressure line, a "rarefaction wave" is generated. Utilizing this effect allows introducing a small amount of hydrogen into the diesel fuel. Hydrogen delivery is ensured by a special device equipped with a check valve that reacts to changes in pressure in the fuel line. Hydrogen, when introduced into the fuel, promotes improved combustion and increased engine efficiency. This results in a reduction in fuel consumption by 0.4 to 3.5% compared to nominal values, with particularly high fuel efficiency observed at partial load conditions, as well as during acceleration and maneuvers.

It is worth noting the positive environmental impact of this technology. When adding hydrogen in a proportion of 0.1% of the fuel mass, a decrease in hydrocarbon emissions by 40–50% and carbon monoxide by 15–25% is observed. However, an increase in nitrogen oxide emissions by 3–7% has been identified, which is associated with a certain elevation of the maximum cycle temperature. Nevertheless, NOx emissions increase can be mitigated by implementing appropriate adjustments to the engine's operating parameters.

diesel engine, hydrogen, hydrogen additives, hydrogen injection method, catalyst

Одержано (Received) 02.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 17.10.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 519.71: 338.27: 656.072DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.170-175](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.170-175)

В. Г. Загорянський, доц., д-р техн. наук

*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,
м. Кременчук, Україна*

e-mail: zagor_vlad@ukr.net

Розробка практичної методики застосування експертних методів теорії систем при дослідженнях транспортного процесу

В роботі розглянуті прикладні аспекти використання експертних процедур обґрунтування рішень, організація та проведення експертного аналізу керованої системи.

За допомогою методики математичної обробки результатів експертного аналізу за методом Дельфі в Microsoft Excel визначається, чи узгоджуються думки експертів та номери пріоритетних та несуттєвих напрямків (альтернатив). Якщо думки експертів виявляються неузгодженими, відкориговують значення їх оцінок, домагаючись узгодженості у поглядах.

Проведена комп'ютерна реалізація методів експертних оцінок під час створення інформаційного забезпечення завдань прийняття управлінських рішень.

теорія систем, дослідження, експерт, процедура, метод Дельфі, транспорт, процес

Постановка проблеми. Проблеми, які важко описати математично, часто виникають у процесі дослідження складних систем [1]. Зменшити складність проблеми може використання досвіду експертів – досвідчених спеціалістів у цій галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи експертних оцінок (назва походить від специфіки процедури отримання інформації від експертів – в анкетах експерти проставляють оцінки в балах чи рангах) утворюють особливий клас методів, що пов'язані безпосередньо з опитуванням експертів.

Методи експертних оцінок використовуються в тих випадках, коли фахівці не лише не можуть відразу описати проблему за допомогою кількісних аналітичних залежностей, але і не бачать, які з методів формалізованого представлення систем могли б допомогти одержати модель для ухвалення рішення.

В залежності від конкретної задачі використовуються різні форми експертного опитування (різні види анкетування), підходи до оцінювання (ранжування, нормування, різні види упорядкування тощо), методи опрацювання результатів, вимоги до експертів, оцінювання їхньої компетентності, методики організації експертних опитувань.

В процесі опитування експертам роздають анкети з проханням оцінити пропоновані альтернативи. Експерти можуть оцінювати альтернативи у числовій або порядковій шкалі.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка практичної методики використання методу Дельфі з використанням Microsoft Excel для організації та проведення експертного аналізу керованої системи.

Виклад основного матеріалу. Основними етапами методу Дельфі є [2]:

- 1) уточнення проблем чи об'єктів для експертизи;
- 2) формування групи експертів;
- 3) розробка анкети для опитування експерта;

- 4) індивідуальне анкетне опитування експертів;
- 5) математична обробка результатів опитування;
- 6) уточнення експертами своїх оцінок.

Для формування стійкої узагальнюючої оцінки етапи 4, 5, 6 можуть проводитись 3-4 рази.

Конкретний склад та чисельність групи експертів визначається характером аналізованих проблем, можливістю залучення до експертизи компетентних фахівців..

Розглянемо розв'язання задачі відповідно до виділених етапів проведення експертного аналізу.

1. Уточнення проблем чи об'єктів експертизи.

На цьому етапі доцільно запропонувати експертам можливі напрямки/альтернативи підвищення/покращення стану системи або якихось її параметрів, наприклад:

- 1) Напрямок (альтернатива) № 1.
- 2) Напрямок (альтернатива) № 2.

.....

8) Напрямок (альтернатива) № 8.

За експертами залишається право доповнити перелік можливих напрямків.

2. Формування групи експертів.

В умовах виконання даної практичної роботи в ролі експертів виступають студенти, які поєднуються по 4-5 осіб в одну групу. У такому вигляді подальше виконання роботи здійснюється окремо кожною групою студентів.

3. Розробка анкети для опитування експертів.

Можливий варіант анкети з цієї проблеми наведений в табл. 1.

В умовах виконання даної лабораторної роботи в ролі експертів виступають студенти, які поєднуються по 4-5 осіб в одну групу. У такому вигляді подальше виконання роботи здійснюється окремо кожною групою студентів.

3. Розробка анкети для опитування експертів.

Можливий варіант анкети з цієї проблеми наведений в таблиці.

№ пор.	Найменування напрямку (альтернативи) дослідження	Оцінка в балах
1	Напрямок (альтернатива) № 1	
2	Напрямок (альтернатива) № 2	
3	Напрямок (альтернатива) № 3	
4	Напрямок (альтернатива) № 4	
5	Напрямок (альтернатива) № 5	
6	Напрямок (альтернатива) № 6	
7	Напрямок (альтернатива) № 7	
8	Напрямок (альтернатива) № 8	

Оцінку за кожним із запропонованих напрямків просимо виставити за такою 10-бальною шкалою:

0	Напрямок не впливає на підвищення/покращення стану системи або якихось її параметрів
1-2	Напрямок має слабкий вплив, його варто враховувати у майбутньому
3-5	Напрямок впливає, але його важко реалізувати
6-7	Напрямок суттєво впливає на підвищення/покращення стану системи або якихось її параметрів
8-10	Напрямок важливий і актуальний, його слід реалізувати в першу чергу

4. Індивідуальне опитування експертів.

Результати експертного опитування кожному студенту необхідно оформити у вигляді таблиці, математичну обробку результатів опитування відповідно до наведеного нижче прикладу здійснює кожна група студентів-експертів.

Розглянемо наступний приклад. Чотирьом експертам було запропоновано проранжувати 8 напрямків/альтернатив. Експерти виставили такі оцінки:

№ експерта	Оцінки за напрямком/альтернативою							
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
1	8	6	9	4	9	6	4	8
2	7	4	9	4	4	9	7	7
3	9	8	8	8	5	7	5	10
4	7	7	10	4	4	4	4	10

Ранги визначаються таким чином:

- всі оцінки i -го експерта, виставлені за n напрямками, сортуються за зменшенням значення оцінки (рядок «Значення оцінки») і нумеруються від 1 до n (рядок «Номер оцінки»);

- Серед пронумерованих оцінок визначаються однакові оцінки, кожній з яких присвоюється однаковий ранг, рівний середньому арифметичному номерів оцінок (рядок «Ранги за напрямками»);

- ранги інших оцінок дорівнюють номерам оцінок (теж рядок).

Так, для одного експерта ранги за напрямками визначаються так:

1. сортуємо значення оцінок зі спадання і знизу записуємо номер відповідного напрямку;

2. нумеруємо оцінки від 1 до 8;

3. за номерами оцінок визначаємо значення рангів. Так, для напрямків 3 і 5 першим експертом виставлені однакові оцінки (9). Після сортування за спаданням ці оцінки отримали номери 1 і 2 відповідно. Складаємо номери оцінок та ділимо на 2. Отримуємо 1,5.

При рівних значеннях оцінок номери напрямків можна розставляти у будь-якому порядку, тобто можна цю частину таблиці записати і так:

Значення оцінки	9	9	...
Номер напрямку/альтернативи	5	3	...
Номер оцінки	1	2	...
Ранги за напрямками/альтернативами	1,5	1,5	...

Визначаємо ранги за іншими напрямками та заносимо до таблиці.

Значення оцінки	9	9	8	8	6	6	4	4
Номер напрямку/альтернативи	3	5	1	8	2	6	4	7
Номер оцінки	1	2	3	4	5	6	7	8
Ранги за напрямками/альтернативами	1,5	1,5	3,5	3,5	5,5	5,5	7,5	7,5

Аналогічно заповнюємо таблиці для математичної обробки думок інших трьох експертів.

На аркуші робочої книги Microsoft Excel створюємо наступну формулу для розрахунків, в яку заносимо обчислені ранги за напрямками:

№ експерта	Ранги для напрямку/альтернативи							
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
1	3,5	5,5	1,5	7,5	1,5	5,5	7,5	3,5
2	3,5	6,5	1,5	6,5	6,5	1,5	6,5	3,5
3	2	4	4	4	7,5	6	7,5	1
4	3,5	3,5	1,5	6,5	6,5	6,5	6,5	1,5
Сума рангів за напрямком								
Середня сума рангів								
Відхилення від середньої суми рангів								
Квадрат відхилення								
Коефіцієнт конкордації W								
Табличне значення критерію Пірсона								
Розрахункове значення критерію Пірсона								

У рядку «Сума рангів за напрямком» за допомогою кнопки «Автосума» обчислюємо для кожного напрямку суму рангів, виставлених чотирма експертами. Для першого напрямку вона дорівнюватиме 5,5. Використовуючи маркер заповнення, заповніть інші осередки рядка. Очевидно, що чим важливіший фактор, тим менша відповідна йому сума рангів.

У рядку «Середня сума рангів» заповнюємо один виділений осередок. Як аргументи функції СРЗНАЧ (категорія Статистичні) виступають значення рядка «Сума рангів за напрямком».

У рядку «Відхилення від середньої суми рангів» обчислюємо для кожного напрямку різницю між значенням у рядку «Сума рангів за напрямком» та середньою сумою рангів. Посилання на комірку зі значенням середньої суми рангів при копіюванні зробити абсолютним.

Значення у рядку «Квадрат відхилення» дорівнюють квадратам відповідних значень рядка «Відхилення від середньої суми рангів». В останній комірці рядка обчислюємо суму квадратів відхилень.

Коефіцієнт конкордації W оцінює ступінь узгодженості думок експертів:

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2 \cdot (k^3 - k)}, \quad (1)$$

де $S = \sum_{i=1}^k \Delta_i^2$ – сума квадратів відхилень;

m – кількість опитаних експертів;

k – кількість напрямків.

Думки експертів вважають узгодженими, якщо виконується нерівність

$$\chi_p^2 \geq \chi_T^2, \quad (2)$$

де χ_p^2 – розрахункове значення критерію Пірсона, що обчислюється за формулою

$$\chi_p^2 = m \cdot (k - 1) \cdot W, \quad (3)$$

χ_T^2 – табличне значення критерію Пірсона, вибирається за таблицею.

Таблиця – Значення χ^2 – розподілу при надійності 95 % ($\alpha = 0,05$) [3]

k-1	χ^2	k-1	χ^2
1	3,841	5	11,07
2	5,991	6	12,592
3	7,815	7	14,067
4	9,488	8	15,507

Остаточна таблиця з розрахунками має такий вигляд:

№ експерта	Ранги для напрямку								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	3,5	5,5	1,5	7,5	1,5	5,5	7,5	3,5	
2	3,5	6,5	1,5	6,5	6,5	1,5	6,5	3,5	
3	2	4	4	4	7,5	6	7,5	1	
4	3,5	3,5	1,5	6,5	6,5	6,5	6,5	1,5	
Сума рангів за напрямком	12,5	19,5	8,5	24,5	22	19,5	28	9,5	
Середня сума рангів	18								
Відхилення від середньої суми рангів	-5,5	1,5	-9,5	6,5	4	1,5	10	-8,5	
Квадрат відхилення	30,25	2,25	90,25	42,25	16	2,25	100	72,25	355,5
Коефіцієнт конкордації W	0,529								
Табличне значення критерію Пірсона	14,067								
Розрахункове значення критерію Пірсона	14,283								

Оскільки виконується нерівність $\chi_p^2 \geq \chi_T^2$, то думки експертів вважатимуться узгодженими. На думку цих експертів, найважливішим є 3-й напрямок, а найнесуттєвішим – 7-й.

Висновок. Одним із широко використовуваних методів групової оцінки прогнозного рішення є метод Дельфі, який є рядом послідовно здійснюваних процедур, спрямованих на підготовку та обґрунтування прогнозу. Ці процедури характеризуються анонімністю (незалежністю відповідей експертів) опитування, що регулюється зворотним зв'язком між результатами опитування попереднього етапу та підготовкою їх нового варіанту, а також груповим характером відповіді.

Список літератури

1. Грицюк П. М., Джоші О. І., Гладка О. М. Основи теорії систем і управління. Рівне: НУВГП, 2021. 272 с.
2. Баранкевич М. М. Експертні методи в ухваленні рішень. Львів: ВЦ Львівського національного університету ім. Івана Франка, 2008. 214 с.
3. Огірко О. І., Галайко Н. В. Теорія ймовірностей та математична статистика. Львів: ЛьвДУВС, 2017. 292 с.

References

1. Hrytsyuk, P.M., Dzhoshi, O.I. & Hladka, O.M. (2021). *Osnovy teoriiyi system i upravlinnyya* [Fundamentals of the theory of systems and management]. Rivne: NUVHP [in Ukrainian].
2. Barankevych, M.M. (2008). *Ekspertni metody v ukhvalenni rishen'* [Expert methods in decision-making]. L'viv: VTS L'vivs'koho natsional'noho un-tu im. Ivana Franka [in Ukrainian].
3. Ohirko, O.I. & Halayko, N.V. (2017). *Teoriya ymovirnostey ta matematychna statystyka* [Probability theory and mathematical statistics]. L'viv: L'vDUVS [in Ukrainian].

Volodymyr Zahorianskyi, Assoc. Prof., DSc.

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine

Development of Practical Methods of Application of Expert Methods of Systems Theory in Transport Process Research

The purpose of the paper is to develop a practical methodology for using the Delphi method using Microsoft Excel for organizing and conducting expert analysis of the managed system. In the paper are considered applied aspects of the use of expert decision-making procedures, organization and expert analysis of the managed system.

One of the widely used methods of group evaluation of a predictive decision is the Delphi method, which is a series of sequentially implemented procedures aimed at preparing and substantiating the forecast. These procedures are characterized by the anonymity (independence of experts' answers) of the survey, which is regulated by the feedback between the results of the survey of the previous stage and the preparation of their new version, as well as the group nature of the answer.

The group answer is formed by processing and analyzing the results of the experts' answers. As a rule, "closeness" to the opinion of experts serves as the criterion for the completion of ego development. Using the method of mathematical processing of the results of expert analysis using the Delphi method in Microsoft Excel, it is determined whether the opinions of experts and the numbers of priority and non-essential areas (alternatives) agree. If the experts' opinions turn out to be inconsistent, adjust the value of their assessments, achieving consistency in views.

The Delphi method has undoubted advantages compared to methods based on the usual statistical processing of the results of individual surveys. It allows you to reduce fluctuations in the entire set of individual responses, limits fluctuations within groups. At the same time, as the conducted experiments show, the presence of poorly qualified experts has a less strong influence on the group assessment than simple averaging of the results of the answers, since the situation helps them to correct the answers due to receiving new information from their group.

The computer implementation of methods of expert evaluations during the creation of information support for management decision-making tasks was carried out.

systems theory, research, expert, procedure, Delphi method, transport, process

Одержано (Received) 30.08.2023

Прорецензовано (Reviewed) 22.09.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

УДК 629.083:621.9

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.175-182](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.175-182)

В.В. Драгобецький, проф., д-р техн. наук, **Д.В. Молоштан**, канд. техн. наук,

А.А. Черниш, канд. техн. наук

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м.Кременчук, Україна

e-mail: vldrag@kdu.edu.ua, moloshtandima@gmail.com, chernyshkrnu@gmail.com

Відновлення листових деталей транспортних засобів після дорожньо-транспортних пригод

Ця стаття є продовженням досліджень щодо використання методів удосконалення ремонту кузовних деталей транспортних засобів після експертизи дорожньо-транспортних пригод. Корпусні елементи відносяться до основних та найбільш складних і ресурсомістких у виготовленні складових конструкції транспортного засобу (наземного, повітряного, морського). Крім того, корпусні деталі є основою конструкції транспортного засобу, яка об'єднує в силовому аспекті всі його частини в єдине ціле. Ресурс корпусу в цілому визначає експлуатаційну тривалість служби наземного транспорту загалом. На ресурс корпусних елементів, які зазвичай виготовляються з листа штампуванням, впливають корозія, експлуатаційні пошкодження та дорожньо-транспортні пригоди. Резервом підвищення довговічності корпусних, в тому числі листових деталей (ресори, ободи коліс тощо), є комплекс технологічних засобів і раціональний вибір технологічних параметрів процесу їх виготовлення листовим штампуванням.

ремонт, експлуатація, транспортні засоби, деформування, зношування, листові деталі

© В.В. Драгобецький, Д.В. Молоштан, А. Черниш, 2023

Постановка проблеми. Удосконалення технологічних процесів виробництва, відновлення та ремонту методами самостійного виготовлення та послідовного штампування дисків і вакуумного рихтування на основі комплексного моделювання життєвого циклу деталей та їх проектування.

Вибір параметрів виробу для технічного завдання на проектування і виробництво повинен бути строго обґрунтованим і враховувати найкращі параметри і характеристики виробів, наявних на ринку для даної мети.

Результати технічної підготовки виробництва, виконані відповідно до технічного завдання, повинні відповідати цілям виробництва. Цілі виробництва сучасної транспортної техніки можуть бути різноманітними:

- розроблення та проектування менш затратних методів відновлення та ремонту листових компонентів транспортних засобів;

- створення та експериментальна перевірка методу розрахунку деформаційного стану деталей під час їх штампування, з використанням припущень та отриманих аналітичних залежностей;

- розроблення експериментально-аналітичного методу розрахунку ресурсу листових елементів за умов експлуатаційних навантажень;

- випробування технічних рішень та практичних рекомендацій з метою підвищення експлуатаційної надійності листових деталей транспортних засобів та їх тривалості служби.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження існуючих та визначення ефективності традиційних методів відновлення, експлуатації та підвищення надійності листових деталей транспортних засобів вказують на необхідність розробки та впровадження конструктивно-технологічних рішень для збільшення ресурсу таких деталей автомобільного та залізничного транспорту на етапах їх проектування, виробництва та експлуатації. Відзначено, що сучасне виробництво деталей транспортних засобів вимагає розвитку технологій з великим спектром можливостей, зменшенням зусиль для деформації, розширенням та науковим обґрунтуванням методів визначення ресурсу деталей вакуумного рихтування кузовів автомобілів. Вагомий внесок у розвиток теорії та практики науково-обґрунтованих технологічних та експлуатаційних засобів для підвищення ресурсу деталей транспортних засобів здійснили такі вітчизняні та зарубіжні вчені, як Бакалець Д. В., Бутько Т. В., Єлізаветін М. А., Гаврилов Е. В., Гнатів А. В., Гребеніков А. Г., Доля І. К., Дмитриченко М. Ф., Лановий О. Т., Линник І. Е., Поліщук І. П., Посвятенко Е. К., Решетніков Д. Н., Сателъ Е. А., Савуляк В. І., Солтус А. П., Енаґоро Н., Trent N.

Постановка завдання. Мета роботи полягає у підвищенні тривалості служби листових елементів транспортних засобів шляхом удосконалення технологій їх виробництва, ремонту та відновлення за допомогою методів саморобного і послідовного листового штампування та вакуумного рихтування на основі комплексного моделювання життєвого циклу деталей та їх формування.

У роботі також розглядається технологія відновлення кузовів транспортних засобів за допомогою рихтування. Систематизовано технологічні процеси листового штампування та найбільш перспективні засоби для підвищення ресурсних характеристик. Здійснено аналіз методів формування листових деталей транспортних засобів.

Виклад основного матеріалу. По-перше, надано аналітичний огляд особливостей виготовлення листових деталей (кузовних, облицьовувальних, обідків коліс, ресор та ін.) на вагонобудівних, автомобільних і ремонтних підприємствах. Представлено аналіз наукових джерел, у якому викладено методи теоретичних і

експериментальних досліджень та рекомендації вітчизняних і закордонних авторів щодо розрахунку напружено-деформованого стану та геометрії заготовки під час формування елементів жорсткості для плоских листових деталей.

Додатково розглянуто технологію відновлення кузовів транспортних засобів за допомогою рихтування. Систематизовано технологічні процеси листового штампування та визначено найбільш сприятливі засоби для підвищення ресурсних характеристик. Проведено аналіз методів формування листових деталей транспортних засобів. Перевага надана технологіям і технологічному оснащенню, спрямованим на створення умов для самочинного деформування заготовок (рис. 1-2) під впливом реактивних складових.

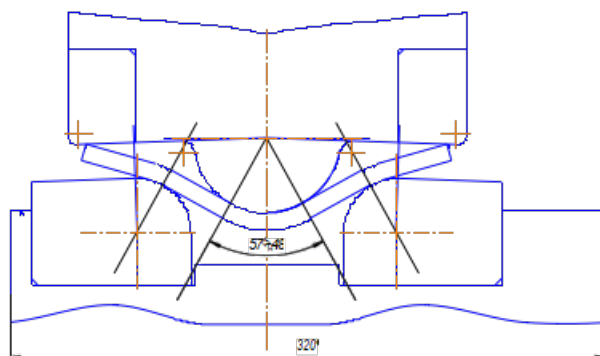


Рисунок 1 – Вигинання деталі «Накладка» ступеневим пуансоном

Джерело: розроблено авторами



P_1, P_2 – деформувальні зусилля; M_1 – реактивний момент; 1-4 – заготовка та її елементи;
5 – підпружинений пуансон

Рисунок 2 – Схемасамочинної формозміни рифта

Джерело: розроблено авторами

При обтягуванні по пуансону вплив на процес деформації переважно зумовлюють поперечні сили, тоді як при формуванні-втягці - діють поздовжні сили. Для забезпечення рівноваги заготовки в першому випадку виникають нормальні напруження на внутрішній поверхні, а в другому - на зовнішній, в напрямку пуансона або матриці. При обтягуванні по пуансону інтегральна сума елементарних сил, що виникають внаслідок широтних напружень по товщині заготовки, дорівнює нулю. У другому випадку інтегральна сума дорівнює поздовжній силі:

$$N = \int_r^R \sigma_{\varphi} dr . \quad (1)$$

Крім того, наявність поздовжньої сили також впливає на величину згинального моменту. Зі збільшенням абсолютної величини поздовжньої сили згинальний момент, необхідний для пластичного згинання заготовки, зменшується. Традиційні методи виготовлення розглянутих деталей вимагають використання потужних пресів.

Розглянемо процес формування окремого рифту в умовах жорсткого защемлення плоскої частини листа. Подовження поперечного перерізу напівкруглого елемента жорсткості можна визначити за різницею довжини дуги рифту і його ширини:

$$\varepsilon_{\varphi} = \pi - 2. \quad (2)$$

Зміна деформацій по товщині заготовки дорівнює:

$$\varepsilon_z = -\varepsilon_{\varphi}. \quad (3)$$

Інтенсивність деформацій:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}}(\pi - 2). \quad (4)$$

Окружні напруження, що діють у напівкруглому елементі жорсткості:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{qb}{2s}, \quad (5)$$

де q – тиск, що діє на заготовку;

b – ширина елемента жорсткості;

s – товщина заготовки.

Інтенсивність напружень з урахуванням того, що $\sigma_z = 0$, $\sigma_m = 0$

$$\sigma_i = \sigma_{\varphi} = \frac{qb}{2s}. \quad (6)$$

Інтенсивність деформацій розраховуємо за формулою (4) $\varepsilon_i = 1,80$. За діаграмою інтенсивних напружень для Ст 3 знаходимо $\sigma_i = 300,0$ МПа. За залежністю (6) знаходимо тиск q , відповідний прогину $h = \frac{b}{2}$. Зусилля формування погонного метра рифту складе:

$$P_f = qS_p = \frac{2s \cdot \sigma_i}{b} \cdot \pi b \cdot 1 = 2\pi s \cdot \sigma_i, \quad (7)$$

де S_p – площа поверхні рифту.

Величина роботи деформування погонного метра рифту:

$$W = P_f \cdot b = 2\pi s b \cdot \sigma_i. \quad (8)$$

У разі обтягування по пуансону деформації розраховують за умовою збереження довжини окружності:

$$\varepsilon_{\varphi} = -\varepsilon_r = \ln \frac{r}{r_0} = \ln \frac{r}{\sqrt{r_0 \cdot (r_0 + s)}}, \quad (9)$$

де r – радіус заготовки в кінцевий момент деформування; r_0 – початковий радіус заготовки.

Уважаємо, що поворот перетинів у процесі згинання відбувається відносно шару, з яким співпадає нейтральна поверхня в кінцевий момент деформації. Крім того, під час згинання довжина шару по нейтральній поверхні залишається незмінною. Величину відносної лінійної деформації можна визначити за таким співвідношенням:

$$\varepsilon_{\varphi} = -\varepsilon_r = \frac{r}{\sqrt{r_0 \cdot (r_0 + s)}} - 1. \quad (10)$$

Її максимальне значення складе:

$$\varepsilon_{\varphi \max} = \sqrt{\frac{r_0 + s}{r_0}} - 1 = \sqrt{1 + \frac{s}{r_0}} - 1 \approx 1 + \frac{s}{2r_0} - 1 \approx \frac{s}{2r_0}. \quad (11)$$

Середнє значення лінійної деформації складе $\varepsilon_\varphi = \frac{s}{r_0}$.

Інтенсивність деформацій під час обтягуванні буде дорівнювати:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{s}{r_0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{s}{b-t}. \quad (12)$$

Значення моменту визначаємо за залежністю:

$$M = \frac{1}{4} \sigma_i \cdot s^2 = P \cdot \frac{b}{2}. \quad (13)$$

Точніше його значення відповідає виразу:

$$M = \frac{bs^2}{6} (1,5 + \varepsilon_i) \sigma_i, \quad (14)$$

де σ_i – напруження плинності, яке визначають за діаграмою справжніх напружень;

ε_i – ступінь деформації крайніх волокон під час обтягування.

Потім за залежністю (2.11) розраховуємо інтенсивність деформацій та за аналогією зі згаданим раніше визначаємо інтенсивність напружень. Енергія деформації унаслідок чистого згинання складе:

$$W_d = \frac{1}{2} \sigma_i \cdot s^2 \cdot P \cdot b, \quad (15)$$

де P – зусилля обтягування.

Розрахунок роботи деформації можна зробити і на підставі класичної теорії деформованості матеріалів [26]. Для формування елемента жорсткості, нехтуючи пружними деформаціями, умову сталості обсягу може бути записано у вигляді:

$$d\varepsilon_r = -d\varepsilon_z. \quad (16)$$

Умова збігання головних осей напружень і деформацій та сталості величини головних нормальних напружень має вигляд:

$$\frac{-\sigma_z}{\sigma_\varphi - \sigma_z} = \frac{-d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi - d\varepsilon_z} = \frac{\sigma_\varphi}{\sigma_z} = -\frac{d\varepsilon_\varphi}{d\varepsilon_z} = -1. \quad (17)$$

Якщо прийняти, що деформації за товщиною постійні, то збільшення деформацій можна визначити з виразів:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_z &= \frac{ds}{s}; \\ d\varepsilon_\varphi &= \frac{dr}{r}. \end{aligned} \quad (18)$$

Рівняння рівноваги для формування циліндричного рифту приводиться до вигляду

$$\frac{d\sigma_\varphi}{\sigma_\varphi} = \frac{ds}{s} d\varphi, \quad (19)$$

де φ – кут згинання.

Враховуємо, що $\sigma_\varphi = -\sigma_s$, φ змінюється від 0 до π , а товщина заготовки – від s_0 до $2s_0/\pi$. З огляду на те, що при $s = s_0/2\sigma_z = q$ (q – тиск, необхідний для формування елемента жорсткості), отримаємо тиск формування, що дорівнює:

$$q = \sigma_z \cdot \pi \cdot \ln \frac{2}{\pi}. \quad (20)$$

Середня величина роботи пластичної деформації під час формування складе для одиничної довжини:

$$W_f = q \cdot 2b \cdot b = 2b^2 \cdot \sigma_z \cdot \pi \cdot \ln \frac{2}{\pi} \approx 4b^2 \cdot \sigma_z. \quad (21)$$

Під час обтягування:

$$W_b = 0,25 \cdot \pi \cdot \sigma_s \cdot s^2 = 0,785 S^2 \sigma_s. \quad (22)$$

При $b = 5s$ робота деформації під час обтягування в 1,3 раза менша, ніж під час формування. Зменшення роботи деформації також призводить до зменшення деформації та наклепу матеріалу, тому така технологічна схема більше спрямована на підвищення ресурсу листових деталей транспортних засобів. Наступна методика визначення енергії пластичної деформації ґрунтується на феноменологічній теорії деформованих матеріалів. Скористаємося діаграмою справжніх напружень Ст. 3 та діаграмами пластичності та стійкості.

Питому енергію, яка витрачена на пластичну деформацію, визначають з виразу:

$$W = A \int_0^{\varepsilon_i} \varepsilon_i d\varepsilon_n, \quad (23)$$

де A – коефіцієнт, чисельно рівний інтенсивності напружень (при $\varepsilon_i = 1 A = 1000$ МПа);

ε_i – ступінь деформації;

n – критичний ступінь деформації в момент утворення шийки (при $\varepsilon_i = 1$ для Ст. 3 $n = 0,315$).

Під час формування показник схеми напруженого стану дорівнює:

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{\sigma_u} = 0, \quad (24)$$

де σ_1, σ_3 – головні напруження.

У цьому випадку $\varepsilon_i = 0,7$. У разі чистого вигинання $\eta = 1$, $\varepsilon_i = 0,5$. За цією методикою співвідношення питомих робіт (а оскільки обсяг деформованого елемента однаковий, то і повних робіт пластичної деформації елемента жорсткості) складе:

$$\frac{1000 \int_0^{0,57} 0,7^{0,315} d\varepsilon_p}{\frac{1}{k-1} \int_0^{0,5} 0,5^{0,315} d\varepsilon_p} = \frac{509,4}{803,9} \approx 0,63(k-1), \quad (25)$$

де k – відношення ширини елемента жорсткості b до товщини заготовки s .

Висновки:

1. Розроблені та вдосконалені конструктивно-технологічні методи для підвищення тривалості служби листових деталей транспортних засобів.

2. Експериментальні дослідження підтвердили можливість отримання якісних плоских деталей з прямолінійним рифтом за допомогою методів гнуття.

3. Розроблено математичну модель для визначення стріли прогину та напружено-деформованого стану, що підтверджується критерієм Фішера за даними експерименту.

4. Виконано математичне моделювання процесу штампування закінцівки рифту під час вільної формозміни без контакту з жорстким інструментом.

5. Розроблено експериментально-аналітичний метод для оцінювання ресурсу

листових деталей транспортних засобів.

Список літератури

1. Огородников В.А. Вплив гідростатичного тиску на пластичність металів. *Фізика і техніка високих тисків*. 2007. № 2, том 17, С. 7-11.
2. Огородников В.О., Алієва Л.І., Кожушаний В.М., Деревенько І.О. Параметри моделі, що формує карту матеріалу в процесах обробки тиском. *Обробка матеріалів тиском*. 2011. № 1. С. 98-98.
3. Огородников В.О., Грушко А.В., Гуцалюк О.В. Вибір критеріїв деформованості при оцінці використаного ресурсу пластичності в процесах обробки металів тиском. *Вісник НТУ "ХПІ"*. 2014. № 43. С. 127-136.
4. Алієва Л.І. Критерії деформованості та можливості їх використання в задачах обробки тиском. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2016. № 2. С.17-21.
5. Огородников В.А., Киселев В.Б., Сивак І.О. Энергия. Деформации. Разрушение. Винница: УНЭВИРСУМ-Винница, 2005. 204 с.
6. Можаровский М.С. Теория мощности, пластичности и ползучести: учебник. К.: Высшая шк., 2002. 308 с.
7. Dragobetskii V.V., Mospan D.V., Trotsko O.V., Lotous V.V. Excavator bucket teeth strengthening using a plastic explosive deformation. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. No. 4. P. 363–368.
8. Batygin Yu.V., Golovashchenko S.F., Gnatov A.V. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – Fundamentals and perspective applications. *Journal of Materials Processing Technology, Elsevier*. 2013. № 213 (3). P. 444–452.
9. Zhongyu cui, Zhyong liu, Liwei Wang et al. Effect of plastic deformation on the electrochemical and stress corrosion cracking behavior of X70 steel in near-neutral pH environment. AUTHOR's Accepted Manuscript, 2016. P. 69.
10. Energy-flows control in liquids at electro-hydraulic forming / Мукхайло Тараненко та ін. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2022. Вип. 6 (137). С. 63-72 http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2022_6_7.pdf (дата звернення:17.09.2023).
11. Salenko O., Dzhulii D., Drahobetskyi V., Symonova A., Moloshtan D. Damage Mechanisms of Multilayer Axisymmetric Shells Obtained by the FDM Method. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI.DSMIE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32774-2_27
12. Moloshtan D., Kuzev I., Shlyk S., Shchetynin V. Material saving reserves in sheet stamping production. *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2021. №56, Vol.1. P. 47-52

References

1. Ohorodnykov, V.A. (2007). Vplyv hidrostatychnoho tysku na plastychnist' metaliv [The effect of hydrostatic pressure on the plasticity of metals]. *Fizyka i tekhnika vysokokh tyskiv – Physics and technology of high pressures, 2, Vol.17*, 7-11 [in Ukrainian].
2. Ohorodnykov, V.O., Aliieva, L.I., Kozhushanyj, V.M. & Dereven'ko, I.O. (2011). Parametry modeli, scho formuie kartu materialu v protsesakh obrobky tyskom [Parameters of the model that forms the map of the material in the processes of pressure treatment]. *Obrobka materialiv tyskom – Processing of materials by pressure, 1*, 98-98 [in Ukrainian].
3. Ohorodnykov, V.O., Hrushko, A.V. & Hutsaliuk, O.V. (2014). Vybir kryteriiv deformovanosti pry otsyntsi vykorystanoho resursu plastychnosti v protsesakh obrobky metaliv tyskom [The selection of deformability criteria in the assessment of the used plasticity resource in the processes of processing metals by pressure]. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "Khpi", 43*, 127-136 [in Ukrainian].
4. Aliieva, L.I. (2016). Kryterii deformovanosti ta mozhlyvosti ikh vykorystannia v zadachakh obrobky tyskom [Deformability criteria and possibilities of their use in pressure processing tasks]. *Visnyk Donbas'koi derzhavnoi mashynobudivnoi akademii – Bulletin of the Donbas State Machine-Building Academy, 2*, 17-21 [in Ukrainian].
5. Ohorodnykov, V.A., Kyselev, V.B. & Syvak, Y.O. (2005). *Enerhyia. Deformatsyy. Razrushenye. [Energy. Deformations. Destruction]*. Vynnytsa: UNEVYRSUM-Vynnytsa, [in Ukrainian].
6. Mozharovskiy, M.S. (2002). *Teoryia moschnosti, plastychnosti y polzuchesty [The theory of strength, plasticity and creep]*. Kyiv: Vysshaia shk. [in Ukrainian].
7. Dragobetskii, V.V., Mospan, D.V., Trotsko, O.V. & Lotous, V.V. (2015). Excavator bucket teeth strengthening using a plastic explosive deformation. *Metallurgical and Mining Industry, No. 4*, P. 363–

- 368 [in English].
8. Batygin, Yuri V., Golovashchenco, Sergey F. & Gnatov, Andrey V. (2013). Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – Fundamentals and perspective applications. *Journal of Materials Processing Technology, Elsevier, № 213 (3)*, P. 444–452 [in English].
 9. Zhongyu cui, Zhyong liu, Liwei Wang et al. (2016). Effect of plastic deformation on the electrochemical and stress corrosion cracking behavior of X70 steel in near-neutral pH environment. AUTHOR's Accepted Manuscript. P. 69 [in English].
 10. Mykhaylo Taranenko, Oleksandr Naryzhniy, Anastasiia Symonova, Dmytro Moloshtan, Volodymyr Drahobetskyi & Sergii Shlyk (2022). Energy-flows control in liquids at electro-hydraulic forming. *Visnyk KrNU imeni Mykhajla Ostrohrads'koho – Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky KrNU. Issue 6(137)*, 63-72 http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2022_6_7.pdf [in English]
 11. Salenko, O., Dzhulii, D., Drahobetskyi, V., Symonova, A. & Moloshtan, D. (2023). Damage Mechanisms of Multilayer Axisymmetric Shells Obtained by the FDM Method. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI. DSMIE Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32774-2_27 [in English]
 12. Moloshtan, D., Kuzev, I., Shlyk, S. & Shchetynin, V. (2021). Material saving reserves in sheet stamping production. *Norwegian Journal of development of the International Science. №56, Vol.1*, p. 47-52 [in English].

Volodymyr Dragobetskii, Prof., DSc., **Dmytro Moloshtan**, PhD tech. sci., **Andrii Chernysh**, PhD tech. sci.
Kremenchuk National University named after Mykhailo Ostrogradskyi, Kremenchuk, Ukraine

Restoration of Vehicle Sheet Metal Parts After Road Accidents

This article is a continuation of research on the use of methods to improve the repair of vehicle body parts after the examination of road accidents. Body parts are among the main and most complex and labor-intensive structural elements of a vehicle (land, air, sea). In addition, body parts are the basis of the vehicle structure, which combines all its parts into a single whole in terms of power. The service life of the body as a whole largely determines the operational durability of land transport in general. The service life of body parts, which are usually made from sheet metal by stamping, is affected by corrosion, operational damage and traffic accidents. The reserve for increasing the durability of body parts, including sheet metal parts (springs, wheel rims, etc.), is a set of technological means and a rational choice of technological parameters of the process of their manufacture by sheet stamping.

Road accidents are a serious test for body components. In such situations, it is necessary to take into account not only the appearance of the parts but also their internal structure. Modern testing technologies and diagnostic methods allow us to detect potentially dangerous damage in time. Optimization of the technological parameters of the sheet forming process is a key factor in increasing the durability of housing elements. Taking into account high loads during design and manufacturing allows us to create parts that can withstand the pressure of various operating conditions. This integrated approach to solving the problems of improving the repair of body parts guarantees an increase in the service life of vehicles and ensures their reliability and safety on the road.

repair, operation, vehicles, deformation, wear, sheet metal parts

Одержано (Received) 24.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 27.10.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

О. М. Горяїнов, доц., канд. техн. наук, **А.С. Козенок**, доц., канд. техн. наук,
Н.Г. Бережна, доц., канд. техн. наук, **І.І. Сисенко**, доц., канд. техн. наук, **І.А. Бабич**, ст.
викл., **О.В. Войтов**, асп.

Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна

e-mail: kravcov_84@ukr.net

Дослідження математичної моделі стійкості транспортного потоку на ділянках дорожньої мережі міста

У роботі наведено результати дослідження математичної моделі стійкості транспортного потоку на ділянках вулично-дорожньої мережі міста при зміні зовнішніх факторів. На підставі результатів моделювання запропоновано всі фактори, що впливають на стійкість транспортного потоку, розділити на три групи. Перша група факторів характеризує конструкцію транспортного засобу. Другу групу факторів названо факторами часу, які враховують: час реакції водія на зміну дорожньої ситуації; час на маневр, який може використовувати автомобіль у разі зміни дорожньої ситуації; сумарний час затримок під час руху за маршрутом. Третя група факторів враховує особливості побудови інфраструктури дорожнього середовища. На підставі результатів моделювання представлено рейтинг факторів, що впливають на величину запасу стійкості транспортного потоку.

транспортний потік, моделювання, динамічна модель, градієнт щільності, градієнт швидкості, коефіцієнт підсилення, постійна часу, критерій стійкості, критерій робастності транспортного потоку

Постановка проблеми. Високий рівень завантаження вулично-дорожньої мережі у містах супроводжується різким зниженням швидкостей сполучення та транспортними заторами. Це призводить до зростання аварійності, підвищення часу доставки вантажів та підвищення собівартості перевезень. Враховуючи це, дослідження питань пропускної спроможності існуючої дорожньої мережі шляхом моделювання та прогнозування виникнення заторів, коригування маршрутів руху є актуальним та дозволить удосконалювати організацію перевізного процесу.

У цій статті розглянуто фактори, що визначають умови стійкості транспортного потоку (виникнення заторів) під час руху транспортних засобів по вуличній мережі, кількісні та якісні показники, що впливають на стійкість, ранжування факторів за ступенем впливу на стійкість.

Робота є продовженням робіт [1,2], де в роботі [1] обґрунтовано структуру математичної моделі оцінки ергономічної стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі при дії зовнішніх збурень. Математична модель враховує динаміку розвитку процесу. Крім градієнтів швидкості та щільності транспортних потоків враховуються динамічні властивості транспортних засобів та багатосмугова дорожня мережа, а також час затримок на пішохідних переходах та світлофорах. Показано, що динамічні характеристики транспортного потоку описуються диференціальним рівнянням третього порядку. Продовженням досліджень, які наведено в роботі [2], є розробка критерію оцінки стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі. Аналіз критерію дозволяє сформулювати параметри, від яких залежить стійкість. Показано, що на стійкість транспортного потоку впливають

щільність та інтенсивність транспортного потоку. Їх необхідно розраховувати для кожної ділянки дорожньої мережі. Дано визначення робастності транспортного потоку (англ. robust range) – це безрозмірна величина, яка характеризує діапазон сталого руху транспортних засобів на ділянках дорожньої мережі з урахуванням її інфраструктури, щільності та інтенсивності руху без затримок та заторів. Показано, що розроблений критерій робастності необхідно застосовувати при аналізі дорожньої мережі на виникнення затримок під час руху та заторів, а також при проектуванні нової міської дорожньої мережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На думку авторів роботи [3] моделювання руху є широко використовуваним методом вивчення транспортних потоків, планування та розробки транспортних мереж та систем. Імітаційні моделі дорожнього руху автори поділяють на три категорії: макроскопічні, мікроскопічні та мезоскопічні. У більшості випадків моделі дозволяють визначити такі параметри, як інтенсивність руху, середня швидкість, затримки та втрати часу у дорозі. Дана робота є аналізом існуючих моделей транспортних потоків з точки зору їх функцій, обмежень та застосуванням за різними критеріями.

Основним чинником під час моделювання руху використовується щільність транспортного потоку [4-6]. Наприклад, у роботі [4] щільність транспортних потоків враховується як рівноважне, стабільне значення. При цьому рівноважні щільності потоків отримані авторами роботи аналітично. У роботі [5] наведено експериментальний метод реєстрації щільності транспортного потоку на підставі руху транспортних засобів поблизу перехрестя. У роботі [6] показано застосування щільності потоку, що варіюється, в моделях. Авторами отримано рішення для різних значень щільності. На наш погляд облік щільності потоку, що варіюється, є більш перспективним методичним прийомом. Такий підхід дозволяє підвищити точність моделювання.

Моделювання неоднорідних (гетерогенних) транспортних потоків представлено в роботах [7, 8] Авторами роботи [7] розроблена макроскопічна модель гетерогенного транспортного потоку з частковим підключенням до автоматизованої системи, що заснована на теорії потенційного поля безпеки. У роботі [8] макроскопічна модель гетерогенного транспортного потоку враховує градієнт швидкості та час затримки водія у прийнятті рішень.

У роботах [9-12] досліджувалося вплив середньої неоднорідності руху автомобілів за наявності кількох смуг для руху, виникнення конфліктних ситуацій між автомобілями при зміні смуг. Наприклад, у роботі [10] у модель включений такий фактор, як погодні умови. У роботі [11], до перерахованих факторів, додані такі параметри, як прискорення та гальмування транспортних засобів при русі за автомобілем, що йде попереду. У роботі [12] враховані різні стилі водіння та відмінності у параметрах транспортних засобів (швидкість, прискорення, уповільнення тощо). Такі фактори були включені в модель з використанням аналізу основних компонентів та методу кластеризації. На думку авторів перерахованих робіт, облік таких факторів дозволяє підвищити адекватність мікроскопічних математичних моделей до реальної дорожньої ситуації та прогнозувати виникнення аварійних ситуацій та заторів.

У роботах [13,14] проводяться порівнянні дослідження для відтворення зниження пропускної спроможності на з'їздах з автомагістралей та в'їздах на магістралі. Авторами виявлено одну з основних слабких сторін мікроскопічного моделювання дорожнього руху при з'їзді та в'їзді на магістралі – це зниження пропускної

спроможності. Запропоновано модель примусової зміни смуги руху для транспортних засобів, що в'їжджають на магістраль.

Для дослідження феномена зупинки та зміни швидкості руху, викликаного слідуванням за автомобілем, що йде попереду, пропонується гібридна модель, яка поєднує можливості на макро і мікрорівнях [15]. По-перше, при стохастичному характері поведінки водіння до різниці швидкостей додається броунівський шум, щоб модифікувати модель слідування за автомобілем. Потім додаються макроскопічні характеристики транспортного потоку та дві моделі поєднуються в контексті великого транспортного потоку. В основі створення таких моделей лежить оцінка щільності транспортного потоку [16]. На думку авторів, розпізнавання та підрахунок транспортних засобів — два основні кроки для оцінки щільності руху. Системи ідентифікації транспортних засобів можуть будуватися з урахуванням нейронних мереж.

У роботах [17,18] гібридні моделі представлені як інтелектуальні системи керування дорожнім рухом. Такі системи є ефективним способом вирішення проблеми заторів у місті, підвищення пропускної спроможності доріг та забезпечення безпеки водіїв. Короткострокове прогнозування транспортних потоків є основним завданням інтелектуальної системи керування дорожнім рухом.

Підсумовуючи аналіз публікацій, присвячених моделюванню транспортних потоків, необхідно зазначити, що основними факторами в таких моделях виступають щільність та швидкість руху транспортних засобів у потоці, коливання швидкості руху (прискорення, уповільнення), реакція водіїв на зміну дорожньої ситуації, стійкість транспортного потоку до виникнення заторів. На нашу думку значимими факторами під час використання моделей мають виступати градієнт щільності [6] і градієнт швидкості транспортного потоку [10]. Дані фактори дозволять враховувати стохастичність транспортного потоку та підвищити рівень прогнозування стійкості транспортного потоку до заторів.

Саме такий підхід застосовано авторами роботи [19]. Для вирішення проблеми заторів на певній ділянці у роботі розроблено набір систем прийняття рішень, щодо оптимізації транспортного потоку. Для аналізу фактичних умов руху та розрахунку щільності та швидкості руху, створюється модель прогнозування, яка ітеративно оновлюється. На основі цієї моделі оцінюється ступінь завантаженості на ділянці дороги, у зв'язку з чим пропонуються методи інтелектуального прийняття рішень та узгодженої оптимізації. Однак відповіді на визначення межі втрати стійкості (виникнення заторів) дана робота не дає.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження математичної моделі стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі в залежності від зміни щільності потоку, коливань щільності, дії зовнішніх збурень та факторів, що впливають на стійкість.

Виклад основного матеріалу. У роботі [2] представлено критерій стійкості транспортного потоку, який отримав назву критерія робастності:

$$RR = \frac{[(T_1T_2 + T_1T_3 + T_2T_3) \times (T_1 + T_2 + T_3 + K_2K_3T_1)]}{[(T_1T_2T_3 \times K_2K_3) + T_1T_2T_3]} \quad (1)$$

Робастність RR транспортного потоку (англ. robust range) – це безрозмірна величина, яка характеризує діапазон стійкого руху транспортних засобів на ділянках дорожньої мережі з урахуванням її інфраструктури, щільності та інтенсивності руху без затримок та заторів.

Проводячи оцінку адекватності математичної моделі, яку наведено у роботі [1], було уточнено значення постійних часу і коефіцієнтів підсилення, які входять у критерій (1).

Значення постійної часу T_1 , яка характеризує інерційність водія, залежно від величини щільності транспортного потоку, представлено виразом:

$$T_1 = \frac{t_1^2 \cdot N \cdot l_a \cdot \sigma_a}{70 \cdot L \cdot v}, \text{ с,} \quad (2)$$

де t_1 – час реакції водія на зміну дорожньої ситуації, може змінюватися в межах від 0,6 до 1,4 сек;

N – кількість автомобілів на контрольованій ділянці дороги;

l_a – довжина автомобіля, м;

σ_a – середньоквадратичне відхилення прискорення автомобілів в транспортному потоці, м/с², формулу для розрахунку наведено в роботі [1];

L – довжина контрольованої ділянки дороги, зазвичай приймається рівною 1000 м;

v – швидкість автомобілів у транспортному потоці, м/с.

Значення постійної часу T_2 , яка характеризує інерційність автомобіля і виявляється у здатності до маневру, представлено формулою:

$$T_2 = \frac{M \cdot l_a^2}{1000 \cdot N_e \cdot t_2^2}, \text{ с,} \quad (3)$$

де M – маса автомобіля, розмірність кг;

N_e – номінальна потужність двигуна автомобіля, розмірність Вт;

t_2 – час на маневр, який може використовувати автомобіль при зміні дорожньої ситуації на контрольованій ділянці, розмірність с.

Значення постійної часу T_3 , що характеризує інерційність зміни дорожньої ситуації, наведено формулою:

$$T_3 = \frac{n \cdot t_2^2}{5 \cdot t_3}, \text{ с,} \quad (4)$$

де n – кількість смуг руху на проїжджій частині;

t_3 – сумарний час затримок під час руху за маршрутом довжиною 1000 м, с.

Коефіцієнт підсилення K_1 , який характеризує ступінь впливу щільності транспортного потоку на час реакції водія, представлений формулою:

$$K_1 = \frac{N \cdot l_a}{L}, \quad (5)$$

Коефіцієнт підсилення K_2 , який характеризує вплив динамічності транспортного потоку на час затримок під час руху та втрату стійкості, представлений формулою:

$$K_2 = \frac{\sigma_a \cdot N^2 \cdot l_a^3}{v^2 \cdot L^2}. \quad (6)$$

Коефіцієнт підсилення K_3 , який характеризує вплив зміни дорожньої ситуації, на час затримки під час руху в потоці та втрату стійкості, представлений формулою:

$$K_3 = \frac{N \cdot l_a \cdot k^2 \cdot s^2}{10 \cdot L}, \quad (7)$$

де k – кількість пішохідних переходів на контрольованій ділянці;

s – кількість світлофорів на контрольованій ділянці.

Виконаємо дослідження математичної моделі стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі в залежності від зміни щільності потоку, коливань щільності, дії зовнішніх збурень та факторів, що впливають на стійкість.

Вираз для розрахунку щільності транспортного потоку на ділянці дорожньої мережі довжиною 1000 м представимо у вигляді:

$$p = \frac{(N \pm \sigma_N)}{L}, 1/m, \quad (8)$$

де σ_N – середньоквадратичне відхилення кількості автомобілів у транспортному потоці виразимо формулою:

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (N_i - N_{cp})^2}, \quad (9)$$

де m – кількість вимірювань величини кількості автомобілів на контрольованій ділянці;

N_i – величина кількості автомобілів i -го виміру;

N_{cp} – величина середньої кількості автомобілів m вимірів.

Дослідження стійкості (робастності) RR транспортного потоку, формула (1), під час руху міськими вулицями та магістралями, будемо виконувати залежно від зміни щільності транспортного потоку, формула (8). У формулу входить величина середньоквадратичного відхилення кількості транспортних засобів σ_N під час вимірювань. Додавання σ_N дозволяє врахувати коливання величини щільності транспортного потоку, як випадкової величини, що підвищить точність моделювання.

Додатково, до вхідних параметрів, від яких залежить робастність транспортного потоку, будуть враховані: довжина автомобіля l_a , м; маса автомобіля M , кг; потужність двигуна автомобіля N_e , Вт; час реакції водія на зміну дорожньої ситуації t_1 , с; час на маневр, який може використовувати автомобіль за зміни дорожньої ситуації t_2 , с; сумарний час затримок під час проходження по маршруту t_3 , с; кількість смуг руху на проїжджій частині n ; кількість пішохідних переходів k та світлофорів s на контрольованій ділянці дороги.

Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень щільності при зміні довжини автомобіля, представлені на рис.1. За значенням критерію робастності $RR=1$, транспортний потік втрачає стійкість, тобто відбувається зупинка руху чи утворюється затор. Значенню критерія робастності більше одиниці відповідає наявність руху автомобілів у потоці, це з висновків роботи [2]. Чим більша величина критерію RR , тим вище запас по робастності транспортного потоку. При RR менше одиниці відбувається зупинка руху в потоці, утворюється затор.

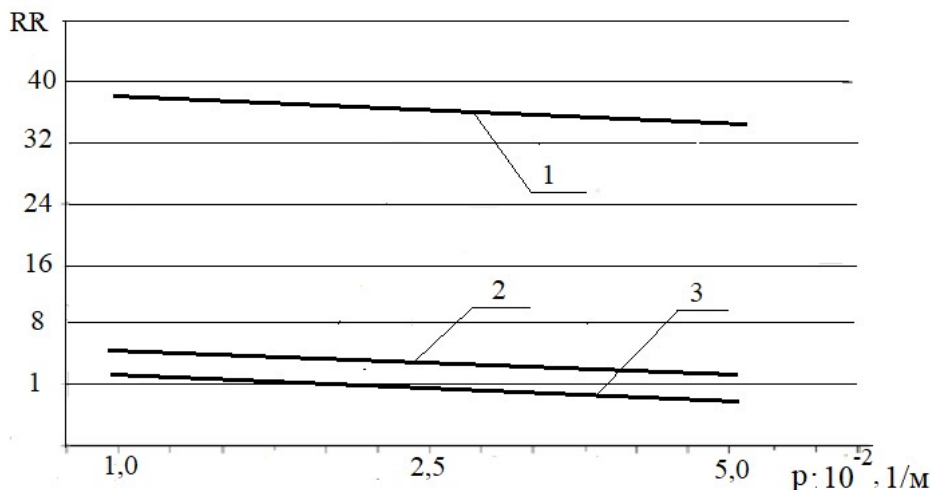


Рисунок 1 – Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень щільності при зміні довжини автомобіля: 1 - $l_a = 4$ м; 2 - $l_a = 12$ м; 3 - $l_a = 20$ м
Джерело: розроблено атоами

Як впливає із аналізу залежностей, представлених на рис. 1, довжина автомобіля є значущим фактором, що впливає на робастність транспортного потоку. При довжині автомобіля, що дорівнює 20 м, крива 3, втрата стійкості (перетин лінії $RR=1$), настає при малих значеннях щільності. І навпаки, при довжині автомобіля $l_a = 4$ м, легкові автомобілі, крива 1, запас стійкості досягає максимального значення, що дорівнює 38 одиниць.

Другим, за значущістю фактором, що впливає на робастність транспортного потоку, є маса автомобіля. Залежності зміни діапазону робастності для різних значень щільності при зміні маси автомобіля представлені на рис. 2. Як впливає з наведених залежностей, збільшення маси автомобіля знижує робастність транспортного потоку. Необхідно відзначити, що діапазон робастності вдвічі менше, ніж при зміні довжини автомобіля і не перевищує значень $RR=18$. Однак втрата стійкості у русі настає при великих значеннях щільності.

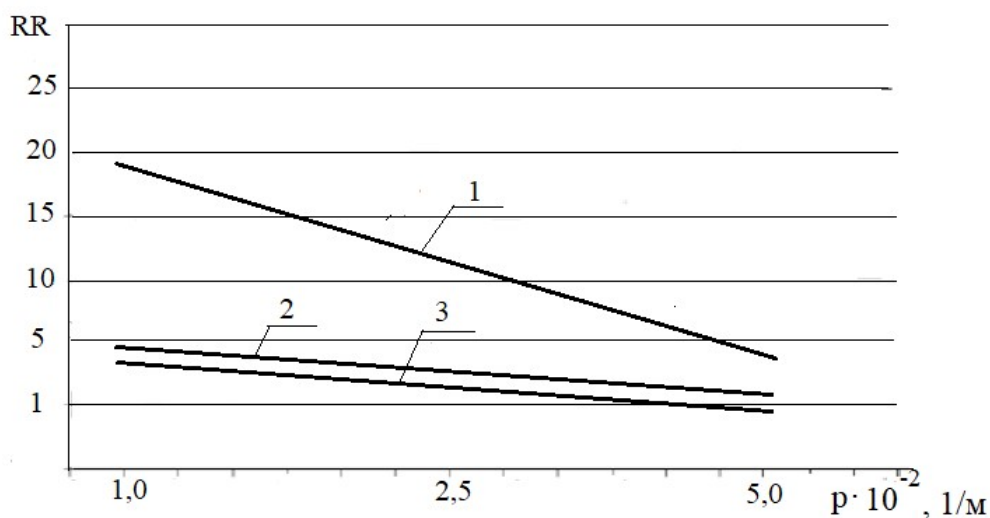


Рисунок 2 – Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень щільності при зміні маси автомобіля: 1 - $M = 2000$ кг; 2 - $M = 10000$ кг; 3 - $M = 18000$ кг
Джерело: розроблено атоами

Третім, за значимістю фактором, що впливає на робастність транспортного потоку, є потужність двигуна автомобіля. Залежності зміни діапазону робастності для різних значень щільності при зміні потужності двигуна автомобіля, наведено на рис. 3.

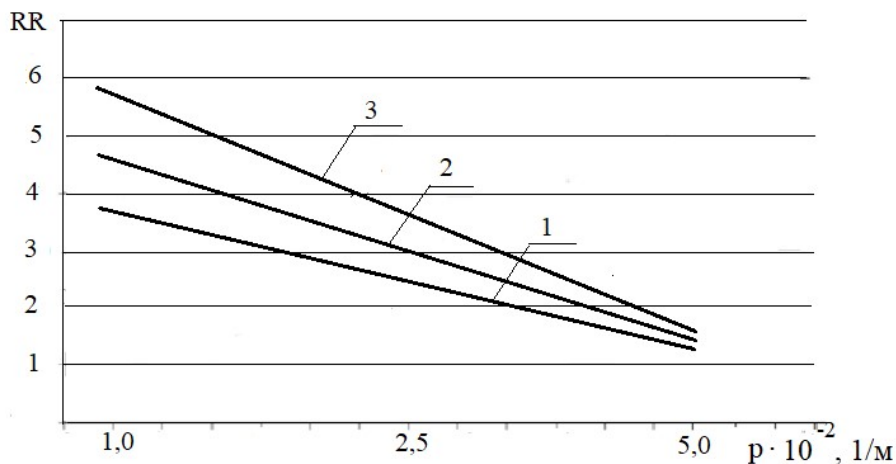


Рисунок 3 – Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень щільності при зміні потужності двигуна автомобіля:
1 – $N_e = 100$ кВт; 2 – $N_e = 150$ кВт; 3 – $N_e = 200$ кВт

Джерело: розроблено атоами

Як випливає з представлених залежностей, збільшення потужності двигуна автомобіля збільшує робастність транспортного потоку. Однак ступінь впливу незначний і не перевищує значень $RR=6$. Втрата стійкості у русі настає при ще більших значеннях щільності.

Довжина автомобіля, рис.1, маса автомобіля, рис.2 та потужність двигуна автомобіля, рис.3, відповідають групі конструктивних факторів, які характеризують транспортний засіб та його вплив на робастність транспортного потоку.

Другу групу факторів можна назвати факторами, які враховують: час реакції водія на зміну дорожньої ситуації, рис. 4; час на маневр, який може використовувати автомобіль за зміни дорожньої ситуації, рис. 5; сумарний час затримок під час руху за маршрутом, рис. 6.

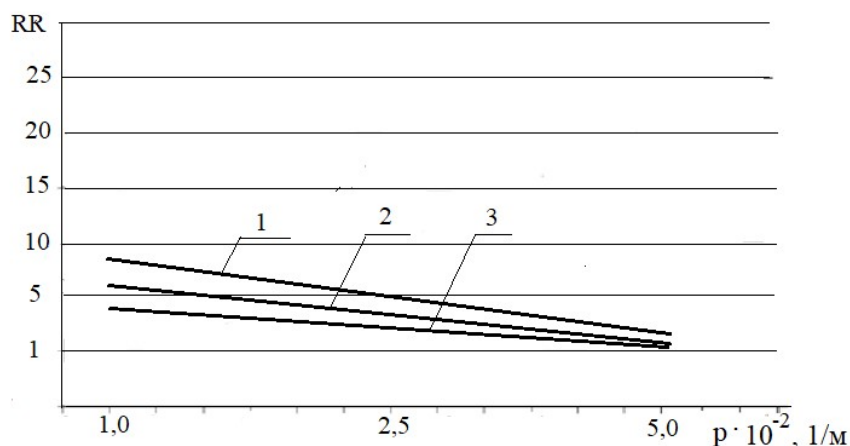


Рисунок 4 – Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень щільності при зміні часу реакції водія на дорожню ситуацію:
1 – $t_r = 0,6$ с; 2 – $t_r = 1,0$ с; 3 – $t_r = 1,4$ с

Джерело: розроблено атоами

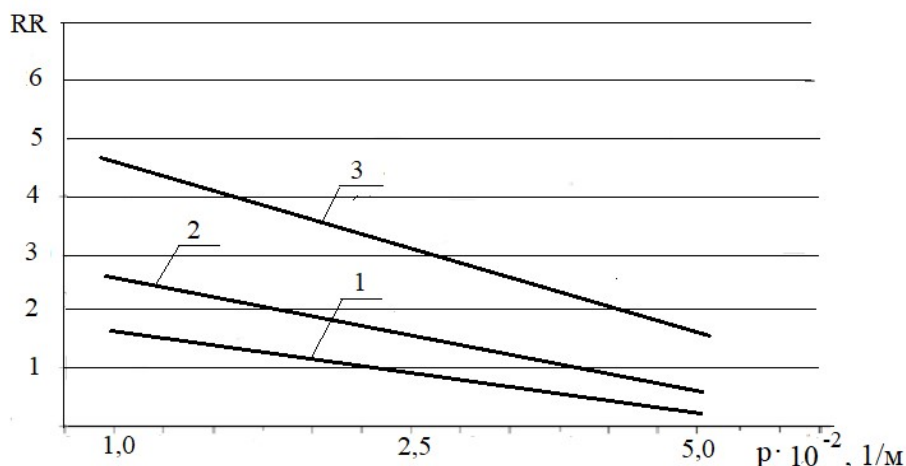


Рисунок 5 – Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень щільності при зміні часу на маневр, який може використовувати автомобіль при зміні дорожньої ситуації: 1 – $t_2 = 4$ с; 2 – $t_2 = 7$ с; 3 – $t_2 = 10$ с

Джерело: розроблено атоами

Аналіз представлених залежностей дозволяє стверджувати про середній ступінь впливу на діапазон робастності транспортного потоку таких факторів як час реакції водія на дорожню ситуацію t_1 . Діапазон робастності за зміни t_1 не перевищує значень $RR=8$.

Ступінь впливу часу на маневр t_2 , який може використовувати автомобіль при зміні дорожньої ситуації, представлено на рис.5. Чим більший час, який може використовувати водій автомобіля на маневр, крива 3, тим вище робастність транспортного потоку. При мінімальному часі на маневр, крива 1, настає зупинка транспортного потоку. Значення критерію робастності при зміні величин щільності не перевищує 5 одиниць.

Необхідно відзначити, що діапазон робастності при зміні сумарного часу затримок під час проходження по маршруту t_3 значно вище, ніж при зміні t_1 та t_2 , але не перевищує значень $RR=15$.

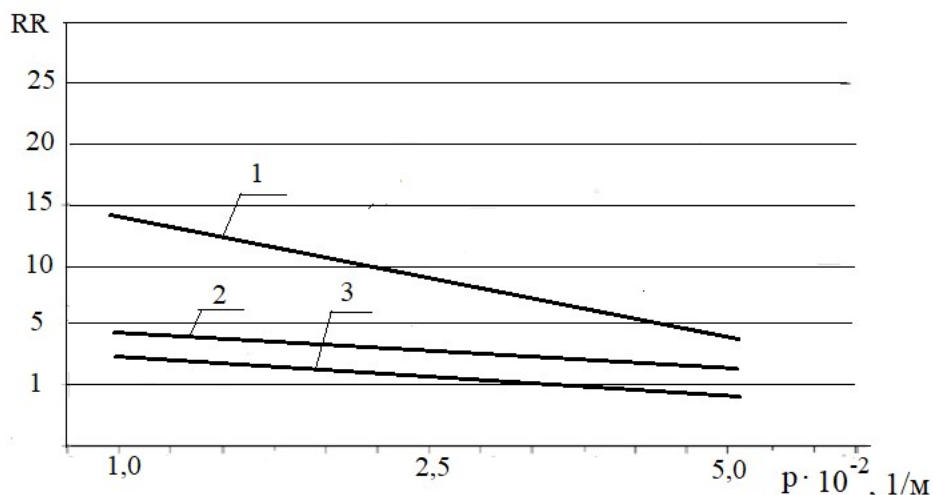


Рисунок 6 – Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень щільності при зміні сумарного часу затримок під час руху за маршрутом: 1 – $t_3 = 50$ с; 2 – $t_3 = 150$ с; 3 – $t_3 = 250$ с

Джерело: розроблено атоами

Третя група факторів враховує особливості побудови інфраструктури дорожнього середовища. До таких факторів належать: кількість смуг руху на проїжджій частині n , рис. 7; кількість пішохідних переходів k та світлофорів s на контрольованій ділянці, рис. 8.

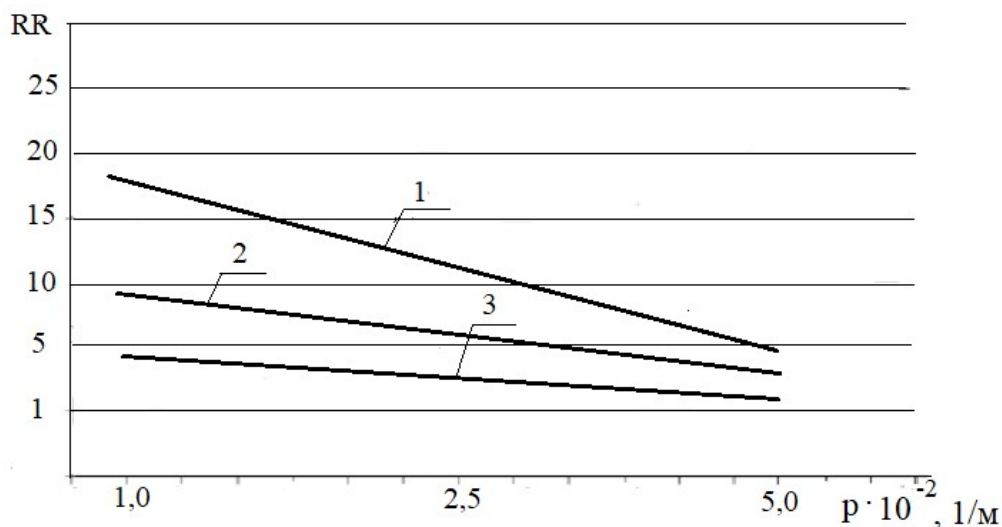


Рисунок 7 – Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень щільності при зміні кількості смуг руху на проїжджій частині:
1 - $n = 4$; 2 - $n = 2$; 3 - $n = 1$

Джерело: розроблено атоами

Як впливає з представлених залежностей збільшення кількості смуг для руху на проїжджій частині підвищує критерій робастності до значень $RR=19$, крива 1. Це сприяє підвищенню стійкості транспортного потоку у всьому діапазоні зміни щільності. Імовірність утворення заторів мінімальна.

Збільшення кількості пішохідних переходів k та світлофорів s на контрольованій ділянці дороги призводить до зниження стійкості, що сприяє виникненню заторів. Слід зазначити, що діапазон робастності при зміні k і s не перевищує значень $RR=5$.

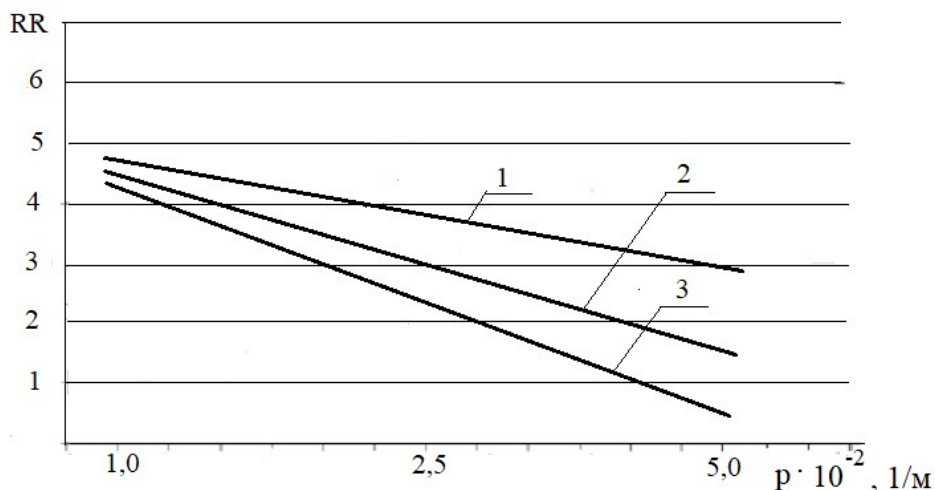


Рисунок 8 – Залежності зміни діапазону робастності транспортного потоку для різних значень щільності при зміні кількості пішохідних переходів та світлофорів на контрольованій ділянці:
1 - $k = 2$; $s = 2$; 2 - $k = 5$; $s = 5$; 3 - $k = 8$; $s = 8$

Джерело: розроблено атоами

Висновки. Аналіз виразу (1), який є критерієм робастності транспортного потоку, дозволяє сформулювати параметри від яких залежить стійкість. Як впливає з виразів, за якими розраховуються коефіцієнти підсилення K_1 , K_2 , K_3 , на стійкість транспортного потоку впливають щільність, інтенсивність потоку і зміна дорожньої ситуації. Їх необхідно розраховувати за формулами (5) - (7) для кожної ділянки дорожньої мережі чи магістралі, які підлягають дослідженню та підставляти у формулу (1). Постійні часу T_1 , T_2 , T_3 залежать від кваліфікації та психофізіологічних властивостей водія, ступеня його втоми, динамічних властивостей автомобіля та дорожніх умов. Їх необхідно визначати за формулами (2) - (4) та підставляти у формулу (1).

Якщо величина критерію дорівнює одиниці – транспортний потік функціонує на межі втрати стійкості. Якщо величина критерію менше одиниці – транспортний потік втратив стійкість, настає зупинка руху – затор. Якщо величина критерію більше одиниці – транспортний потік має стійкість, тобто функціонує без затримок та заторів. Чим більша величина критерію, тим більший запас стійкості.

Критерії робастності RR необхідно застосовувати під час аналізу дорожньої мережі на виникнення затримок під час руху та заторів, а також при проектуванні нової міської дорожньої мережі.

Отриманий результат відрізняється від відомих, які наведені в огляді літературних джерел тим, що дозволяє шляхом моделювання визначити межі втрати стійкості – утворення заторів. Визначення граничних значень щільності транспортного потоку, облік багатосмугового руху, наявність світлофорів та пішохідних переходів, дозволить розробляти заходи щодо запобігання заторам.

Подані результати є продовженням досліджень, що викладені у роботах [1,2]. Відрізняються від відомих тим, що враховують динаміку розвитку процесу. Крім фактора щільності транспортних потоків, що застосовуються у наведеному аналізі робіт, враховуються конструктивні особливості транспортних засобів, багатосмугова дорожня мережа, а також час затримок на пішохідних переходах та світлофорах.

Як впливає з представлених теоретичних досліджень, математична модель стійкості транспортного потоку має обмеження щодо застосування. Обмеження пов'язані з визначенням вихідних даних для моделювання. На контрольованій ділянці дорожньої мережі необхідно визначати щільність потоку. Сучасні електронні засоби контролю дозволяють виконати такі виміри. Крім цього, статистично визначеними величинами є час реакції водіїв на зміну дорожньої ситуації та наявність пішохідних переходів та світлофорів на контрольованій ділянці дороги.

Подальший напрямок досліджень, на наш погляд, лежить у площині створення розрахункових моделей щодо визначення щільності транспортного потоку, прогнозування значень середньоквадратичного відхилення щільності від середнього значення у транспортному потоці. Це дозволить розробити єдину методологію моделювання стійкості транспортних потоків для побудови прогнозів завантаженості дорожньої мережі та магістралей.

На підставі результатів моделювання запропоновано всі вхідні фактори, що впливають на стійкість транспортного потоку, розділити на три групи. Перша група факторів характеризує конструкцію транспортного засобу: довжина автомобіля, маса автомобіля, потужність двигуна автомобіля.

Другу групу факторів названо факторами часу, які враховують: час реакції водія на зміну дорожньої ситуації; час на маневр, який може використовувати автомобіль у разі зміни дорожньої ситуації; сумарний час затримок під час руху за маршрутом.

Третя група факторів враховує особливості побудови інфраструктури дорожнього середовища. До таких факторів належать: кількість смуг руху на проїжджій частині; кількість пішохідних переходів та світлофорів на контрольованій ділянці.

На підставі результатів моделювання представлено рейтинг факторів, що впливають на величину запасу стійкості транспортного потоку. На першому місці, за впливом на втрату стійкості транспортного потоку – час на маневр, який може використовувати автомобіль у разі зміни дорожньої ситуації, рис. 5 та кількість пішохідних переходів та світлофорів на контрольованій ділянці дороги, рис.8. При зміні перерахованих факторів критерій робастності має мінімальні значення. На другому місці за впливом на втрату стійкості – група факторів, яка враховує час реакції водія на зміну дорожньої ситуації, рис. 4 та кількість смуг руху на проїжджій частині, рис. 7. На третьому місці за впливом на втрату стійкості – група факторів, яка враховує довжину автомобіля, рис.1 та масу автомобіля, рис.2.

Показано, що математичну модель та результати моделювання можна застосовувати під час аналізу стійкості транспортних потоків на контрольованих ділянках дорожньої мережі та розробляти заходи щодо підвищення запасу стійкості руху.

Список літератури

1. Войтов В.А., Кравцов А.Г., Карнаух М.В., Горяїнов О.М., Козенок А.С., Бабич І.А. Оцінка ергономічної стійкості транспортного потоку на дільницях дорожньої мережі. Ідентифікація математичної моделі. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2023. Вип. 7(38). С. 236-245 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.236-245](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.236-245)
2. Обґрунтування критерію стійкості транспортного потоку на дільницях дорожньої мережі. / А.Г. Кравцов та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2023. Вип. 7(38). С. 222-230 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.222-230](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.222-230)
3. Dorokhin S., Artemov A., Likhachev D., Novikov A., Starkov E. Traffic simulation: an analytical review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020. Vol. 918. No. 1, p. 012058. IOP Publishing, DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012058
4. Nagatani T. Macroscopic traffic flow in multiple-loop networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications.* 2023. P. 609. 128324. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.128324>
5. Herty M., Kolbe N. Data-Driven Models for Traffic Flow at Junctions. *arXiv preprint arXiv: 2022, 2212.08912.* <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.08912>
6. Karafyllis I., Theodosis D., Papageorgiou M. Stability analysis of nonlinear inviscid microscopic and macroscopic traffic flow models of bidirectional cruise-controlled vehicles. *IMA Journal of Mathematical Control and Information.* 2022. 39(2). P.609-642. <https://doi.org/10.1093/imamci/dnac003>
7. Li L., Ji X., Gan J., Qu X., Ran B. A macroscopic model of heterogeneous traffic flow based on the safety potential field theory. *IEEE Access.* 2021. 9. P. 7460-7470. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3049393>
8. Imran W., Khan Z. H., Gulliver T. A., Khattak K. S., Nasir H. A macroscopic traffic model for heterogeneous flow. *Chinese Journal of Physics,* 2020. 63. P.419-435. <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2019.12.005>
9. Yuan C., Li Y., Huang H., Wang S., Sun Z., Li Y. Using traffic flow characteristics to predict real-time conflict risk: A novel method for trajectory data analysis. *Analytic methods in accident research.* 2022. 35. 100217. <https://doi.org/10.1016/j.amar.2022.100217>
10. Das A., Ahmed M. M. Adjustment of key lane change parameters to develop microsimulation models for representative assessment of safety and operational impacts of adverse weather using SHRP2 naturalistic driving data. *Journal of safety research.* 2022. 8. Pp. 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.01.002>
11. Lazar H. Comparison of microscopic car following models. In *2019 International Conference on Systems of Collaboration Big Data, Internet of Things & Security (SysCoBloTS).* 2019. pp. 1-6. IEEE. DOI:10.1109/SysCoBloTS48768.2019.9028040
12. Feng T., Liu K., Liang C. An Improved Cellular Automata Traffic Flow Model Considering Driving Styles. *Sustainability.* 2023. 15(2). P. 952. <https://doi.org/10.3390/su15020952>
13. Kušić K., Schumann R., Ivanjko E. A digital twin in transportation: Real-time synergy of traffic data streams and simulation for virtualizing motorway dynamics. *Advanced Engineering Informatics.* 2023. 55. 101858. <https://doi.org/10.3390/su15032050>

14. Shang X. C., Liu F., Li X. G., Janssens D., Wets G. The Impact of Three Specific Collaborative Merging Strategies on Traffic Flow. *Journal of Advanced Transportation*. 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/1375867>
15. Wen J., Hong L., Dai M., Xiao X., Wu C. A stochastic model for stop-and-go phenomenon in traffic oscillation: On the prospective of macro and micro traffic flow. *Applied Mathematics and Computation*. 2023. 440. 127637. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2022.127637>
16. Mittal U., Chawla P., Tiwari R. EnsembleNet: A hybrid approach for vehicle detection and estimation of traffic density based on faster R-CNN and YOLO models. *Neural Computing and Applications*. 2023. 35(6). 4755-4774. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07940-9>
17. Djenouri Y., Belhadi A., Srivastava G., Lin J. C. W. Hybrid graph convolution neural network and branch-and-bound optimization for traffic flow forecasting. *Future Generation Computer Systems*. 2023. 139. Pp. 100-108. <https://doi.org/10.1016/j.future.2022.09.018>
18. Xu X., Jin X., Xiao D., Ma C., Wong S. C. A hybrid autoregressive fractionally integrated moving average and nonlinear autoregressive neural network model for short-term traffic flow prediction. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2023. 27(1). 1-18. <https://doi.org/10.1080/15472450.2021.1977639>
19. Zhu Y., Wu Q., Xiao N. Research on highway traffic flow prediction model and decision-making method. *Sci Rep*. 2022. 12. 19919. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24469-y>

References

1. Vojtov, V.A., Kravtsov, A.H., Karnaukh, M.V., Horyayinov, O.M., Kozenok, A.S. & Babych, I.A. (2023). Otsinka erhomichnoyi stiykosti transportnoho potoku na dil'nytsyakh dorozhn'oyi merezhi. Identyfikatsiya matematychnoyi modeli. [Assessment of ergonomic sustainability of traffic flow at road network sections. Identification of a mathematical model], *Tsentral'noukrayins'kyi naukovyy visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical Sciences, Vol. 7(38)*, 236-245. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.236-245](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.236-245) [in Ukrainian].
2. Kravtsov A.H., Larina T.F., Horyayinov O.M., Kozenok A.S., Horodets'ka T.E., Babych I.A. (2023) Obhruntuvannya kryteriyu stiykosti transportnoho potoku na dil'nytsyakh dorozhn'oyi merezhi. [Justification of the traffic flow stability criterion at the sections of the road network], *Tsentral'noukrayins'kyi naukovyy visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical Sciences, Vol. 7(38)*, 222-239 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.222-230](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.222-230) [in Ukrainian].
3. Dorokhin, S., Artemov, A., Likhachev, D., Novikov, A., & Starkov, E. (2020, September). Traffic simulation: an analytical review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 918, No. 1*, p. 012058). IOP Publishing. DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012058
4. Nagatani, T. (2023). Macroscopic traffic flow in multiple-loop networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 609, 128324. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.128324>
5. Herty, M., & Kolbe, N. (2022). Data-Driven Models for Traffic Flow at Junctions. *arXiv preprint arXiv:2212.08912*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.08912>
6. Karafyllis, I., Theodosis, D., & Papageorgiou, M. (2022). Stability analysis of nonlinear inviscid microscopic and macroscopic traffic flow models of bidirectional cruise-controlled vehicles. *IMA Journal of Mathematical Control and Information*, 39(2), 609-642. <https://doi.org/10.1093/imamci/dnac003>
7. Li, L., Ji, X., Gan, J., Qu, X., & Ran, B. (2021). A macroscopic model of heterogeneous traffic flow based on the safety potential field theory. *IEEE Access*, 9, 7460-7470. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3049393>
8. Imran, W., Khan, Z. H., Gulliver, T. A., Khattak, K. S., & Nasir, H. (2020). A macroscopic traffic model for heterogeneous flow. *Chinese Journal of Physics*, 63, 419-435. <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2019.12.005>
9. Yuan, C., Li, Y., Huang, H., Wang, S., Sun, Z., & Li, Y. (2022). Using traffic flow characteristics to predict real-time conflict risk: A novel method for trajectory data analysis. *Analytic methods in accident research*, 35, 100217. <https://doi.org/10.1016/j.amar.2022.100217>
10. Das, A., & Ahmed, M.M. (2022). Adjustment of key lane change parameters to develop microsimulation models for representative assessment of safety and operational impacts of adverse weather using SHRP2 naturalistic driving data. *Journal of safety research*, 81, 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.01.002>
11. Lazar H. (2019). Comparison of microscopic car following models. In *2019 International Conference on Systems of Collaboration Big Data, Internet of Things & Security (SysCoBioTS) (pp. 1-6)*. IEEE. DOI:10.1109/SysCoBioTS48768.2019.9028040
12. Feng, T., Liu, K., & Liang, C. (2023). An Improved Cellular Automata Traffic Flow Model Considering Driving Styles. *Sustainability*, 15(2), 952. <https://doi.org/10.3390/su15020952>

13. Kušić, K., Schumann, R., & Ivanjko, E. (2023). A digital twin in transportation: Real-time synergy of traffic data streams and simulation for virtualizing motorway dynamics. *Advanced Engineering Informatics*, 55, 101858. <https://doi.org/10.3390/su15032050>
14. Shang, X. C., Liu, F., Li, X. G., Janssens, D., & Wets, G. (2023). The Impact of Three Specific Collaborative Merging Strategies on Traffic Flow. *Journal of Advanced Transportation*, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/1375867>
15. Wen, J., Hong, L., Dai, M., Xiao, X., & Wu, C. (2023). A stochastic model for stop-and-go phenomenon in traffic oscillation: On the prospective of macro and micro traffic flow. *Applied Mathematics and Computation*, 440, 127637. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2022.127637>
16. Mittal, U., Chawla, P., & Tiwari, R. (2023). EnsembleNet: A hybrid approach for vehicle detection and estimation of traffic density based on faster R-CNN and YOLO models. *Neural Computing and Applications*, 35(6), 4755-4774. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07940-9>
17. Djenouri, Y., Belhadi, A., Srivastava, G., & Lin, J. C. W. (2023). Hybrid graph convolution neural network and branch-and-bound optimization for traffic flow forecasting. *Future Generation Computer Systems*, 139, 100-108. <https://doi.org/10.1016/j.future.2022.09.018>
18. Xu, X., Jin, X., Xiao, D., Ma, C., & Wong, S. C. (2023). A hybrid autoregressive fractionally integrated moving average and nonlinear autoregressive neural network model for short-term traffic flow prediction. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 27(1), 1-18. <https://doi.org/10.1080/15472450.2021.1977639>
19. Zhu, Y., Wu, Q. & Xiao, N. (2022). Research on highway traffic flow prediction model and decision-making method. *Sci Rep* 12, 19919. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24469-y>

Oleksiy Goryayinov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anna Kozenok**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Nataliia Berezhna**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Igor Sysenko**, PhD tech. sci., **Inna Babych**, Senior Lecturer, **Oleksiy Voytov**, Graduate student

State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

Study of the Mathematical Model of the Stability of the Traffic Flow in the Sections of the Road Network of the City

The paper presents the results of the research of the mathematical model of the stability of the traffic flow on the sections of the city's street and road network when external factors change. Based on the modeling results, it is proposed to divide all factors affecting the stability of the traffic flow into three groups. The first group of factors characterizes the construction of the vehicle: the length of the vehicle, the weight of the vehicle, the power of the engine. The second group of factors is called time factors, which take into account: the driver's reaction time to a change in the road situation; time for a maneuver that can be used by the car in case of a change in the road situation; the total time of delays while driving along the route. The third group of factors takes into account the peculiarities of the construction of the infrastructure of the road environment. Such factors include: the number of traffic lanes on the roadway; the number of pedestrian crossings and traffic lights.

Based on the results of modeling, a rating of factors affecting the amount of traffic flow stability margin is presented. The simulation results proved that, in the first place, the impact on the loss of stability of the traffic flow is the time for the maneuver that the car can use in the event of a change in the road situation and the number of pedestrian crossings and traffic lights on the controlled section of the road. When the listed factors change, the robustness criterion has minimal values. In second place in terms of influence on is a group of factors that take into account the driver's reaction time to a change in the road situation and the number of traffic lanes on the roadway. In third place is a group of factors that take into account the length of the car and the weight of the car.

It is proved that the mathematical model of traffic flow stability has limitations regarding its application. The limitations are related to the definition of the initial data for the simulation. It is necessary to determine the flow density on the controlled section of the road network. In addition, statistically determined values are the reaction time of drivers to a change in the road situation and the presence of pedestrian crossings and traffic lights on the controlled section of the road.

traffic flow, modeling, dynamic model, density gradient, speed gradient, amplification factor, time constant, stability criterion, traffic flow robustness criterion

Одержано (Received) 02.09.2023

Прорецензовано (Reviewed) 14.09.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

Dmytro Levkin, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Natalija Berezhna**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anna Kozenok**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Inna Babych**, Senior Lecturer
State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine
e-mail: dimalevkin23@gmail.com

Mathematical modeling of the process of containerized cargo handling at terminals

The article proposes a mathematical model of terminal cargo handling based on a probabilistic approach that takes into account the arrival of cargo at the terminal. The supplier-terminal-destination systems are systems with distributed parameters, which means that the optimization of the time spent by goods at the terminal and the quality of their material condition is ensured by the methods of vector parameter optimization. The authors reduce the dimensionality of the technical parameters of the transport system, after which they optimize the discretized parameters of the system. Using the results of the research in this article to optimize transportation and terminal cargo handling will increase the productivity of transportation and minimize economic losses due to cargo damage.

transport systems, economic efficiency, mathematical modeling, probabilistic approach, parameter optimization

Formulation of the problem. In a highly competitive transportation services market, improving the technology for accelerated processing of containerized cargo at terminals can be an important element of competitiveness. High-quality, fast and efficient cargo handling at the terminal can provide certain benefits to cargo owners; reduce overall logistics costs; contribute to increased profitability by increasing customer satisfaction and, consequently, attracting new customers; reduce inventory and increase productivity. Efficient terminal cargo handling will have a significant impact on the quality of supply chains. The speed of cargo processing affects inventory levels, delivery, and customer waiting times. If terminal cargo processing takes longer, which usually happens when productivity is low, it leads to delays in the supply chain, increased inventory, and under-fulfillment of orders. Poor quality (not on time, not in full) order fulfillment leads to increased customer dissatisfaction and a deterioration in the business's reputation.

It should also be noted that quickly and efficiently processed cargo at the terminal significantly helps cargo owners improve their cash flow and gain an advantage over their competitors. Reducing the time that cargo spends at the terminal allows cargo owners to reduce costs and increase profitability. The speed of processing will reduce the risk of deterioration of goods resulting from delays in cargo handling and/or storage.

Analysis of the latest research. Article [1] proposes a technology for using the RFID system to optimize the time spent on container handling and reduce the impact of the human factor. This will speed up cargo operations at the container terminal. Article [2] investigates some aspects of solving the problem of increasing the speed of cargo delivery in distribution systems. Based on the calculations performed in the article, the authors of [2] determined the optimal strategy for the delivery of goods in international traffic. In order to minimize the total cost of urban transportation, the authors of [3] improved the technology of freight forwarding services for shippers. Publications [4, 5] investigate some theoretical aspects of optimizing the route network of road transport logistics to improve the efficiency of sales activities of enterprises.

The authors of [6] proposed mathematical models (computational and applied optimization) and computational methods for finding optimal parameters in solving applied problems of geometric design of technical systems. The authors focused on the study of certain aspects of improving the quality of technical processes by increasing the accuracy of the construction and implementation of boundary value problems in optimizing the main parameters of the modeled systems. Publications [7, 8] present the basic methods for calculating and optimizing systems with distributed parameters, and propose numerical methods for implementing applied optimization models to improve the quality of functioning of certain technical systems containing thermal load sources. We note the results of publications [9, 10], where the conditions for the correctness of boundary value problems for many technical systems are defined and comprehensively substantiated.

The purpose of the work is to develop a mathematical model of the process of thermal processing of containerized cargo at the terminal to optimize the time and quality of the material condition of cargo during the operation of transport flows.

Presenting main material. The terminal cargo handling system consists of material and information flows:

$$\begin{cases} m_1 \rightarrow m_2 \rightarrow \dots \rightarrow m_i \rightarrow \dots \rightarrow m_n; \\ d_1 \rightarrow d_2 \rightarrow \dots \rightarrow d_i \rightarrow \dots \rightarrow d_e, \end{cases} \quad (1)$$

where $m_i \rightarrow$ – element of the material flow chain in the terminal, $i = 1, \dots, n$;

$d_i \rightarrow$ – the volume of the document;

\rightarrow – transition from one element of the chain to another.

The operation of the chain elements according to the material flow and the flow of necessary information, respectively:

$$M(t) = m_1 \xrightarrow{t_1} m_2 \xrightarrow{t_2} \dots \xrightarrow{t_n} m_n \quad (2)$$

and

$$D(t) = d_1 \xrightarrow{t_1} d_2 \xrightarrow{t_2} \dots \xrightarrow{t_e} d_e. \quad (3)$$

Cargo batch volumes M and documentation of information D are equal:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n m_i = M; \\ \sum_{j=1}^k d_j = D. \end{cases} \quad (4)$$

In general, you can use the functionality to record the status of the logistics terminal:

$$C = c\{F_{ij}; a_{ij}(t); b_{ij}(t); c_{ij}(t)\}, \quad (5)$$

where F_{ij} – i -and the phase j -of functional purpose;

$a_{ij}(t)$ – incoming material flow i -phases j -of functional purpose;

$b_{ij}(t)$ – outgoing material flow i -phases j -of functional purpose;

C_{ij} – state i -phases j -of functional purpose.

The following relationships were used to account for the transition from one phase of the supply chain to another:

the application is in service mode

$$c(t_{i=1}) = I[a(t_{i=1}), c(t_i)] \quad (6)$$

one application is in the maintenance phase, and the other has left this phase

$$c(t_{i=1}) = K[a(t_{i=1}), c(t_i), b(t_{i=1})] \quad (7)$$

one application left the service terminal, and the other was not received:

$$c(t_{i=1}) = E[c(t_i), b(t_{i=1})]. \quad (8)$$

An expression for accounting for the load on the phases of the logistics chain of a transportation system:

$$\begin{cases} m_i^C = (t, m_1, m_2, \dots, m_n); \\ d_j^C = (t, d_1, d_2, \dots, d_k), \end{cases} \quad (9)$$

where m_1, m_2, \dots, m_n – material flow;

d_1, d_2, \dots, d_k – the flow of information.

To improve the efficiency of the transport terminal, it is necessary to rationalize the technical and economic parameters of the modeled process. This is achieved by minimizing the deviation between the maximum permissible, based on the technical characteristics of the mechanisms or expert assessment of the capabilities of terminals and vehicles, and the calculated parameters of the transport system. Fast and efficient cargo handling at the terminal can bring significant income to cargo owners and transport service market players, reduce logistics costs, and help attract new customers [11–14].

Conclusions. Having analyzed the state of the transport services market in Ukraine, the article proposes the necessary conditions for building and implementing applied tasks of optimizing time costs during the thermal processing of containerized cargo at service terminals in order to improve the quality of traffic flows. Taking into account the fact that the terminal consists of several interconnected phases through which the cargo passes, the authors have developed a mathematical model of the terminal's functioning during the processing of cargoes of goods. It is based on specialized methods of vector optimization, which will allow choosing more rational modes of terminal operation among the existing ones. The results of the above studies should be used to solve the main optimization problem of improving the quality of transport services for cargo owners, taking into account the restrictions on the technical and economic parameters of the modeled process in order to increase the economic income of cargo owners and transport services market participants.

List of references

1. Лаврухін О. В., Куліш О. Ю. Удосконалення технології переробки контейнерів за допомогою систем RFID. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2022. №. 23. С. 25-25.
2. Нагорний Є. В., Орда О. О., Кондратенко Д. А. Вибір оптимальної транспортно-технологічної схеми доставки вантажів у міжнародному сполученні. *Автомобільний транспорт : зб. наук. пр. М-во освіти і науки України; ХНАДУ; редкол.: А. В. Гнатов (гол. ред.) та ін. Харків, 2020. Вип. 47. С. 44-50. <https://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/handle/123456789/3704>*
3. Markevych A., Shramenko N., Moroz M. Development of technology of urban forwarding service of small consignment customers. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2021. №. 58 (1). Pp. 54–58. Сучасний стан та перспективи розвитку авіатранспортної логістики. *Бізнес, інновації, менеджмент: проблеми та перспективи*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка». 2020. С. 223-224.
4. Tkachenko A., Sevastyanov R. The role of sales logistics in the management of commercial channel and physical distributions of finished goods. *Herald of Khmelnytskyi National University*. Khmelnytskyi, 2021. Issue. 1. Vol. 1. S. 188–191. DOI 10.31891/2307-5740-2021-290-1-33.
5. Голюк В., Стародуб І. Сучасний стан та перспективи розвитку авіатранспортної логістики. *Бізнес, інновації, менеджмент: проблеми та перспективи*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка». 2020. С. 223-224.
6. Stoyan Y.G., Romanova T.E., Pankratov O.V., Stetsyuk P.I., Stoian Y.E. Sparse balanced layout of spherical voids in three-dimensional domains. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2021. Vol. 57. Pp. 542–551.
7. Muzylyov D., Shramenko N., Shramenko V. Integrated business-criterion to choose a rational supply chain for perishable agricultural goods at automobile transportations. *International Journal of Business Performance Management*. 2020. T. 21. №. 1-2. С. 166-183.
8. Asrorov F., Sobchuk V., Kurylko O. Finding of bounded solutions to linear impulsive systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 6. No. 4 (102): Mathematics and Cybernetics - applied aspects. Pp. 14–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178635>
9. Naumov, V., Taran, I., Litvinova, Y., & Bauer, M. Optimizing Resources of Multimodal Transport Terminal for Material Flow Service. *Sustainability*. MDPI. 2020. Vol. 12(16), pages 1-13, August.
10. Mamtiyev K., Aliyeva T., Rzayeva U. Analysis of one class of optimal control problems for distributed-parameter systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 5. No. 4 (113): Mathematics and Cybernetics applied aspects. Pp. 26–33. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.241232>.
11. Levkin D., Makarov O., Levkin A. Blending logistics and delivery of wood to the consumer. *Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ» with Proceedings of the International Scientific and Practical Conference: «Theoretical and empirical scientific research: concept and trends»*. Vol. 2. Oxford, United Kingdom, 2020. Pp. 8–9.
12. Larina T.F., Kravcov, A.G., Berezhnaja N.G., Kutiya O. V., Fenenko K.A. Implementation of logistic approaches in forming the agricultural export strategy in Ukraine. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*. 2019. Vol. 4. Issue. 1. Pp. 17–24. doi:10.14254/jsdtl.2019.4-1.2.
13. Самойленко А.С. Удосконалення технології прискореної переробки тарно-штучних вантажів на терміналах в умовах ринку транспортних послуг: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня к-та. техн. наук: 05.22.01. Харків, 2009. 22 с.
14. Vojtov V., Berezhnaja N., Kravcov A., Volkova T. Evaluation of the Reliability of Transport Service of Logistics Chains. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. 2018. № 7(4(3)). Pp 270–274.

References

1. Lavrukhin, O.V. & Kulish, O.Iu. (2022). Udoskonalennia tekhnologii pererobky konteineriv za dopomogoiu system RFID []. *Transportni systemy ta tekhnologii perevezenn* – , No. 23. 25–28. <https://doi.org/10.15802/tstt2022/261647> [in Ukrainian].
2. Nagornyi, Ye.V., Orda, O.O. & Kondratenko, D.A. (2020). Vybir optymalnoi transportno-tekhnologichnoi skhemy dostavky vantazhiv u mizhnarodnomu spoluchenni []. *Avtomobilnyi transport* – , Issue 47, 44–50 [in Ukrainian].

3. Markevych, A., Shramenko, N. & Moroz, M. (2021). Development of technology of urban forwarding service of small consignment customers. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. №. 58 (1). Pp. 54–58 [in English].
4. Goliuk, V., Starodub, I. (2020). Suchasnyy stan ta perspektyvy rozvytku aviatransportnoy logistyky [The current state and prospects for the development of air transport logistics]. Business, innovation, management: problems and prospects : *I Mizhnarodna nakovo-praktychna konferentsiia (23.04.2020)*. Kyiv: KPI im. Igoria Sikorskogo, 223–224 [in Ukrainian].
5. Tkachenko, A. & Sevastyanov, R. (2021). The role of sales logistics in the management of commercial channel and physical distributions of finished goods. *Herald of Khmelnytskyi National University. Khmelnytskyi, Issue. 1. Vol. 1*, 188–191. DOI 10.31891/2307-5740-2021-290-1-33 [in English].
6. Stoyan, Y.G., Romanova, T.E., Pankratov, O.V., Stetsyuk, P.I. & Stoian, Y.E. (2021). Sparse balanced layout of spherical voids in three-dimensional domains. *Cybernetics and Systems Analysis*. Vol. 57. Pp. 542–551 [in English].
7. Muzylyov, D., Shramenko, N. & Shramenko, V. (2020). Integrated business-criterion to choose a rational supply chain for perishable agricultural goods at automobile transportations. *International Journal of Business Performance Management*, Vol. 21. №. 1-2, 166-183 [in English].
8. Asrorov, F., Sobchuk, V. & Kurylko, O. (2019). Finding of bounded solutions to linear impulsive systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 6. No. 4 (102): Mathematics and Cybernetics - applied aspects. Pp. 14–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178635> [in English].
9. Naumov, V., Taran, I., Litvinova, Y., & Bauer, M. (2020). Optimizing Resources of Multimodal Transport Terminal for Material Flow Service. Sustainability. MDPI. August 2020. vol. 12(16), pp. 1-13 [in English].
10. Mamtiyev, K., Aliyeva, T. & Rzayeva, U. (2021). Analysis of one class of optimal control problems for distributed-parameter systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 5. No. 4 (113): Mathematics and Cybernetics applied aspects. Pp. 26–33. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.241232> [in English].
11. Levkin, D., Makarov, O. & Levkin, A. (2020). Blending logistics and delivery of wood to the consumer. *Collection of scientific papers «ΑΟΓΟΣ» with Proceedings of the International Scientific and Practical Conference: «Theoretical and empirical scientific research: concept and trends»*. Vol. 2. Oxford, United Kingdom, Pp. 8–9 [in English].
12. Larina, T.F., Kravcov, A.G., Berezhnaja, N.G., Kutiya, O. V. & Fenenko, K.A. (2019). Implementation of logistic approaches in forming the agricultural export strategy in Ukraine. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*. Vol. 4. Issue. 1. Pp. 17–24. doi:10.14254/jsdtl.2019.4-1.2 [in English].
13. Samoilenko, A.S. (2009). Udoskonalennia tekhnologii pryskorenoi pererobky tarno-shtuchnykh vantazhiv na terminalakh v umovakh rynku transportnykh poslug. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kh: KhNADU [in Ukrainian].
14. Vojtov, V., Berezhnaja, N., Kravcov, A. & Volkova, T. (2018). Evaluation of the Reliability of Transport Service of Logistics Chains. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. № 7(4(3)). Pp. 270–274 [in English].

Д.А. Левкін, доц., канд. техн. наук, Н.Г. Бережна, доц., канд. техн. наук, А.С. Козенок, доц., канд. техн. наук, І.А. Бабич, ст. викл.

Державний біотехнологічний університет, Харків, Україна

Математичне моделювання процесу переробки тарно-штучних вантажів на терміналах

Проблема скорочення часу перебування вантажу на терміналі та загального часу прибуття вантажу до пункту призначення є найбільш актуальною в умовах можливих виробничих ризиків національної економіки. Оптимізація технічних і економічних параметрів транспортних систем дозволить підвищити економічну ефективність для підприємців і вантажовласників. Вантажні термінали мають значення перевалочних вузлів, місць зосередження зусиль різних сервісів, де накопичуються, трансформуються та розподіляються вантажі на шляху руху товарів, а також індикаторів, які відображають обсяги перевезень, що виконуються різними видами транспорту. Тобто транспортні термінали різної потужності та спеціалізації - це не лише пункти накопичення дрібних відправлень, а також і великі вантажорозподільчі центри постачання, а, отже, і найважливіші ланки логістичної системи на багатьох підприємствах.

В основі запропонованої в статті математичної моделі термінальної переробки вантажів лежить ймовірнісний підхід, що використовується для обліку надходження вантажів товару на термінал. Системи «постачальник-термінал-пункт призначення» належать до систем з розподіленими параметрами,

а це означає, що оптимізації часу перебування товарів на терміналі та якості їх матеріального стану забезпечена методами векторної оптимізації параметрів. Автори здійснюють редукцію розмірності технічних параметрів транспортної системи, після чого виконана оптимізація дискретизованих параметрів системи.

Використання результатів досліджень цієї статті для оптимізації транспортних перевезень та термінальної переробки вантажів підвищить продуктивність транспортних перевезень і мінімізує економічні втрати через пошкодження вантажів. Це дозволить вантажовласникам отримати додаткові доходи та підвищить конкурентноспроможність товарів на ринку транспортних послуг.

транспортні системи, економічна ефективність, математичне моделювання, ймовірнісний підхід, оптимізація параметрів

Одержано (Received) 02.09.2023

Прорецензовано (Reviewed) 24.09.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

УДК 656.025.2

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.201-212](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.201-212)

С.М. Пашкевич, ст.викл., **В.М. Никончук**, доц., д-р екон. наук, **М.Є. Кристопчук**, доц., канд. техн. наук

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна

Оцінка пропускної спроможності міської дорожньої мережі з урахуванням пропозиції паркування

Щоб покращити оцінку пропускної спроможності мережі для певної міської дорожньої системи, передбачається, що в моделі оцінки пропускної здатності мережі слід враховувати вплив стратегій управління паркуванням у місцях призначення. У цьому дослідженні представлена розширена модель пропускної спроможності дорожньої мережі, яка враховує як кількість паркувальних місць, так і тарифи на паркування в кожній зоні руху. Модель пропускної здатності мережі сформульована як дворівнева проблема програмування з максимізацією загальної генерації поїздок на верхньому рівні та проблемою комбінованого розподілу поїздок і призначення трафіку (STDTA) на нижньому рівні. Щоб обґрунтовано охарактеризувати вплив ціноутворення на паркування та затримки паркування через ефект заторів, у моделі STDTA бере участь два класи попиту на подорожі. Надано ефективний і практичний алгоритм розв'язку дворівневої моделі потужності мережі. Чисельні експерименти показують переваги запропонованої моделі, а також демонструють вплив пропозиції та ціноутворення паркувальних місць на результати оцінки пропускної здатності дорожньої мережі.

пропускна здатність, транспортна мережа, парковка, показники міської маршрутної системи

Постановка проблеми. Швидке зростання попиту на пересування автомобілем у містах призводить до збільшення заторів і дефіциту паркувальних місць. Отже, правильно оцінити пропускну здатність міської дорожньої мережі довгий час було важливою метою транспортного проекту планування та оцінювання інфраструктури. У літературі для дослідження проблеми пропускної спроможності більшість дослідницьких мереж вимірюють лише враховуючи обмеження пропускної спроможності міського транспорту [1, 2]. Однак, деякі дослідження вказують на використання в аналізі дорожньої мережі залучення стратегій управління паркуванням [3, 4], яке матиме значення для належної координації ресурсів паркування та попиту на автомобільні перевезення на рівні дорожньої мережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Концепція пропускної спроможності мережі визначається як максимальний попит на пересування, який може бути

розподілений на транспортну мережу без порушення пропускної спроможності будь-якого окремого компоненту (наприклад, зв'язок і перетин) [5]. Пропускна здатність мережі була визнана важливим показником для оцінки ефективності загальномережевої системи міського транспорту. Ця концепція широко використовується в багатьох сферах, таких як аналіз надійності пропускної здатності [6], проблема проектування мережі [7], аналіз гнучкості пропускної здатності [8] і аналіз вразливості пропускної здатності [9]. Максимальна пропускна спроможність оцінювалась шляхом поступового розподілу загального попиту на перевезення пасажирів і вантажів, в якому кожна ділянка завантажується рівноважним розподілом руху [11].

Концепція резервної пропускної спроможності запропонована в [1] і розширена в дослідженні мережі з сигнальним управлінням [12-14]. Оскільки модель резервної пропускної спроможності передбачає незмінний розподіл попиту на РП, що не є практичним для мереж у регіонах, що розвиваються, в оцінці пропускної спроможності мережі було використано змінний попит на РП [2, 5, 15]. З іншого боку, оскільки розподіл загального попиту на пасажирські перевезення (порівняно з попитом на автомобільні перевезення) є відносно стабільним, мультимодальний вибір був розширений на основі концепції резервної пропускної спроможності [16, 17], в якій загальний попит з фіксованим розподілом розбивається на кілька змінних таблиць попиту на перевезення, які окремо пов'язані з різними видами перевезень. Крім того, в інших дослідженнях вивчався вплив проникнення на ринок вдосконаленої системи формування пасажирів (ATIS) на пропускну спроможність дорожньої мережі [18]. Лише обмежена кількість досліджень стосується впливу пропозиції парковок або цін на паркування на пропускну здатність транспортної мережі [3, 4, 19].

При оцінці пропускної здатності міської дорожньої мережі, обмеження паркування є подвійними: (1) пропозиція паркування, яка визначає як верхню межу попиту на паркування, так і час паркування через рівень заторів у кожному пункті призначення поїздки; (2) ціноутворення за паркування, яке визначає плату за паркування в кожній зоні призначення. Зауважимо, що верхню межу попиту на паркування можна розглядати як місткість паркування, яка обмежує зростання попиту на пересування автомобілями, що є такою ж, як і роль пропускної здатності мережі. Передбачається, що час паркування та плата в місцях призначення впливатимуть на вибір пересувань деякими подорожуючих, що призводить до перерозподілу мережі попиту на пересування (O-D) по всій мережі. Згідно з існуючими зарубіжними дослідженнями [19] і [4] розглядають лише вплив місткості паркування на пропускну спроможність всієї мережі, і, таким чином, зміни в структурі попиту на послуги O-D не розглядалися. Незважаючи на те, що [3] враховували як пропускну спроможність парковок, так і вартість паркування в пунктах призначення, було зроблено припущення, що весь розподіл поїздок O-D залежить лише від вартості проїзду (зокрема, від показників доступності) між парою O-D, тобто рівень перевантаженості пунктів призначення не розглядався. Тим не менш, час паркування через рівень завантаженості пункту призначення досліджувався в контексті проблем вибору паркування [20-23]. Час паркування (пошуку) часто визначається як збільшена функція від попиту на паркування, поділена на пропускну спроможність паркінгу в зоні призначення. [24]

Таким чином, існуючі дослідження пропускної здатності дорожньої мережі з урахуванням пропозиції паркування та цін на паркування мають наступні недоліки: (1) лише деякі фактори були залучені до оцінки пропускної здатності мережі, тому вплив стратегій управління міським паркуванням не може бути оцінений всебічно [19]; (2) недостатньо повно характеризують вплив заторів у пунктах призначення на всю мережу структури попиту на поїздки [3], що може призвести до непрактичної

структури попиту на поїздки для максимальної пропускної спроможності мережі; (3) не враховує різницю між автотуристами і, таким чином, призводить до недооцінки [4] або переоцінки [24] загальної пропускної здатності мережі.

Результати дослідження. У даному дослідженні було охарактеризовано пропозицію паркувальних місць, так і ціноутворення на паркування що було включено до комбінованої моделі розподілу поїздок і розподілу транспортних потоків (STDTA) [25], яка включає два класи попиту на автомобільні пересування, тобто попит на вільні автомобільні пересування та змінний попит. Під фіксованим попитом ми розуміємо водіїв, які приїжджають на роботу, і мають стабільну схему руху під впливом вартості паркування в місці призначення, а під змінним попитом - водіїв, які не приїжджають на роботу, і мають змінну схему руху в залежності від рівня заторів як на дорогах, так і в районах призначення.

Для полегшення представлення основних ідей у даному дослідженні зроблено наступні припущення:

(а) Задіяні два класи попиту на подорожі з боку автомобільних пересувань, тобто постійний попит і змінний попит. Фіксований попит пов'язаний із щоденним попитом на подорожі, які мають заздалегідь визначені пункти відправлення та призначення, наприклад, рух на роботу й назад. Структура (кількість поїздок і просторовий розподіл) фіксованого попиту буде стабільною незалежно від зміни перешкод для пересування або вартості проїзду від пункту відправлення до пункту призначення. Навпаки, пункти призначення змінного попиту є взаємозамінними з точки зору завантаженості та вартості перевезень, а отже, такий вид попиту (наприклад, шопінг та відпочинок) демонструє гнучку структуру попиту.

(б) Пасажири з фіксованим попитом можуть змінювати лише маршрути для мінімізації індивідуальних витрат на поїздки, що характеризується принципом рівноваги користувача. Пасажири зі змінним попитом можуть змінювати як маршрути, так і пункти призначення для мінімізації загальних витрат на поїздки, що характеризується комбінованою моделлю розподілу поїздок і розподілу трафіку.

(с) Попит на паркування є відношенням загального попиту на місце призначення в зоні призначення, і він обмежений простором паркувальних засобів.

(д) Пасажири мають достатню мережеву інформацію, щоб вибирати маршрути подорожей у спосіб рівноваги користувача.

(е) Через статичну природу моделі транспортний потік вважається в стаціонарному стані, а період дослідження вважається одна година, наприклад, ранковий пік.

Оскільки як рівень, так і розподіл змінного попиту змінюються залежно від транспортної ситуації в транспортній мережі, корисність між пунктами відправлення та призначення буде використана для отримання схеми потоку змінного попиту.

$$P(j|i) = \frac{\exp\{-\theta(\tau_{ij} + M_j)\}}{\sum_{n \in J} \exp\{-\theta(\tau_{in} + M_n)\}}, \quad \forall i \in I, \quad (1)$$

де θ – дисперсійний параметр, який відображає траєкторію руху

У рівнянні (1) мінімальна вартість проїзду τ_{ij} визначається структурою транспортного потоку по всій мережі в контексті заторів. Яка отримана за допомогою рівноважної комбінованої моделі розподілу поїздок і розподілу транспортних потоків.

Пропозиція паркомісць та ціноутворення на паркування. Нехай q_j – загальна кількість місць на парковці $j \in J$ в умовах рівноваги, а k_j – пропускна спроможність

парковки j . Кількість місць на парковці q_j визначається множенням загального попиту на проїзд, D_j , на ділянці j на тариф за паркування ρ_j , тобто,

$$q_j = \rho_j \cdot D_j, \quad \forall j \in J. \quad (2)$$

Крім того, час пошуку парковки становить опукла функція заповнюваності паркінгу q_j та пропускної здатності паркінгу k_j [26]. Таким чином, функція часу пошуку парковки $S_j(q_j)$ становить:

$$S_j(q_j) = \frac{\mu_j S_j}{1 - q_j / k_j}, \quad \forall j \in J, \quad (3)$$

де s_j – середній час пошуку в зоні призначення j при низькій заповнюваності паркінгу, який називається часом пошуку при низькій заповнюваності. μ_j – константа, що показує, як водії ставляться до інформації про заповнюваність паркінгу.

Погодинна вартість паркування на ділянці $5j$ позначається π_j . Таким чином, водії, які обирають ділянку j як місце призначення, платитимуть π_j доларів за годину. Таким чином, узагальнені витрати в пункті призначення, M_j , для мандрівників, які обирають район j як пункт призначення, задаються формулою

$$M_j = \pi_j + \eta \cdot S_j(q_j), \quad (4)$$

де η - цінність часу для пасажирів. З точки зору обмеження пропозиції парковок, заповнюваність парковок не повинна перевищувати місткість парковок в зоні i .

Для відображення поведінки пасажирів буде використана модель комбінованого розподілу поїздок і призначення руху (CTDTA) [25]. Зокрема, в дорожній мережі розглядається як фіксований попит, так і змінний попит. Пасажири з фіксованим попитом можуть вільно обирати свої маршрути, в той час як пасажирів зі змінним попитом можуть вільно обирати як маршрути, так і пункти призначення. Обидва типи подорожуючих прагнуть мінімізувати власні транспортні витрати на всю поїздку, враховуючи пропозицію паркування та ціни на паркування в пунктах призначення:

$$\min Z_L(q, f, h) = \sum_{a \in A} \int_0^{v_a} t_a(x) dx + \frac{1}{\theta} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_{ij} (\ln q_{ij} - 1) + \sum_{j \in J} q_j \pi_j + \eta \sum_{j \in J} \int_0^{q_j} S_j(y) dy, \quad (5)$$

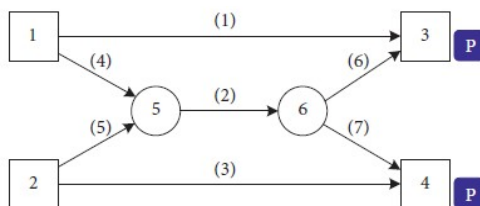


Рисунок 1 – Приклад мережі

Джерело: [25]

Як показано на (рис1) існує 4 О-Д пари від початкових вузлів 1 і 2 до вузлів призначення 3 і 4. Функція доріг загального користування використовується як функція продуктивності зв'язку, задана як $t_a(v_a) = t_a^0 [1 + 0.15(v_a / C_a)^4]$. Характеристики всіх зв'язків у мережі наведено в таблиці 1. У таблиці 2 наведено фіксований попит у мережі. Параметри, пов'язані зі стратегіями паркування в пунктах призначення,

перераховані в таблиці 3. Крім того, значення часу η встановлено на 1,0, а параметр дисперсії θ для вибору пункту призначення встановлено на 0,5.

Таблиця 1:

Характеристики з'єднання для прикладу мережі рис 1.

Показник	1	2	3	4	5	6	7
t_a^0	10	5	12	4	4	5	4
C_a	100	120	80	80	50	50	50

Таблиця 2:

Фіксований попит на подорожі в мережі

3	4	O_i		
1	30	20	50	
2	40	20	60	
\bar{D}_i	70	40	Загальний попит 110	

Параметри стратегії паркування в пунктах

Обговорення результатів досліджень. Щоб побачити переваги запропонованої моделі, результат запропонованої моделі порівнюється з іншими моделями пропускної здатності мережі в літературі [3, 4, 19, 24]. Експерименти проводяться на прикладі рис 1. Оскільки моделі в літературі на цю тему були проведені для різних задач за різних передумов, недоцільно порівнювати результати цих моделей напряму. Тому було розглянуто три ситуації з літератури: (1) без змінного попиту на O-D (тобто модель резервних потужностей у цій роботі); (2) без змінних витрат на призначення; (3) без фіксованого попиту на O-D.

Для ситуації без змінного попиту O-D модель резервної потужності мережі [1] модифікується шляхом додавання обмеження пропозиції паркування. Передбачається, що потоки O-D зростають після фіксованого розподілу O-D, і вплив заторів на дорогах і тарифів на паркування в місцях призначення не враховується. Резервна пропускна здатність є найбільш класичною концепцією O-D, яка широко застосовувалася для оцінки пропускної спроможності транспортної мережі. Така концепція була використана в [19] і [4]. Результати моделі резервних потужностей і запропонованої моделі наведені в таблицях 4 і 5 відповідно.

З результатів у таблицях 4 і 5 пропускна здатність мережі повинна складати 137,5 за моделлю резервної потужності, тоді як за запропонованою моделлю вона оцінюється як 222,35. В обох моделях потоки на ланках 5 і 6 досягають пропускної здатності, а ланки є вузькими місцями, що обмежують зростання загального попиту на пересування в мережі. Крім того, в результатах моделі резервної ємності жоден паркінг не насичений; проте в результатах запропонованої моделі місткість паркування в пункті призначення 3 використовується повністю. Очевидно, що пропускна спроможність мережі за моделлю резервної пропускної спроможності є нижчою за пропускну спроможність мережі за запропонованою моделлю. Це означає, що резервна пропускна спроможність має тенденцію давати занадто консервативні результати [8], оскільки вона підсумовує незмінну структуру попиту на перевезення. Чистий попит на перевезення в масштабах всієї мережі буде обмежений у своєму зростанні, якщо потік на будь-якій окремій ланці буде відповідати її пропускній спроможності. Таким чином, частина пасажирів може змінювати місце призначення відповідно до вартості паркування та наявності вільних місць у місці призначення. У цьому прикладі обмеження на загальний попит походять від пропускної спроможності на лініях 5 і 6, місткості парковок у пункті призначення 3, а також від вартості проїзду з O-D (м'яке обмеження).

Таблиця 4: Результати моделі пропускної спроможності резервної мережі.

O-D	Типи попиту		Попит в пункті призначення			Посилання Пункт призначення	Потік	
	посилань	Співвідношення V/C Загальна привабливість поїздки	Попит на паркування		Потік			
			Фіксований попит	Додатковий попит				
1-3	30	7.50	3	87.50	65.6	1	37.50	0.375
1-4	20	5.00	4	50.00	37.5	2	75.00	0.625
2-3	40	10.00				3	25.00	0.312
2-4	20	5.00				4	25.00	0.312
Всього	110	27.50				5	50.00	1.000
						6	50.00	1.000
						7	25.00	0.500
Пропускна здатність мережі				137.50 (мультиплікатор попиту)		1.25		

Таблиця 5: Результати запропонованої моделі пропускної здатності дорожньої мережі.

O-D	Дьом на типи		Пункт призначення	Попит на Загальна привабливість поїздки	Попит на паркування	Посилання	Потік	Співвідношення V/C
	Фіксований попит	Додатковий попит						
1-3	30	53.33	3	133.33	100.0	1	83.33	0.833
1-4	20	6.91	4	65.13	48.85	2	26.91	0.336
2-3	40	10.00				3	38.21	0.478
2-4	20	18.21				4	50.00	1.000
Пропускна здатність мережі					198.46	5	76.01	0.611

На рис. 2 порівняно моделі максимального попиту для різних моделей пропускної спроможності мережі ("Резервна пропускна спроможність", "Без вартості призначення" та "Без фіксованого попиту"). Графік максимального попиту з моделі "Резервна потужність" є досить консервативним, оскільки він чітко відповідає фіксованому попиту на ВРП, що існує в мережі.

Дана модель дає помірний результат для оцінки пропускної спроможності мережі. Порівняно з моделлю "Резервна пропускна здатність", потенціал пропускної здатності мережі буде розвиватися між O-D (1-3) та O-D (2-4) після того, як ланки 5 та 6 досягнуть своєї пропускної здатності. Загальний попит продовжуватиме зростати доти, доки не буде досягнута пропускна спроможність паркувального майданчика в пункті призначення 3. Крім того, зауважте, що попит між O-D (1-4) не дуже зростає.

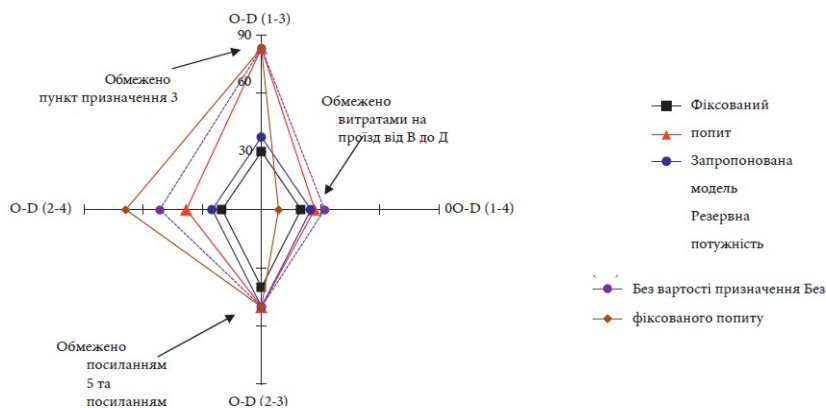


Рисунок 2 – Структура попиту O-D при максимальному потоці за різними моделями пропускної здатності мережі

Джерело: розроблено авторами

Оскільки вартість проїзду між O-D (1-4) значно вища, ніж між O-D (1-3), більшість змінного попиту на проїзд з пункту відправлення 1 хотіли б обрати вузол 3 як пункт призначення для діяльності, що не пов'язана з поїздками на роботу. Оскільки попит між O-D (1-3) не може зростати (обмежений місткістю парковок), попит на O-D (1-4) також не зростатиме. Таке обмеження спричинене різницею у вартості проїзду

між парами O-D, яка називається м'яким обмеженням, як згадувалося раніше. Отже, запропонована модель може охопити більш комплексну ситуацію порівняно з моделями, описаними в літературі, і, таким чином, здатна краще оцінити проблему пропускної спроможності дорожньої мережі.

На основі запропонованої моделі пропускної здатності мережі, поєднаної зі стратегіями паркування, було проаналізовано вплив пропозиції паркомісць та цін на паркування на пропуску здатність мережі. Для цього приведено 6 прикладів, перелічених у Таблиці 6-8.

Таблиця 6

Приклади	Опис прикладів
0	Базовий сценарій
1	Розширення паркомісць лише в пункті призначення 3
2	Збільшити кількість місць для паркування лише в пункті призначення 4
3	Збільшити кількість місць для паркування в обох пунктах призначення
4	Підвищення вартості паркування лише в одному пункті призначення
5	Підвищити вартість паркування в обох пунктах призначення в однаковій пропорції
6	Підвищити вартість паркування в обох пунктах призначення в однаковій пропорції

Таблиця 7

Результати пропускної здатності мережі при різній місткості парковок.

Напрямок	Місткість паркінгу (k_3, k_4)							
	Базовий приклад: (100, 80)		Приклад 1: (1000, 80)		Приклад 2: (1000, 80)		Приклад 3: (1000, 80)	
	Попит на паркування	Загальна привабливість поїздки	Попит на паркування	Загальна привабливість поїздки	Попит на паркування	Загальна привабливість поїздки	Попит на паркування	Загальна привабливість поїздки
3	100.00	133.33	112.50	150.00	100.00	133.33	112.50	150.00
4	48.85	65.13	53.90	71.87	48.85	65.13	53.90	71.87
Пропускна здатність мережі	198.46		221.87		198.46		221.87	
Потужностей на ланці 5 та ланці 6**								
*Прив'язка обмеження	Кількість місць для паркування в пункті призначення 3		Пропускна спроможність на ланці 1		Кількість місць для паркування в пункті призначення 3		Пропускна спроможність на ланці 1	

*Обмеження максимальної пропускної здатності мережі. **Обмеження пропускної здатності для ланки 5 та ланки 6 активні в усіх прикладах

Таблиця 8

Результати пропускної здатності мережі за різних стратегій ціноутворення на паркування.

Напрямок	Ціни на паркування (λ_3, λ_4)							
	Базовий приклад: (4.0, 5.0)		Приклад 4: < (8.0, 5.0)		Приклад 5: (8.0, 10.0)		Приклад 6: (8.0, 9.0)	
	Попит на паркування	Вартість паркування	Попит на паркування	Вартість паркування	Попит на паркування	Вартість паркування	Попит на паркування	Вартість паркування
3	100.00	8.00	100.00	12.00	100.00	12.00	100.00	12.00
4	48.85	9.12	80.00	11.00	42.98	13.87	48.85	13.12
Пропускна здатність мережі	198.46		240.00		190.65		198.46	

У Прикладі 1 збільшується лише кількість паркомісць у пункті призначення 3 (зі 100 до 1000). У порівнянні з базовим прикладом, загальна пропускна здатність мережі збільшується з 198,46 до 221,87. Одне із зв'язуючих (або активних) обмежень змінюється з пункту призначення 3 на пункт 1. Це означає, що загальна пропускна спроможність у базовому прикладі обмежена пропускною спроможністю парковок у пункті призначення 3. Розширення паркувальних місць у таких пунктах призначення може ефективно підвищити пропуску здатність всієї мережі.

У Прикладі 2 збільшується лише кількість місць для паркування в пункті призначення 4 (з 80 до 1000). Однак, загальна пропускна здатність мережі не збільшується (на практиці це може виглядати як неочевидні зміни). Це пов'язано з тим, що пропозиція паркомісць на кінцевих пунктах все ще залишається активною. Розширення потужностей на інших напрямках матиме незначний вплив на загальну пропуску здатність мережі.

У Прикладі 3 кількість місць для паркування в пунктах призначення 4 та 5 збільшується до 1000. Це призводить дотакій ж загальної пропускної спроможності мережі, як і за Прикладом 1. Це означає, що якщо необхідно збільшити пропуску спроможність мережі, то це має стосуватися лише тих напрямків, обмеження пропускної спроможності яких пов'язані з максимальним загальним попитом. Інвестиції в необов'язкову пропозицію паркомісць матимуть незначний внесок у загальну пропуску спроможність мережі. Немає необхідності надмірно розширювати паркувальні потужності. З іншого боку, ігнорування місткості парковок може призвести до переоцінки пропускної здатності транспортної мережі.

У Прикладі 4 підвищено вартість паркування лише в пункті призначення 3 (з 4,0 до 8,0). Однак загальна пропуску здатність мережі значно збільшується (до 240,0). Обидва пункти призначення є насиченими, тому загальний попит на поїздки більше не може зростати. Зокрема, вартість паркування (складається з вартості паркування та часу пошуку місця для паркування) для пунктів призначення 3 та 4 змінюється з 8.00 до 9.12, до 12.00 та 11.00, відповідно. Це призводить до зростання частки пасажирів, які обирають пункт призначення 4. Отже, попит на пункт призначення 4 може продовжувати зростати, доки не буде досягнута пропуску спроможність паркінгу.

У Прикладі 5 підвищено вартість паркування до 200% для обох напрямків. Загальна пропуску здатність мережі зменшується несуттєво. Зміна ціни на паркування призводить до перерозподілу структури попиту на послуги паркування. Відповідно до вартості паркування, велика частка пасажирів (тільки для змінного попиту) схильна обирати пункт призначення 3. Отже, попит на пункт призначення 4 не досягне такого рівня, як у базовому прикладі, через модель м'якого обмеження на O-D (1-4) та O-D (2-4).

У Прикладі 6 збільшено ціни на паркування на ту ж саму величину (на 4,0). Згідно з нашою моделлю, пропуску спроможність мережі пропуску здатність якої залишається незмінною, незважаючи на те, що вартість паркування сильно змінюється. На практиці можна вважати, що така зміна вартості паркування має незначний вплив на пропуску спроможність всієї мережі.

Таким чином, коригування стратегії ціноутворення на паркування для обраних місць призначення матиме очевидний вплив на пропуску спроможність транспортної системи. Однак підвищення цін на паркування у всіх пунктах призначення разом може призвести до невеликого ефекту для підвищення пропускної спроможності мережі.

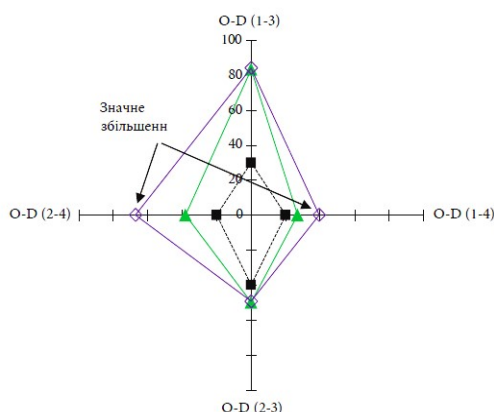


Рисунок 3 – Структура попиту на O-D для максимального стоку за Прикладом 4 та Прикладом 6
Джерело: розроблено авторами

На Рис.3 показано максимальну структуру попиту на послуги O-D для Прикладу 4 та Прикладу 6. Попит на перевезення значно зростає на O-D (1-4) та O-D (2-4). Це вказує на те, що мережа за Прикладом 4 є більш завантаженою, а отже, має кращий ефект на пропускну спроможність мережі, ніж за Прикладом 6.

Висновки. У цьому дослідженні запропоновано розширену модель пропускну здатності дорожньої мережі на основі моделі пропускну здатності транспортної мережі в [2]. У розширеній моделі з дворівневим програмним формулюванням, обмеження та вплив пропозиції паркування та ціни на паркування в кожній зоні руху (що відповідає пункту призначення) залучені для покращення оцінки пропускну спроможності дорожньої мережі для отримання більш обґрунтованого результату. Ціна паркування інтегрована в цільову функцію моделі нижнього рівня. Для ефективного розв'язання моделі пропускну спроможності запропоновано алгоритм розв'язання на основі аналізу чутливості (SAB), в якому модель STDТА нижнього рівня розв'язується за допомогою алгоритму розв'язання на основі шляхів. На чисельних прикладах показано, що запропонована модель пропускну здатності мережі здатна врахувати вплив стратегій паркування на структуру попиту на проїзд в напрямку O-D, що покращує обґрунтованість результату оцінки пропускну здатності мережі. Крім того, впровадження різних коригувань цін на паркування у місцях призначення буде більш ефективним, якщо підвищення цін на паркування у всіх пунктах призначення до єдиного стандарту. Також цікавим буде пошук оптимальних схем управління паркуванням для розширення пропускну здатності заданої транспортної мережі до максимального рівня.

Список літератури

1. Wong S.C., Yang, H. Резервна пропускна здатність дорожньої мережі, керованої сигналами", *Транспортні дослідження, частина В: Methodological*. 1997. vol. 31, no. 5. С. 397-402.
2. Yang H., Bell M.G.H., Meng Q., Моделювання пропускну здатності та рівня обслуговування міських транспортних мереж. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2000. Vol. 34, no. 4. Pp. 255-275,
3. Tam M. L. & Lam W. H. K. Максимальне володіння автомобілем при обмеженнях пропускну здатності доріг і паркувальних місць. *Транспортні дослідження, частина А: політика і практика*. 2000. Т. 34, no. 3. С. 145-170,
4. Й. Ленг, Ян К. Розрахункова модель пропускну здатності дорожньої мережі при обмеженні місткості парковок. 2007. Vol. 35, no. 2. Pp. 204-207,
5. Ван Й., Ду М., Лу Л. & Хе Х. Максимізація пропускну здатності мережі при стохастичній рівновазі користувачів з еластичним попитом. *Маєрежі та просторова економіка*. 2018. Vol. 18, no. 1. С. 115-143.
6. Chen A., Yang H., Lo H. K., Tang W. H. Надійність пропускну здатності дорожньої мережі: методологія оцінки та чисельні результати. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2002. Vol. 36, no. 3. Pp. 225-252.
7. Sumalee A., Luathep P., Lam W. H. K., Connors R.D. Оцінка та проектування пропускну здатності транспортної мережі в умовах невизначеності попиту. *Transportation Research Record*. 2009. vol. 2090. Pp. 93-101.
8. Чен А., Касікітвіват П. Моделювання гнучкості пропускну здатності транспортних мереж", *Транспортні дослідження, частина А: Політика і практика*. 2011. Т. 45, № 2. С. 105-117,
9. Du M., Jiang X., Cheng L. Альтернативна міра розгалуженості мережі з використанням загальносистемної транспортної потужності для визначення критичних ланок у дорожніх мережах. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 9, no. 4. Pp. 1-12.
10. Асакура І. Максимальна пропускна здатність дорожньої мережі, обмежена умовами рівноваги користувачів", в матеріалах 24-ї щорічної конференції UTSG, Університет Ньюкасла Уорн Тупе, Ньюкасл-на- Тайні, Великобританія, 1992.
11. Акамацу Т., Міявакі О. Проблема максимальної пропускну спроможності мережі при задачі транспортної рівноваги. *Infrastructure Planning Review*. 1995. Vol. 12. Pp. 719-729.

12. Ceylan H., Bell M.G.H. Резервна пропускна здатність дорожньої мережі при оптимізованому управлінні світлофорами з фіксованим часом. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2004. vol. 8, no. 2. С. 87-99.
13. Чіу С. Резервна пропускна здатність сигнально-керованої дорожньої мережі. *Прикладна математика та обчислення*. 2007. Vol. 190, no. 2. С. 1602-1611.
14. Ван Й., Денг В., Жао Д. Резерв пропускної здатності дорожньої мережі зі стохастичною рівновагою користувачів. *Транспорт*. 2015. Vol. 30, № 1. С. 103-116.
15. Gao Z.Y., Song Y.F. Модель резервної потужності оптимального управління сигналом з вибором маршруту, що забезпечує рівновагу користувача. *Дослідження транспорту, частина В-Методологічні*. 2002. Vol. 36, no. 4. С. 313-323.
16. Cheng L., Du M., Jiang X., Rakha H. Моделювання та оцінка пропускної здатності міської транспортної мережі з швидким транзитом. *Транспорт*. 2014. Vol. 29, no. 2. Рр. 165- 174.
17. Сюй Х., Чен А., Джансуван С., Ян К., Рю С. Надмірність транспортної мережі: додаткові заходи та обчислювальні методи. *Транспортні дослідження, частина В: Methodological*. 2018. Vol. 114. Рр. 68-85.
18. Shan L., Huang Z., Luo R. Вплив проникнення ATIS на ринок на пропускну здатність дорожньої мережі. Матеріал VI міжнародної конференції з вимірювальної техніки 2014 року та Mechatronics Automation, Zhangjiajie, Китай, січень 2014 року.
19. Асакура І., Кашівадани М. Модель оцінки максимальної пропускної здатності дорожньої мережі з обмеженнями на паркування та її застосування. *Огляд інфраструктурного планування*. 1993. Т. 11. С. 129-136.
20. Гарсія Р., Марін А. Пропускна спроможність парковок та ціноутворення в поїздках на громадському транспорті: дизайн мережі безперервної рівноваги. *Annals of Operations Research*. 2002. Vol. 116, no. 1-4. С. 153-178.
21. Li Z.-C., Huang H.-J., Lam W. H. K., Wong S. C. А модель для оцінки транспортної політики в мультимодальних мережах з обмеженнями пропускної здатності доріг та парковок. *Журнал математичного моделювання та алгоритмів*. 2007. Vol. 6, no. 2. С. 239-257.
22. Лорен Ф., Буйна Х. Рівновага руху в мережевій моделі паркування і вибору маршруту з пошуковими схемами і крейсерськими потоками. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 2012. Vol. 54. Рр. 808-821.
23. Nourinejad M., Roorda M. J. Impact of hourly parking pricing on travel demand. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2017. Vol. 98. Рр. 28-45.
24. Xie H., Yu X., Yan K. Модель оцінки пропускної здатності системи міської дорожньої мережі. *China Journal of Highway and Transport*. 2012. Vol. 25, no. 3. С. 129- 134.
25. Оппенгейм Н. Рівноважний розподіл/призначення поїздок зі змінними витратами в пункті призначення. *Транспортні дослідження, частина В: Методологічні*. 1993. Т. 27, no. 3. С. 207-217.

References

1. Wong, S.C. & Yang, H. (1997). Reserve capacity of a signalcontrolled road network. *Transportation Research Part B:Methodological*, Vol. 31, no. 5, pp. 397–402 [in English].
2. Yang, H., Bell, M. G. H. & Meng, Q. (2000). Modeling the capacity and level of service of urban transportation networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 34, no. 4, Pp. 255–275 [in English].
3. Tam, M.L. & Lam, W.H.K. (2000). Maximum car ownership under constraints of road capacity and parking space. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 34, no. 3, Pp. 145–170 [in English].
4. Leng, J. & Yan, K. (2007). Calculating model of road network capacity under limit of parking establishment capacity. *Journal of Tongji University*. Vol. 35, no. 2. 204–207 [in Ukrainian].
5. J. Wang, M. Du, L. Lu, and X. He, 2018.“Maximizing network throughput under stochastic user equilibrium with elastic demand,” *Networks and Spatial Economics*, vol. 18, no. 1, pp. 115–143 [in Ukrainian].
6. A. Chen, H. Yang, H. K. Lo, and W. H. Tang, 2002.“Capacity reliability of a road network: an assessment methodology and numerical results,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 36, no. 3, pp. 225–252[in Ukrainian].
7. A. Sumalee, P. Luathep, W. H. K. Lam, and R. D. Connors,“ (2009). Transport network capacity evaluation and design under demand uncertainty,” *Transportation Research Record*, vol. 2090, pp. 93–101 [in Ukrainian].

8. Chen, A. & Kasikitwiwat, P. (2011). Modeling capacity flexibility of transportation networks. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 45, no. 2, 105–117 [in Ukrainian].
9. Du, M., Jiang, X. & Cheng, L. (2017). Alternative network robustness measure using system-wide transportation capacity for identifying critical links in road networks. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 9, no. 4, Pp. 1–12 [in Ukrainian].
10. Asakura, Y. (1992). Maximum capacity of road network constrained by user equilibrium conditions. In Proceedings of the 24th Annual Conference of the UTSG, University of Newcastle Upon Tyne, Newcastle Upon Tyne, UK [in Ukrainian].
11. Akamatsu, T. & Miyawaki, O. (1995). Maximum network capacity problem under the transportation equilibrium assignment. *Infrastructure Planning Review*, Vol. 12, Pp. 719–729 [in Ukrainian].
12. Ceylan, H. & Bell, M. G. H. (2004). Reserve capacity for a road network under optimized fixed time traffic signal control. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 8, no. 2, Pp. 87–99 [in Ukrainian].
13. Chiou, S.-W. (2007). Reserve capacity of signal-controlled road network. *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 190, no. 2, Pp. 1602–1611 [in Ukrainian].
14. Wang, J., WDeng, . & Zhao, J. (2015). Road network reserve capacity with stochastic user equilibrium. *Transport*, vol. 30, no. 1, pp. 103–116 [in Ukrainian].
15. Gao, Z.Y. & Song, Y.F. (2002). A reserve capacity model of optimal signal control with user-equilibrium route choice. *Transportation Research Part B-Methodological*, Vol. 36, no. 4, pp. 313–323 [in Ukrainian].
16. Cheng, L., Du, M., Jiang, X. & Rakha, H. (2014). Modeling and estimating the capacity of urban transportation network with rapid transit. *Transport*, Vol. 29, no. 2, pp. 165–174 [in Ukrainian].
17. Xu, X., Chen, A., Jansuwan, S., Yang, C. & Ryu, S. (2018). Transportation network redundancy: complementary measures and computational methods. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 114, Pp. 68–85 [in Ukrainian].
18. Shan, L. Huang, Z. & Luo, R. (2014). Impact of market penetration of ATIS on road network capacity. In Proceedings of the 2014 Sixth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Zhangjiajie, China, January [in Ukrainian].
19. Asakura, Y. & Kashiwadani, M. (1993). Estimation model of maximum road network capacity with parking constraints and its application. *Infrastructure Planning Review*, Vol. 11, pp. 129–136 [in Ukrainian].
20. Garc'ia, R. & Mar'in, A. (2002). Parking capacity and pricing in park'n ride trips: a continuous equilibrium network design problem. *Annals of Operations Research*, Vol. 116, no. 1–4, 153–178 [in Ukrainian].
21. Li, Z.-C., Huang, H.-J., Lam, W. H. K. & Wong, S. C. (2007). A model' dlia otsinky transportnoi polityky v mul'tymodal'nykh merezhakh z obmezheniamyi propusknoi zdatnosti dorih ta parkovok [A model for evaluation of transport policies in multimodal networks with road and parking capacity constraints]. *Zhurnal matematychnoho modelivannia ta alhorytmiv – Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, Vol. 6, no. 2, Pp. 239–257 [in Ukrainian].
22. Leurent, F. & Boujnah, H. (2012). Traffic equilibrium in a network model of parking and route choice, with search circuits and cruising flows. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 54, Pp. 808–821 [in Ukrainian].
23. Nourinejad, M. & Roorda, M.J. (2017). Impact of hourly parking pricing on travel demand. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Vol. 98. Pp. 28–45 [in English].
24. Xie, H., Yu, X. & Yan, K. (2012). Evaluation model of urban road network system capacity. *China Journal of Highway and Transport*, vol. 25, no. 3, pp. 129–134 [in Ukrainian].
25. Oppenheim, N. (1993). Rivnovazhnyj rozpodil/pryznachennia poizdok zi zminnymy vytratamy v punkti pryznachennia [Equilibrium trip distribution/assignment with variable destination costs]. *Transportni doslidzhennia, chastyna B: Metodolohichni – Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 27, no. 3. 207–217 [in Ukrainian].

Svitlana Pashkevych, Senior Lecturer, **Viktoria Nykonchuk**, Assoc. Prof., PhD econ. sci., **Mykhailo Krystopchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

National University of Water Management and Nature Management, Rivne, Ukraine

Assessment of the Capacity of the City Road Network Taking Into Account the Parking Offer

In order to improve the estimation of network capacity for a given urban road system, it is assumed that the impact of destination parking management strategies should be considered in the network capacity estimation model.

This study presents an extended road network capacity model that takes into account both the number of parking spaces and parking rates in each traffic zone. The network capacity model is formulated as a two-level programming problem with maximizing the total trip generation at the upper level and the combined trip distribution and traffic assignment (CTDTA) problem at the lower level. In order to reasonably characterize the impact of parking pricing and parking delays due to congestion, the CTDTA model involves two classes of travel demand. An efficient and practical algorithm for solving the two-level network capacity model is presented. Numerical experiments show the advantages of the proposed model and demonstrate the impact of parking supply and pricing on the results of road network capacity assessment.

Numerical examples show that the proposed network capacity model is able to take into account the impact of parking strategies on the structure of travel demand in the O-D direction, which improves the validity of the network capacity estimation result. In addition, the implementation of various parking price adjustments at destinations will be more effective if parking prices at all destinations are raised to a single standard.

capacity, transportation network, parking, indicators of the city's route system

Одержано (Received) 02.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 19.10.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

УДК 656.081:330.47

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.212-218](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.212-218)

І.О. Кузєв, ст. викл.

*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,
м. Кременчук, Україна*

e-mail: Igor-kuzev@ukr.net

К.Г. Ковцур, доц., канд. техн. наук

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

e-mail: kovtsyur@ukr.net

Інформаційні системи і комп'ютерні технології на транспорті

У статті у військовий час обґрунтовано велику необхідність застосування комп'ютерної інформаційної системи як потужного інструмента забезпечення сучасної конкурентоспроможності автотранспортного підприємства. Проаналізовано дослідження вітчизняних і зарубіжних фахівців з проблематики використання інформаційних систем. Досліджено, що інформаційні системи і технології дають можливість вести безперервний контроль та облік за станом і рухом товарно-матеріальних, фінансових, а також людських ресурсів на автопідприємстві, отримувати інформацію про результати діяльності автопідприємства в реальному часу, своєчасно здійснювати підготовку документів, планів і прогнозів робіт на основі достовірної та повної інформації.

інформаційні системи, інформаційні технології, інформація, автопідприємство, система, комп'ютер

Постановка проблеми. Інтенсивний трансформаційний процес економіки на транспорті, підвищення рівня конкуренції, високі ризики підприємницької діяльності вимагають швидкого та гнучкого реагування. Організації реагують на зміни зовнішнього ринкового середовища. За таких умов практики господарювання управління бізнесом має базуватися не лише на передових концепціях та інструментах управління, а саме головне, використання сучасних інформаційних систем як потужного засобу підтримки, а також організаційна конкурентоспроможність та ефективна діяльність.

Впровадження інформаційних технологій в управління бізнесом прискорює обробку інформації, зменшує кількість управлінського персоналу, забезпечує керівництво якісною інформацією, дає можливість своєчасно та якісно діагностувати

господарську діяльність та прискорює прийняття управлінських рішень. Своєчасна та якісна діагностика господарської діяльності та підвищення швидкості прийняття управлінських рішень на автопідприємстві. У зв'язку з нинішньою орієнтацією нашої країни на членство в ЄС та глобалізацію, ми повинні відповідати європейським нормам і стандартам.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вітчизняні та міжнародні дослідники зробили значний внесок у дослідження інформаційних систем та управління на основі технологій, такі як І. Вовчак, Ж. Жигалкевич, С. Крайчук, А. Немченко, А. Онопко, В. Глушков, В. Гужва, Т. Писаревська, В. Ситник, Г. Титоренко, С. Уваров, В. Уткін, Д. Уотермен та багато інших. Хоча існує багато наукових досліджень щодо використання інформаційних систем і комп'ютерних технологій на автопідприємствах, більшість з них стосуються технічних аспектів розробки та впровадження інформаційних систем і комп'ютерних технологій, в той час як дослідження щодо ролі, сутності інформаційних систем і технологій в системах управління підприємствами є фрагментарними. Дослідження природи та ролі інформаційних систем і технологій в системах управління автопідприємствами є фрагментарними.

Постановка завдання. Метою цієї статті є дослідження та узагальнення характеру ролі проблем інформаційних систем і технологій в системах управління автопідприємством.

Виклад основного матеріалу. Використання сучасних інформаційних систем і комп'ютерних технологій у сфері управління автопідприємством дозволяє швидше забезпечувати автопідприємства необхідною економічною комп'ютерною системною інформацією, раціоналізувати механізми її обробки та систематизації.

Для того, щоб Україна могла реалізувати свій потенціал та ефективно ним управляти, необхідно перейти до інноваційної моделі розвитку автопідприємств з використанням сучасних технологій виробництва. Для того, щоб Україна могла реалізувати свій потенціал та ефективно ним управляти, необхідно перейти до інноваційної моделі розвитку автопідприємств з використанням сучасних виробничих технологій. В Україні за останні роки автопідприємства зазнали значних трансформацій, зокрема в соціально-економічній системі, що призвело до суттєвих змін у визначенні пріоритетів розвитку. Особливо це стосується ІТ-сектору, який постійно розвивається, використовуючи новітні інформаційні технології та впроваджуючи нові інструменти для управління автопідприємством. На сьогодні у зв'язку з курсом держави на вступ до Європейського Союзу та світовою глобалізацією виникає потреба дотримуватись Європейських стандартів та норм. Більшість автопідприємств розуміють необхідність впровадження інноваційних технологій у стратегії, однак малому кому вдається запровадити цей напрямок і довести його до логічного завершення, звертаючи велику необхідну увагу на внутрішні процеси автопідприємства та їх оптимізацію.

Інформаційна система комп'ютерних технологій може бути визначена як набір взаємозалежних різних елементів, які обробляють, збирають та зберігають і розподіляють комп'ютерну інформацію з метою підтримки процесу прийняття деяких рішень, а також забезпечення механізму управління організацією в цілому. При вирішенні будь-яких питань чи завдань з використанням ЕОМ потрібна наявність ряду компонентів то для функціонування інформаційної системи і технології необхідні компоненти, але із значно складнішою організацією. Компонентами інформаційної комп'ютерної системи на автотранспорті є база даних, концептуальна схема й інформаційний процесор, які працюють разом та утворюють систему зберігання і маніпулювання даними.

Сьогодні існує загальна думка, що інформаційні системи-це системи, які реалізуються лише за допомогою комп'ютерної техніки. Однак, незважаючи на те, що сьогодні автопідприємства переважно використовують інформаційні технології, засновані на комп'ютерних рішеннях, інформаційні системи та комп'ютерних технологій можуть функціонувати як із застосуванням технічних засобів, так і без них. Загалом сучасну інформаційну систему автопідприємства слід розглядати як своєрідний програмний комплекс, який складається з окремих модулів, які охоплюють весь спектр діяльності автопідприємства і взаємодіють між собою в режимі реального часу. Інформаційні комп'ютерні системи автопідприємств повинні базуватися на ліцензійних програмних продуктах, що відповідають вимогам організації ефективного документообігу та обміну інформацією.

Для забезпечення ефективності діяльності сучасних автопідприємств необхідно використовувати інноваційні методи управління транспортом, які передбачають застосування сучасних методів та інструментів менеджменту. Великий ефективний розвиток різних комп'ютерних систем залежить від процесів, що відбуваються в інноваційній діяльності, пов'язаній зі сферами науки і техніки та кваліфікації.

Інформаційні комп'ютерні технології - це інструмент управління, що призначений для вирішення та поліпшення координації і контролю над ходом інформаційних процесів при досягненні поставлених цілей в сучасних умовах.

Управлінські інформаційні системи і технології призначені для вирішення завдань стратегічного і тактичного планування, управління бізнесом, обліку і контролю. Більшість облікових задач не потребує додаткових витрат на вторинну обробку оперативних та управлінських даних.

На рис. 1 показано зв'язки між складовими системи управління автопідприємством.



Рисунок 1 – Система управління процесами підприємства з врахуванням інформаційних систем і технологій

Джерело: розроблено автором

Інформаційні системи і технології часто зазнають великих змін упродовж усього періоду свого існування, а процес їхньої поведінки та еволюції цілком пов'язаний із розвитком інформаційних систем та комп'ютерних технологій і нових моделей корпоративного бізнесу. Адже із появою персональних комп'ютерів інформаційні комп'ютерні технології отримали новий імпульс для свого інформаційного розвитку, який дозволило налагодити завдяки швидкому та надійному зв'язку між елементами інформаційної комп'ютерної системи і можливо вже перейти на нові методи ведення управлінської діяльності. Аналіз розвитку інформаційних систем і комп'ютерних технологій показав, що постійне прагнення підприємців підвищити ефективність обробки комп'ютерної інформації та постійне прийняття управлінських рішень сприяло появі нових, сучасних та модернізованих програмних засобів. Будь-яка комп'ютерна інформаційна система та технологія повинна гармонійно вписуватися в організаційну структуру управління конкретного суб'єкта господарювання, а також складність її впровадження є пропорційною масштабу автопідприємства та рівню розвитку його виробничих і фінансових зв'язків. Інформаційні системи та комп'ютерні технології, які застосовуються на всіх автопідприємствах, повинні відповідати деяким критеріям мінімальної вартості обладнання і програмного забезпечення, максимальної простоти використання, безпеки та захисту даних, сумісності нової технології з уже наявним обладнанням і програмним забезпеченням.

До інформаційної комп'ютерної системи управління автотранспортом відносять:

- порівняння за заданими критеріями оперативних та архівних масивів даних за різні періоди часу з комп'ютерними інформаційними моделями станів, процесів і умов;
 - розрахунок та порівняння фактичних показників господарської діяльності з прогнозованими;
 - надання зведеної комп'ютерної інформації користувача в формі зручній для аналізу результатів функціонування автопідприємства;
 - збір та агрегація даних про об'єкт і процес в узгодженій, єдиній і зручній формі для використання в управлінському аналізі;
 - підтримка хронології та відповідної структури даних за тривалий період, надання зведеної інформації про бізнес-об'єктах та бізнес-процесах в детальному і агрегованому вигляді;
1. формування єдиної оперативної бази даних з високою частотою оновлення;
 2. деталізація і сортування даних за видами і групам, для подальшого їх подання в системі.

Сьогодні існує думка про комп'ютерну інформаційну систему як про систему, що реалізується лише за допомогою комп'ютерної та інформаційної техніки. Незважаючи на те, що на даний момент часу автопідприємства здебільшого використовують інформаційні комп'ютерні технології на базі комп'ютерних рішень, інформаційні комп'ютерні системи можуть функціонувати з застосуванням деяких технічних засобів, так і без них. Сучасну інформаційну комп'ютерну систему автопідприємства слід розглядати як певний готовий програмний комплекс, що складається з окремих незалежних модулів, які реалізують усі сфери діяльності автопідприємства і взаємодіють на сьогодні, що уможливило прийняття своєчасних та обґрунтованих рішень на різних рівнях управління підприємством. В основі інформаційної комп'ютерної системи автопідприємства повинен бути такий ліцензійний програмний продукт, який максимально відповідає усім вимогам щодо організації ефективного документообігу та інформаційного обміну.

Ефективне управління автопідприємством, залежить від практичного використання інформаційних технологій, які забезпечують його своєчасною,

об'єктивною і точною інформацією. Основними причинами, які зумовлюють необхідність використання, у теперішній час, сучасних інформаційних систем і технологій на автопідприємствах, є: погіршення економічних показників його діяльності; використання застарілих інформаційних технологій, що не задовольняють менеджмент автопідприємства; відсутність інформаційних технологій для обліку та аналізу.

Для ефективного управління автопідприємством інформаційні системи та технології мають забезпечити: повний та достовірний облік в інформаційних системах усіх аспектів виробничо-комерційної діяльності автопідприємства; мінімізацію інформаційного шуму, а також відбір оптимального обсягу інформації; раціоналізацію системи оціночних показників; якісний взаємозв'язок між потоками зовнішньої і внутрішньої інформації; дієвий процес прийняття рішень на всіх рівнях ієрархії управління.

Стан діяльності автопідприємства на пряму залежить від рівня використання ним інформаційних систем і технологій, основною метою яких є ефективне управління інформаційними потоками і ресурсами з метою підвищення рівня ефективності підприємницької діяльності. Проте, значна кількість українських автопідприємств ще до сьогодні використовують будь яку інформацію не системно, а невдале впровадження комп'ютерних інформаційних систем зазвичай пов'язують із недосконалістю технічних засобів. Застосування інноваційних комп'ютерних технологій має бути синхронізоване зі стратегічним плануванням і системою бюджетування автопідприємства на основі розробки ефективного механізму управління інформаційними процесами з урахуванням ресурсних можливостей і обмежень, що дозволить автопідприємству перейти на новий якісний рівень.

Висновки:

1. Розвиток комп'ютерної інформаційних систем і технологій та перехід на процесно-орієнтоване управління приведе активізацію внутрішніх можливостей автопідприємства, що у свою чергу дозволить розвивати потенціал співробітників автопідприємства, удосконалити інформаційні процеси, підвищити ефективність внутрішніх процесів на автопідприємстві і розвивати його інноваційну діяльність.

2. Процес становлення інформаційного суспільства, технологій призведе на стрімкий розвиток інформаційних систем і комп'ютерних технологій привів до того, що за останні роки суб'єкти господарювання почали з великою інтенсивністю застосовувати найрізноманітніші комп'ютерні інформаційні технологічні рішення у процесі своєї життєдіяльності.

3. Розробка та впровадження інноваційних інформаційних систем та технологій, які забезпечують автоматизацію управління інформаційних процесів сприятиме ефективному функціонуванню інформаційного простору автопідприємства, що є визначальним чинником розвитку сучасних автопідприємств.

4. Формування оптимальної стратегії розвитку автопідприємства в умовах конкурентного швидкозмінного ринкового середовища, підвищує рівень ефективності інформаційних та управлінських рішень за рахунок доступу керівників усіх рівнів до єдиної комп'ютерної інформаційної бази.

Список літератури

1. Георгіаді Н.Г. Інформаційні системи управління: сутність, види, функції, принципи побудови . *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2006. № 567 . С. 28–34.
2. Інформаційні системи і технології в економіці: Посібник для студентів ВНЗ ; за ред. Пономаренка В.С. К.: Видавничий центр «Академія», 2002. 544 с.
3. Юдкова К.В. Особливості визначення поняття «Інформаційна система» . *Інформація і право*. 2015.

- № 2(14). С. 39-44.
4. Яценко Р.М., Ніколаєв І.В. Інформаційні системи в логістиці : навчальний посібник . Харків : Вид-во ХНЕУ, 2012. 232 с.
 5. Чуприна М.О., Шеховцова І.А. Використання ІТ-інструментів для оптимізації управління бізнес-процесами підприємств України . *Економічний вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”*. 2016. № 13. С. 311-319.
 6. Ковцур К., Птиця Н., Кузев І. Упровадження мотиваційної політики діяльності департаментів логістики на підприємствах. *Розвиток транспорту. «Одеський національний морський університет»*. 2022. №4(15) . С. 53-63.
 7. Інформаційні системи в менеджменті: навч. посіб. / Батюк А.Є. та ін. К.: Інтелект Захід, 2004. 520 с.
 8. Тлумачний словник з інформатики / Г.Г.Півняк ін. Дніпропетровськ: Нац. гірн. ун-т, 2008. 599 с.
 9. Адамик Б.П. Литвин І.С., Ткачук В.О. Інформаційні технології у банківській сфері: навч.посіб. К. : Знання, 2008. 351 с.
 10. Золотарьова І.О., Бутова Р.К., Гаврилова А.А. Інформаційні системи та технології в банківській сфері : навчальний посібник . Х. : Вид. ХНЕУ, 2009. 332 с.
 11. Stair Ralph M., Reynolds George W. Principles of informations systems: a managerial approach . Seventh edition. USA : Thomson Course Technnology, 2006. 758 p.
 12. Система "Галактика Україна" . URL: <http://www.galaktika.ua> (дата звернення: 04.09.2023)
 13. US Mobile Banking: Beyond the Buzz. Report Published by Celent. URL: <http://celent.com/PressReleases/20070517/MobileBanking.htm>. (date of application: 07.09.2023)
 14. Кір'янов О.Ф., Загорянський В.Г., Кузев І.О. Інформаційні системи і технології: навч.посіб . Кременчук: КрНУ ім.М.Остроградського, 2021. 281 с.
 15. Biriukov N. Triska N. Time and synchronization in telecoms. Lecture Notes in Electrical Engineering, Volume 560: Advances in Information and Communication Technologies. Processing and Control in Information and Communication Systems. Springer, 2019. ISSN 1876-1100. ISBN 978-3-030-16770-7.
 16. ITU-T Recommendation G.701 (03/93) Vocabulary of digital transmission and multiplexing, and pulse code modulation (PCM) terms.

References

1. Heorhiadi, N.H. (2006). Informatsijni systemy upravlinnia: sutnist', vydy, funksi, pryntsyipy pobudovy [Information management systems: essence, types, functions, principles of construction]. *Visnyk Natsional'noho universytetu «Lviv's'ka politekhnika» – Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic", Vol. 567, 28–34 [in Ukrainian]*.
2. Ponomarenko, V.S. (2002). *Informatsijni systemy i tekhnologii v ekonomitsi [Information systems and technologies in the economy]*. Kyiv: Akademiia [in Ukrainian].
3. Yudkova, K.V. (2015) Osoblyvosti vyznachennia poniattia «Informatsijna systema» [Features of the definition of information system]. *Informatsiia i pravo – Information and law, Vol. 2, pp. 39–44[in Ukrainian]*.
4. Yatsenko, R.M. & Nikolaiev, I.V. (2012). *Informatsijni systemy v lohistytsi [Information systems in logistics]*. Kharkiv: Vydavnytstvo KhNEU [in Ukrainian].
5. Chuprina, M.O. (2016) Vykorystannia IT-instrumentiv dlia optymizatsii upravlinnia biznes-protsesamy pidpriemstv Ukrainy [Use of IT tools to optimize the management of business processes in Ukrainian enterprises], *Ekonomichnyj visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu Ukrainy “Kyiv's'kyj politekhnichnyj instytut” – Economic bulletin of national technical university of ukraine “Kyiv polytechnical institute”, Vol. 13, 324–329 [in Ukrainian]*.
6. Kovtsur, K.H., Ptytsia, N.V. & I.O. Kuziev (2022). Uprovadzhennia motyvatsijnoi polityky diial'nosti departamentiv lohistyky na pidpriemstvakh. [Implementation of the motivational policy of logistics departments at enterprises]. *Rozvytok transportu. Odes'kyj natsional'nyj mors'kyj universytet – Transport development. Odesa National Maritime University, 4(15,) 53–63 [in Ukrainian]*.
7. Batyuk, A.E., Dvulit, Z.P., Obelovska, K.M., Ogorodnyk, I.M. et al. (2004). *Informatsijni systemy v menedzhmenti [Information systems in management]* . Kyiv: Intelekt Zahid [in Ukrainian].
8. Pivnyak, H.G., Busygin, B.S., Divizinyuk, M.M. et al. (2008). *Tlumachnyj slovnyk z informatyky [Interpretive dictionary of informatics]*. Dnipropetrovsk: National. mountain University [in Ukrainian].
9. Adamyk, B.P. Lytvyn, I.S. & Tkachuk, V.O. (2008). *Informatsijni tekhnologii u bankiv's'kij sferi [Information technologies in the banking sphere]* Kyiv: Znannia [in Ukrainian].
10. Zolotaryova, I.O., Butova, R.K. & Gavrilova, A.A. (2009). *Informatsijni systemy ta tekhnologii v bankiv's'kij sferi [Information systems and technologies in the banking sphere]* . Kharkiv: Ed. HNEU [in

- Ukrainian].
11. Stair Ralph M., Reynolds George W. (2006). Principles of informations systems: a managerial approach / Ralph M. Stair, George W. Reynolds. Seventh edition. USA : Thomson Course Technnology [in English].
 12. System "Galaxy Ukraine" . *galaktika.ua* . Retrieved from <http://www.galaktika.ua>.
 13. US Mobile Banking: Beyond the Buzz. Report Published by Celent . *celent.com* . Retrieved from <http://celent.com/PressReleases/20070517/MobileBanking.htm>.
 14. Kiryanov, O. Zagoryanskyi, V., & Kuziev, I. (2021). *Informatsijni systemy i tekhnolohii [Information systems and technologies]*. Kremenчук: KrNU named after M. Ostrogradskyi [in Ukrainian].
 15. Biriukov, N. & Triska, N. (2019). Time and synchronization in telecoms. Lecture Notes in Electrical Engineering. Vol. 560: Advances in Information and Communication Technologies. Processing and Control in Information and Communication Systems. Springer, ISSN 1876-1100. ISBN 978-3-030-16770-7. [in English].
 16. ITU-T Recommendation G.701 (03/93) Vocabulary of digital transmission and multiplexing, and pulse code modulation (PCM) terms. [in English].

Ihor Kuziev, Senior Lecturer

Kremenчук Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenчук, Ukraine

Kateryna Kovtsur, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Kharkiv National Automobile and Road University, Kharkiv, Ukraine

Information Systems and Computer Technologies in Transport

The article substantiates the necessity of using the information system as a powerful tool for ensuring the modern competitiveness of the motor vehicle enterprise in wartime. The research of domestic and foreign specialists on the issues of using information systems was analyzed.

Modern computer information systems allow for continuous accounting and control of the state and movement of material, financial, and personnel resources at the auto enterprise, to receive quick information about the results of the auto enterprise in real time, to quickly prepare analytical documents, forecasts and works. Plans based on reliable and complete information about the company's activities, which is available at any time. Systematization of computer information, reduction of response time to all changes, optimization of the organizational structure of the auto enterprise, increase in the level of labor productivity, rationalization of the production structure, reduction of the volume of operational and management costs, increase in the level of effectiveness of management decisions due to the access of managers of all levels to a single computer information base. Computer information resources are one of the most important elements of the resource potential of the auto enterprise, which makes it possible to ensure the automation of all processes.

It was found that information systems and technologies provide an opportunity to conduct continuous control and accounting for the condition and movement of goods and material, financial, as well as human resources at the auto enterprise, to receive information about the results of the auto enterprise's activities, in the mode real time, quickly prepare analytical documents, forecasts and work plans based on reliable and complete information.

information systems, information technologies, information, auto business, system, computer

Одержано (Received) 02.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 11.10.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

О.Л. Ляшук, проф., д-р техн. наук, **М.Я. Сташків**, доц., канд. техн. наук, **О.П. Цьонь**, доц., канд. техн. наук, **Н.Я. Рожко**, проф., д-р екон. наук, **У.М. Плекан**, канд. екон. наук, **Б.Р. Гевко**, канд. екон. наук

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

Підвищення ефективності функціонування нерегульованого перехрестя з круговим рухом

Проведено аналіз і емпіричні дослідження умовних та безумовних параметрів моделі дорожнього руху на нерегульованому перехресті з круговим рухом міста Тернопіль. Перехрестя «Збараське кільце» у м. Тернопіль є нерегульованим перехрестям з круговою схемою руху і знаходиться на перетині проспекту Степана Бандери, вулиць 15 квітня, Т. Протасевича і Підволочиського шосе. Ця вулиця розв'язка має особливість у тому, що проспект Степана Бандери є магістральною вулицею загальноміського значення. Зокрема, вулиці 15 квітня, Т. Протасевича та Підволочиське шосе належать до дороги, що об'їжджає місто Тернопіль. На цих вулицях здійснюється транзитний рух великотоннажного транспорту, що спрямований на міста Дубно – Львів, Івано-Франківськ, Чернівці – Хмельницький. Розглянуто різні варіанти організації руху на даному перехресті з метою знаходження найбільш оптимальних рішень для підвищення безпеки та ефективності руху.

транспортний потік, нерегульоване перехрестя, смуги руху, імітаційні моделі, вулично-дорожня мережа

Постановка проблеми. Між розвитком населених пунктів та транспортними системами, які вважаються ключовими факторами прогресу міст, існує незаперечний зв'язок. Впровадження новітніх технологій сприяє постійному удосконаленню методів та організаційних аспектів організації дорожнього руху. Сучасні інновації у сфері транспорту допомагають вплинути на майбутню урбанізацію. Очевидно, що розробники планів розвитку міст будуть продовжувати впроваджувати інноваційні транспортні рішення, спрямовані на зменшення заторів, зниження забруднення навколишнього середовища та використання ефективніших способів організації транспортних та пішохідних потоків.

Досягнення більшої ефективності в організації дорожнього руху та покращення якості функціонування вулично-дорожньої мережі стають надзвичайно важливими завданнями на сучасних етапах управління міською дорожньою інфраструктурою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що для ефективного управління транспортними потоками та покращення функціонування вулично-дорожньої мережі в міських умовах необхідно розглядати транспортний потік як стохастичний процес у ймовірнісних моделях. Ці методи дозволяють використовувати доцільні підходи для оптимізації руху транспортних засобів та забезпечення оптимального функціонування транспортної мережі [1].

У моделюванні дорожнього руху існують два основних підходи: детерміністичний (динамічний) і ймовірнісний (стохастичний). Детерміністичні моделі базуються на функціональних залежностях між показниками. Вони описують як динаміку взаємодії між моделями, так і динаміку руху всього потоку в цілому. Для динамічного моделювання транспортних потоків використовують два класи моделей: макроскопічні і мікроскопічні [1, 2].

Макроскопічний підхід описує динаміку руху потоку в цілому, розглядаючи його як агреговану систему. Мікроскопічний підхід, у свою чергу, моделює динаміку взаємодії між окремими автомобілями.

Існує ряд математичних моделей [1, 2], за допомогою яких можна отримати різні параметри руху транспортних потоків. Однак, ці результати дозволяють вирішувати переважно локальні задачі, пов'язані з окремими ділянками вулично-дорожньої мережі.

У роботі [3] були представлені результати дослідження, що стосувалися координованого управління транспортними потоками в центральній частині міста, метою яких було зниження транспортних заторів на перехрестях. Для досягнення цілей дослідження використовувалось імітаційне моделювання, яке дозволило оцінити ефективність запропонованих технічних рішень та їх вплив на рух транспорту в центральній частині міста.

В роботі [4] було використано програмне забезпечення для моделювання дорожнього руху VISSIM та аналізу кільцевих перехресть на етапі проектування. Проводилися дослідження різних параметрів моделювання, таких як інтенсивність транспортного потоку та його швидкість, для отримання більш детального опису поведінки водіїв на кільцевих розв'язках.

У науковій праці [5] були висвітлені переваги використання імітаційного моделювання для дослідження роботи регульованих перехресть. Зазначено, що такий підхід дозволяє здійснити аналіз різних сценаріїв руху транспорту, використовуючи адаптивні алгоритми керування, основані на нечіткій логіці. Крім того, імітаційне моделювання дозволяє організувати рух транспорту по окремих напрямках, враховуючи потреби пішоходів та громадського транспорту.

Ця наукова праця демонструє, що застосування імітаційного моделювання з нечіткою логікою в адаптивних алгоритмах може бути корисним для вивчення ефективності та оптимізації регульованих перехресть та руху транспорту в міських умовах, де враховуються різноманітні потреби учасників дорожнього руху.

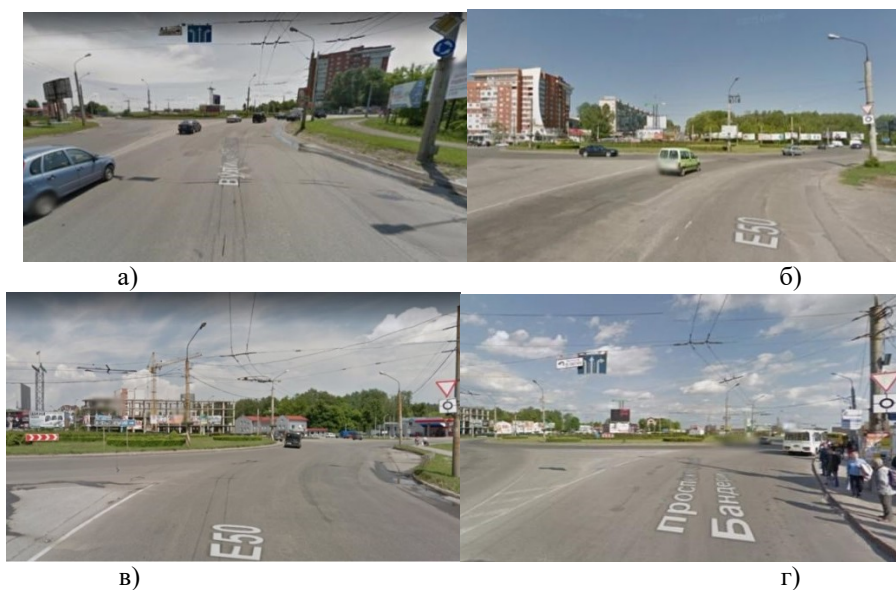
Метою досліджень, проведених у науковій роботі [6], було покращення безпеки дорожнього руху на перехресті вулиць міста. Для досягнення цієї мети здійснювався аналіз дорожніх умов і параметрів транспортних та пішохідних потоків. В результаті дослідження були розроблені імітаційні транспортні моделі для перехрестя в програмному середовищі PTV Vision VISSIM.

Ці дослідження мали на меті створення адекватних та реалістичних моделей руху на перехресті, що дозволяють оцінити вплив різних факторів на безпеку дорожнього руху. З використанням таких імітаційних моделей можна аналізувати різні варіанти організації руху, перевіряти ефективність регулюючих систем та розробляти відповідні заходи для забезпечення безпеки учасників дорожнього руху на перехресті.

Аналіз останніх досліджень та публікацій підтверджує доцільність використання сучасного програмного забезпечення для моделювання вулично-дорожньої мережі на основі розроблених та апробованих математичних моделей функціонування транспортних потоків.

Постановка завдання. Перехрестя «Збарзьке кільце» у м. Тернопіль є нерегульованим перехрестям з круговою схемою руху і знаходиться на перетині проспекту Степана Бандери, вулиць 15 квітня, Т. Протасевича і Підволочиського шосе.

Ця вулична розв'язка має особливість у тому, що проспект Степана Бандери є магістральною вулицею загальноміського значення з проїзною частиною шириною 18 метрів. Зокрема, вулиці 15 квітня, Т. Протасевича та Підволочиське шосе (що мають проїзну частину шириною 21 метр) належать до дороги, що обходить місто Тернопіль (рис. 1).



а - вул. 15 квітня (напрямок 1); б – Підволочиське шосе (напрямок 2);
в – вул. Т. Протасевича (напрямок 3); г – проспект С. Бандери (напрямок 4)

Рисунок 1 – Загальний вигляд вулиць перехрестя «Збарзьке кільце»

Джерело: Google Maps

Схема діючої організації дорожнього руху на перехресті «Збарзьке кільце» м. Тернопіль показано на рис. 2.

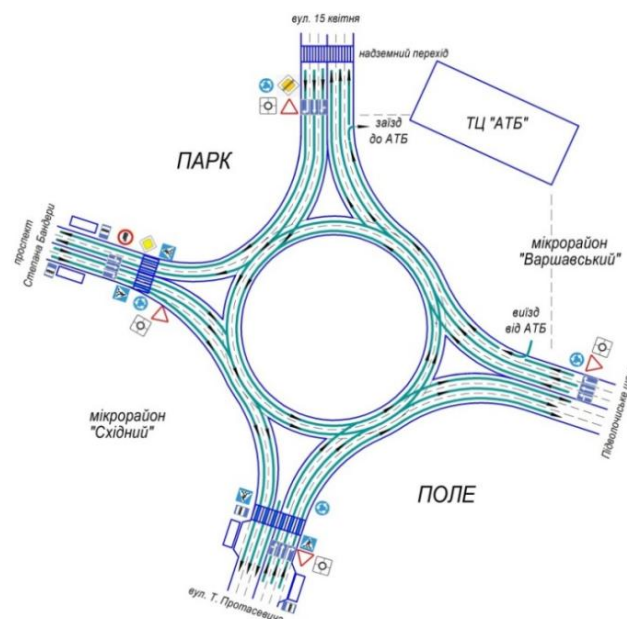


Рисунок 2 – Схема організації дорожнього руху на перехресті Збарзьке кільце

Джерело: власна розробка

Отже, для оцінки раціональності та оптимальності організації дорожнього руху (ОДР) на перехресті «Збарзьке кільце» необхідно провести аналіз і емпіричні дослідження. Ці дослідження повинні включати можливість багатопараметричного моделювання, а також встановлення умовних та безумовних параметрів моделі дорожнього руху.

Під час аналізу та емпіричних досліджень будуть розглядатися різні варіанти організації руху на даному перехресті з метою знаходження найбільш оптимальних рішень для підвищення безпеки та ефективності руху. Моделювання дорожнього руху з використанням багатопараметричних моделей дозволить враховувати різні варіанти дорожньої інфраструктури, обмежень та рухових параметрів, що забезпечить знаходження оптимальних рішень організації руху транспортних засобів.

Крім того, визначення умовних та безумовних параметрів моделі дорожнього руху є важливим для забезпечення реалістичності і адекватності моделювання. Це допоможе зробити аналіз більш точним та корисним для подальшого розроблення раціональних рішень з покращення організації дорожнього руху на перехресті «Збараське кільце».

Виклад основного матеріалу. Проведений аналіз існуючої організації дорожнього руху на перехресті з круговим рухом «Збараське кільце» виявив, що інтенсивний рух транспортних засобів та велика кількість великотоннажних вантажівок у складі транспортного потоку переважно обумовлені тим, що дане перехрестя є частиною дороги в обхід міста Тернопіль. Розвиток нових мікрорайонів міста призводить до постійного зростання інтенсивності транспортних та пішохідних потоків, що негативно впливає на ефективність та безпеку дорожнього руху.

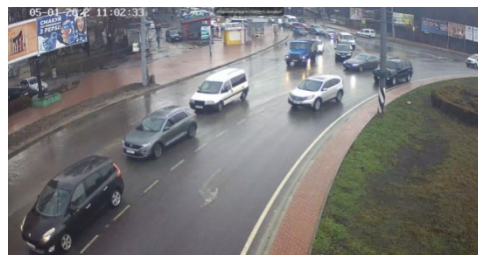
Однією з особливостей існуючої організації дорожнього руху на перехресті «Збараське кільце» є те, що водії, що рухаються по вулиці Підволочиське шосе та планують повернути наліво на кільцеву розв'язку, стикаються з проблемою, оскільки для з'їзду із розв'язки у напрямку вулиці Т. Протасевича передбачено лише одну смугу руху (див. рис. 2). В результаті, водії, як правило, порушують правила дорожнього руху та виконують з'їзд з кільця через трикутник безпеки (рис. 3, а).

Зазначені проблеми можуть призводити до потенційно небезпечних ситуацій та аварій на даному перехресті. Тому розробка нової організації дорожнього руху або внесення вдосконалень до існуючої системи можуть бути необхідними для покращення безпеки та ефективності руху на перехресті «Збараське кільце».

Такі дії водіїв обмежують рух інших учасників дорожнього руху та призводять до утворення заторів з боку проспекту Степана Бандери (рис. 3, б).



а)



б)

а – з'їзд з перехрестя на вулицю Т. Протасевича; б – затор при виїзді на перехрестя з проспекту Степана Бандери.

Рисунок 3 – Недолік організації дорожнього руху на перехресті «Збараське кільце»

Джерело: міська веб-камера

На швидкість руху транспортних засобів мають суттєвий вплив також пішохідні переходи на париметрі перехрестя. Зокрема, зупинки міського пасажирського транспорту з боку проспекту Степана Бандери не забезпечені розширенням проїзної частини у вигляді відкритої «кишені».

В нинішніх умовах, громадський транспорт значно уповільнює рух загального транспортного потоку через заплановані зупинки по маршруту. Також характерним є

те, що легкові транспортні засоби постійно здійснюють паркування у правій смузі проїжджої частини по вулиці Степана Бандери у напрямку руху до перехрестя «Збаразьке кільце». Хоча ці дії водіїв не порушують правил дорожнього руху, вони суттєво обмежують можливість під'їзду транспортних засобів до перехрестя та маневреність громадського транспорту поблизу їхньої зупинки.

Для покращення ефективності та безпеки дорожнього руху на нерегульованому перехресті «Збаразьке кільце» запропоновано такі рішення:

1. Заборонити стоянку транспортних засобів на ділянці проспекту Степана Бандери, що прилягає до перехрестя «Збаразьке кільце».

2. Облаштувати зупинки міського пасажирського транспорту з обох боків проспекту Степана Бандери за допомогою розширення проїзної частини у вигляді відкритої «кишені».

3. Передбачити додаткову смугу для з'їзду з кільця у напрямку вулиці Т. Протасевича.

Запропоновані організаційні рішення можуть суттєво покращити ефективність вулично-дорожньої мережі у південній та південно-східній частині міста Тернопіль, а також забезпечити зниження рівня ризику виникнення ДТП на дорогах та покращення екологічної ситуації в мікрорайонах «Сонячний», «Східний» та «Варшавський» шляхом зменшення шуму, вібрацій та забруднення повітря.

Для перевірки ефективності запропонованих заходів необхідно створити імітаційні моделі перехрестя «Збаразьке кільце» з існуючою та запропонованою схемою організації дорожнього руху. Ці імітаційні моделі мають враховувати різні типи транспорту, включаючи індивідуальний (легкові автомобілі з вантажопідйомністю до 3,5 тонн), транзитний (автобуси та великотоннажні вантажні автомобілі) та громадський транспорт (маршрутні таксі, тролейбуси та автобуси), а також мають враховувати зупинки громадського транспорту та нерегульовані пішохідні переходи.

Для моделювання організації дорожнього руху на перехресті «Збаразьке кільце» були розглянуті п'ять варіантів:

Варіант 1 - моделювання без врахування порушення Правил дорожнього руху (ПДР) водіями при з'їзді з кільця на вулицю Т. Протасевича.

Варіант 2 - моделювання з врахуванням порушення ПДР водіями при з'їзді з кільця на вулицю Т. Протасевича.

Варіант 3 - включає в себе варіант 2 та додаткову заборону паркування при під'їзді до перехрестя вздовж проспекту Степана Бандери.

Варіант 4 - включає в себе варіант 3 і, додатково, передбачає облаштування відкритої «кишені» для зупинок громадського транспорту на проспекті Степана Бандери.

Варіант 5 - це розширений варіант 4, який також передбачає облаштування додаткової смуги для з'їзду з перехрестя на вулицю Т. Протасевича.

Імітаційну модель розроблено у програмному забезпеченні PTV VISSIM. Моделювання дорожнього полотна із елементами руху транспортних та пішохідних потоків (стоянки, зупинки ГТ, пішохідні переходи) здійснюється функціями «Відрізки», «Автостоянки», «Зупинка ГТ» та «Пішохідні зони» з врахуванням вимог ДБН 360-92 [8] до розмірів дорожнього полотна.

Загальний вигляд побудованої моделі перехрестя з круговим рухом «Збаразьке кільце» зображено на рис. 4.



Рисунок 4 – Модель дорожнього полотна перехрестя «Збаразьке кільце»

Джерело: власна розробка

Для моделювання дорожнього руху на перехресті «Збаразьке кільце» використовуються функції «Вхідні потоки ТЗ» та «Маршрути ТЗ». Передбачена можливість коригування складу і напрямку вхідних потоків транспорту, а також інтенсивності транспортних потоків на основі даних, отриманих з відеофіксації руху ТЗ протягом доби.

Для задання маршрутів транспортних засобів використовується функція «Маршрути ТЗ». На прикладі розглядаються маршрути для чотирьох основних напрямків руху на перехресті «Збаразьке кільце», які показані на рисунку 5.

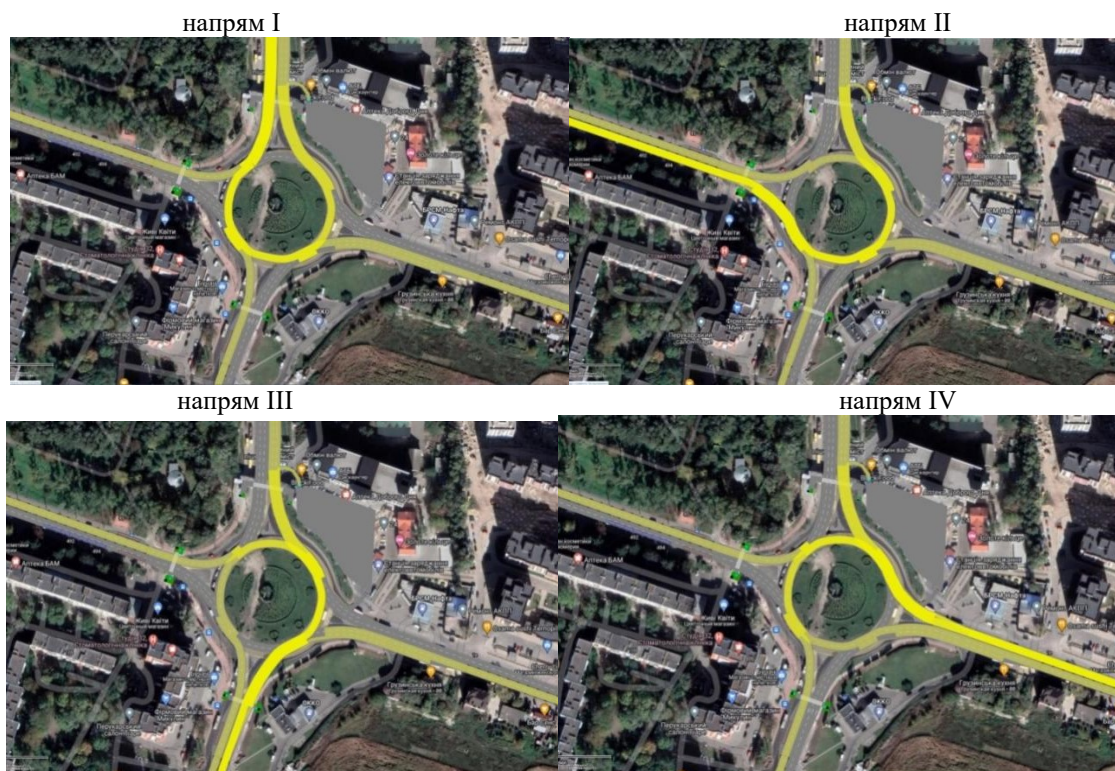


Рисунок 5 – Основні маршрути руху транспортних засобів

Джерело: власна розробка

Для кожного з чотирьох основних напрямків руху на перехресті «Збарзьке кільце» було задано п'ять різних маршрутів транспортних засобів: рух прямо, поворот направо, поворот ліворуч, розворот та заїзд до магазину «АТБ».

Крім основних потоків транспорту, у моделі були враховані додаткові транспортні потоки, зокрема виїзд від магазину «АТБ» по кожному з чотирьох основних напрямків руху транспортних засобів (рис. 6, а).

Потік транспорту, що моделює порушення водіями правил дорожнього руху при з'їзді з перехрестя на вулицю Т. Протасевича (позначено червоним овалом на рис. 6, б).

Потік транспорту, які здійснюють паркування вздовж проспекту Степана Бандери (позначено синім овалом на рис. 6, б).



Рисунок 6 – Додаткові маршрути транспортних засобів

Джерело: власна розробка

Для моделювання пішохідних маршрутів на перехресті з круговим рухом «Збарзьке кільце» використовуються функції «Вхідні пішохідні потоки» та «Пішохідні маршрути». Перед початком моделювання необхідно створити об'єкти, які будуть використовуватися для переміщення пішоходів, це здійснюється за допомогою функції «Пішохідні зони».

Моделювання маршрутів громадського транспорту (ГТ) на даному перехресті виконується за допомогою функції «Маршрути ГТ». Перед початком моделювання маршрутів необхідно задати зупинки міського пасажирського транспорту. Досліджуваний транспортний вузол включає рух ГТ у вигляді маршрутних таксі, автобусів та тролейбусів. Для цього задаються параметри, такі як інтервал руху, швидкість транспортних засобів та час їх під'їзду до перехрестя. Для детального вивчення маршрутної мережі ГТ можна присвоїти окремі номери та кольорову індикацію маршрутним таксі. Інтервали руху громадського транспорту враховують розклад руху. Загальний вигляд маршрутів громадського транспорту зображено на рис. 7.



Рисунок 7 – Маршрути громадського транспорту

Джерело: власна розробка

На перехресті, транспортні засоби змушені перетинати транспортні потоки, що призводить до виникнення конфліктних ситуацій. Для забезпечення безпечного проїзду ТЗ на таких ділянках, необхідно встановити пріоритети для руху відповідно до правил дорожнього руху України.

PTV VISSIM забезпечує цю функцію за допомогою вкладки «Конфліктні зони». На модельованому перехресті може утворюватись 22 конфліктні зони для транспортних засобів та 10 конфліктних зон для транспорту та пішоходів. Ця значна кількість конфліктів пояснюється складністю проїзду і маневрування ТЗ на даному перехресті, що зумовлено різноманітністю учасників дорожнього руху. На рис. 8 зображено приклад вирішення конфліктних зон.



Рисунок 8 – Конфліктні зони на перехресті «Збараське кільце»

Джерело: власна розробка

Після створення всіх компонентів моделі та налаштування необхідних параметрів важливим кроком є здійснення пробного запуску імітаційної моделі. Це необхідно для перевірки адекватності моделі та калібрування її параметрів, щоб переконатись, що результати моделювання відповідають дійсності.

На рис. 9 показані результати пробного запуску імітаційної моделі, де відображається взаємодія різних транспортних потоків на перехресті з круговим рухом «Збараське кільце». Ці результати допоможуть оцінити роботу моделі та перевірити, наскільки вона відповідає реальним умовам дорожнього руху.



Рисунок 9 – 2D (а) та 3D (б) вигляд імітаційної моделі перехрестя

Джерело: власна розробка

На основі попередньо створеної імітаційної моделі перехрестя з круговим рухом «Збараське кільце» з використанням існуючої організації дорожнього руху, була розроблена нова імітаційна модель з метою перевірки ефективності запропонованих заходів для покращення схеми організації дорожнього руху на цьому перехресті (рис. 10).



Рисунок 10 – Модель перехрестя з пропонованою схемою ОДР

Джерело: власна розробка

У новій імітаційній моделі перехрестя з круговим рухом «Збараське кільце» були внесені деякі зміни, зокрема, зупинки громадського транспорту на проспекті Степана Бандери були обладнані кишенями, що дозволяють рухатись іншим транспортним потокам, поки пасажери виходять та заходять в громадський транспорт. Також була додана додаткова смуга для з'їзду з перехрестя на вулицю Т. Протасевича, і була вилучена зона паркування ТЗ вздовж проспекту Степана Бандери.

Результати пробного запуску імітаційної моделі з оновленою схемою організації дорожнього руху показана на рис. 11.



Рисунок 11 – 3D вигляд імітаційної моделі перехрестя із впровадженими заходами організації дорожнього руху

Джерело: власна розробка

Для оцінки результативності запропонованих заходів щодо організації дорожнього руху на перехресті з круговим рухом «Збараське кільце» було проведено

аналіз за наступними транспортно-експлуатаційними показниками: середня швидкість транспортних засобів, середній час затримки транспортних засобів, середня кількість зупинок та середній час простоювання у заторі. Значення цих показників для п'яти варіантів моделювання наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати моделювання дорожнього руху на перехресті

Назва показника	Середня швидкість руху ТЗ, км/год	Середній час затримки ТЗ, с	Середня кількість зупинок ТЗ	Середній час простоювання ТЗ у заторах, с
Варіант 1	17.87	54.79	2.96	22.78
Варіант 2	13.15	74.24	3.78	44.9
Варіант 3	13.45	73.43	3.24	40.55
Варіант 4	18.06	56.88	3.12	25.46

Джерело: розроблено авторами

Висновки:

1. Згідно з результатами імітаційного моделювання перехрестя «Збаразьке кільце», впровадження запропонованих заходів (варіант 5) призведе до наступних покращень у порівнянні з існуючими умовами руху на перехресті (варіант 2):

- 1) Середня швидкість руху ТЗ збільшиться на 30%;
- 2) Середній час затримки ТЗ зменшиться на 28%;
- 3) Середня кількість зупинок ТЗ зменшиться на 21%;
- 4) Середній час простоювання ТЗ у заторах зменшиться на 50%.

2. Для подальшого підвищення ефективності функціонування перехрестя «Збаразьке кільце» доцільним є зменшення інтенсивності та насиченості транспортного потоку транзитними транспортними засобами шляхом перенесення частини дороги в обхід міста Тернопіль за його межі.

Список літератури

1. Степанчук О.В., Лапенко О. І., Чернишова О. С. Особливості використання методів моделювання транспортних потоків на вулично-дорожній мережі міста. *Теорія та практика дизайну*. 2022. Вип. 25. С. 110-119.
2. Stepanchuk O., Bieliatynskyi A., Pylypenko O. Modelling the Bottlenecks Interconnection on the City Street Network. *VIII International Scientific Siberian Transport Forum. TransSiberia. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 1116. P.889-898.
3. Кристопчук М.Є., Хітров І.О., Цьонь О.П. Дослідження координованого управління транспортними потоками в центральній частині міста. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2021. Том 1 № 16. С. 82-90.
4. F. Clara Fang, Hernan Castaneda. Computer Simulation Modeling of Driver Behavior at Roundabouts. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*. 2018. Vol. 16. P. 66–77.
5. Форнальчик Є. Ю. Управління дорожнім рухом на регульованих перехрестях у містах: монографія / Є. Ю. Форнальчик, І. А. Могила, В. Е. Трушевський, В. В. Гілевич; за заг. ред Є. Ю. Форнальчика. – Львів :Видавництво Львівської політехніки, 2018. 236 с.
6. Бугайов І.С., Холодова О.О., Бугайова М.О. Оцінка ефективності впровадження засобів заспокоєння дорожнього руху на перехресті. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2023, №1 (20). С. 79-86.
7. Любий Є. В., Левченко О. С., Сиром'ятнікова М. С. Аналіз ефективності використання мінікільцевих розв'язок. *Наукові нотатки*. 2018. Вип. 61. С. 110 – 117.

8. ДБН України. Споруди транспорту. Вулиці та дороги населених пунктів. Наказ Держбуду України від, 2001. 89 с.

References

1. Stepanchuk, O. V., Lapenko, O. I., & Chernyshova, O. S. (2022). Osoblyvosti vykorystannia metodiv modeliuvannia transportnykh potokiv na vulychno-dorozhnii mrezhi mista. *Teoriia ta praktyka dizainu*, (25), 110-119 [in Ukrainian].
2. Stepanchuk, O., Bieliatynskyi, A., & Pylypenko, O. (2019). Modelling the bottlenecks interconnection on the city street network. *In International Scientific Siberian Transport Forum*. P. 889-898 [in English].
3. Khitrov, I. O., Tson, O. P., Krystopchuk, M. Ye., & Pochuzhevskyi, O. D. (2021). Analiz transportnykh zatrymok v tseentralnii chastyni mista ta shliakhy yikh znyzhennia. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, 14(2), 131-139 [in Ukrainian].
4. Clara Fang, F., & Castaneda, H. (2018). Computer simulation modeling of driver behavior at roundabouts. *International journal of intelligent transportation systems research*, 16. P. 66-77 [in English].
5. Fornalchuk, Ye. Yu., Fornalchuk, E. Yu., Trushevskyi, V. E., & Trushevskyi, V. E. (2018). Upravlinnia dorozhnim rukhom na rehulovanykh perekhrestiakh u mistakh: monohrafiia [in Ukrainian].
6. Buhaiov, I., Kholodova, O., & Buhaiova, M. (2023). Otsinka efektyvnosti vprovadzhennia zasobiv zaspokoennia dorozhnogo rukhu na perekhresti. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*, 1(20), 78-85 [in Ukrainian].
7. Liubiyi, Ye. V., Levchenko, O. S., & Syromiatnikova, M. S. (2018). Analiz efektyvnosti vykorystannia mini-kiltsevykh rozviazok. *Naukovi notatky*, (61), 110-117 [in Ukrainian].
8. Budivelni normy Ukrainy. (2001). Sporudy transportu. Vulytsi ta dorohy naselenykh punktiv. Nakaz Derzhbudu Ukrainy [in Ukrainian].

Oleg Lyashuk, Prof., DSc., **Mykola Stashkiv**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleg Tson**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Nataliya Rozhko**, Prof., DSc., **Uliana Plekan**, PhD econ. sci., **Bogdan Gevko**, PhD econ. sci
Ternopil Ivan Pulu National Technical University, Ternopil, Ukraine

Increasing the Efficiency of the Functioning of an Unregulated Intersection with Circular Traffic

The analysis and empirical studies of conditional and unconditional parameters of the traffic model at an unregulated intersection with circular traffic in the city of Ternopil were conducted. The intersection "Zbarazke ring" in the city of Ternopil is an unregulated intersection with a circular traffic pattern and is located at the intersection of Stepan Bandera avenue, April 15 street, T. Protasevich street and Pidvolochyskyi highway.

To verify the effectiveness of the proposed solutions, simulation models of the intersection "Zbarazke ring" with the existing and proposed traffic management system were created. The conducted traffic modeling using multi-parameter models made it possible to take into account various options for road infrastructure, restrictions and traffic parameters, which made it possible to justify optimal decisions regarding the improvement of the organization of traffic at the object of study. Five variants of traffic organization at the intersection with circular traffic are proposed, the best of them is modeled, analyzed and substantiated, and ways to improve the quality of functioning of this section of the street-road network are proposed.

According to the results of the simulation modeling of the intersection "Zbarazke ring", the implementation of the proposed measures will lead to the following improvements compared to the existing traffic conditions at the intersection: the average speed of vehicles will increase by 30%; the average delay time will decrease by 28%; the average number of road transport stops will decrease by 21%; the average time spent in traffic jams will decrease by 50%.

traffic flow, unregulated intersection, traffic lanes, simulation models, street and road network

Одержано (Received) 16.08.2023

Прорецензовано (Reviewed) 06.09.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

УДК 658.7

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.230-236](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.230-236)

Л.А. Тарандушка, проф., д-р техн. наук, І.П. Тарандушка, ст. викл.
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна
e-mail: tarandushkal@ukr.net; tarandushka@ukr.net

Розробка методики визначення розміру страхового запасу товарів в транспортно-логістичному ланцюзі для підвищення конкурентоздатності підприємства

Розроблено методику управління запасами у транспортно-логістичному ланцюзі на основі обґрунтування організаційних рішень, характеристик системи управління запасами у проміжній ланці логістичного ланцюга (регіональному транспортно-розподільчому центрі), що взаємодіє з виробниками, споживачами та перевізниками товару. Результати дослідження пропонується застосовувати в процесі оптимізації функціонування підприємства на ринку збуту товарів.

підвищення конкурентоздатності, транспортно-логістичний ланцюг, страховий запас

Постановка проблеми. На етапі реформування виробництва, комерції, транспорту та інших сфер економічних взаємин дедалі більше уваги приділяється надійній та ефективній адаптації підприємства на ринку збуту. Процеси диверсифікації інтеграції виробництва, комерції на транспорті, які відбуваються у світовій економіці, визначають актуальність наступних положень організації виробництва:

по-перше, відбувається формування розгалуженої інтегрованої мережі регіональних транспортно-розподільчих центрів, на яких виконується широкий комплекс логістичних послуг, пов'язаних із транспортуванням та проміжним зберіганням товарно-матеріальних цінностей;

по-друге, з метою підвищення якості вхідного матеріального потоку, встановлюються довгострокові взаємозв'язки між підприємствами, що виробляють та споживають відповідну продукцію, транспортними компаніями, вантажними терміналами тощо.

по-третє, необхідно безперервно оптимізувати товаропровідні процеси, враховуючи зовнішні фактори, що постійно змінюються.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Комерційна діяльність загалом і товарорух зокрема характеризуються комплексом взаємозалежних чинників - попиту, пропозиції, конкуренції і рентабельності, які, своєю чергою, визначають зміст взаємовідносин між підприємствами, здійснюють процес просування товарів від виробника до споживача.

На думку аналітиків [1] обіг готової продукції у сфері розподілу та збуту, тобто на товарорух, припадає 26% часу, тоді як частка основного виробничого процесу складе лише 2,2% із загального часу, необхідного для повного циклу руху ресурсу - починаючи від постачання сировини та матеріалів та закінчуючи реалізацією готової продукції.

Основні показники запасу продукції впливають на якість, швидкість та вартість руху матеріальних потоків [2]. Запаси сприяють раціоналізації найважливіших елементів виробничого процесу: ритмічного постачання підприємств промисловості та торгівлі, ефективного використання транспортних засобів, високої якості

обслуговування споживачів, забезпечення сумісності логістичних стратегій виробників та споживачів.

Поряд з позитивним впливом створення запасів необхідно враховувати і значимість витрат на їх утримання. За оцінками аналітиків [3], запаси становлять значну частку всіх активів підприємства.

Формування і підтримка запасів у системі руху товарів обумовлена кількома чинниками, які впливають на ефективність товароруку, які, в свою чергу, призводять до вирішення важливих питань [4]:

- регіональний розподіл праці;
- партійність товарного ресурсу в процесах транспортування та складування;
- асинхронність процесів виробництва та споживання товарного ресурсу;
- невизначеність умов та часу постачання товарних ресурсів.

Раціональне планування рівнів запасів та оперативний контроль за їх рухом дозволяють досягти компромісу між якістю обслуговування споживачів логістичних послуг та рівнем витрат на це обслуговування, що позитивно впливає на конкурентоспроможність як окремого підприємства, так і всього транспортно-логістичного ланцюга [5].

В роботі [6] наголошується на важливості управління запасами та обґрунтовується їх серйозний вплив на функціонування всіх ланок логістичних ланцюгів.

До логістичних функцій транспортно-логістичних комплексів [7] належать доставка, переробка та зберігання вантажів. Оптимізація роботи ТЛК полягає в мінімізації «часу перебування вантажів на ланках логістичного ланцюга»: з одного боку, недостатня для партії відправлення кількість вантажу призводить до очікування та простою транспортних засобів у ТЛК; з іншого боку, надмірно великий запас вантажу в ТЛК призводить до збільшення часу його просування логістичним ланцюгом.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка методики управління запасами у транспортно-логістичному ланцюзі на основі врахування організаційних рішень, характеристик системи управління запасами у проміжній ланці логістичного ланцюга (регіональному транспортно-розподільчому центрі), що взаємодіє з виробниками, споживачами та перевізниками товару.

Виклад основного матеріалу. Організація системи управління запасами здійснюється шляхом визначення рівня запасів у транспортно-логістичному ланцюзі, для чого вирішується низка завдань:

визначення кількості продукції, що необхідно виготовити у наступному виробничому циклі;

у яких ланках ланцюга слід підтримувати запас того чи іншого товару;

який оптимальний (раціональний) розмір поповнення запасів та у який термін він здійснюється.

Таким чином, виникає необхідність у формуванні такого рівня запасу, який би за мінімальних матеріальних та часових витрат забезпечив би нормальне безперервне протікання виробничого процесу.

Прийняття рішення щодо рівнів запасів, як правило, передують формуванню системи управління та проектуванню планів-графіків надходження та витрачання запасів. На цьому етапі найчастіше використовуються аналітичні методи. Схема аналітичного походу до організації систем управління запасами наведено рис. 1 [3].

Значну роль у прийнятті управлінських рішень щодо розміру та часу підтримки запасу має прогнозування параметрів попиту та пропозиції [8].



Рисунок 1 – Схема застосування аналітичних методів управління запасами
 Джерело: розроблено авторами

Враховавши, всі чинники, що впливають на формування рівня запасів було розроблено алгоритм, що описує методику визначення розміру оптимального страхового запасу товарів в транспортно-логістичному ланцюзі (рис.2).

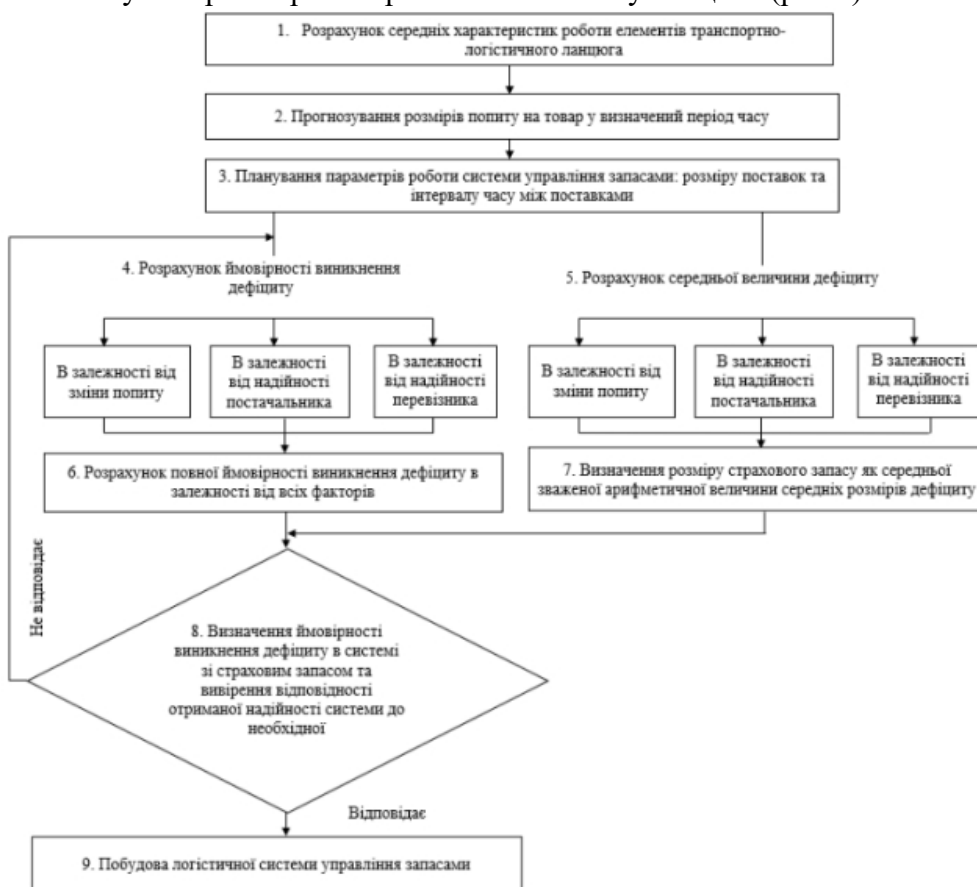


Рисунок 2 – Алгоритм визначення розміру оптимального страхового запасу товарів в транспортно-логістичному ланцюзі
 Джерело: розроблено авторами

Таким чином, на першому, другому та третьому етапах здійснює первинне планування параметрів роботи системи управління запасами. Існуючий план-графік приймається як опорний для подальшої логістичної раціоналізації.

4 етап – визначення ймовірності виникнення дефіциту. Для оцінки надійності транспортно-логістичного ланцюга визначається характер і величина відхилень реальних станів запасів від їх запланованих величин.

Розрахунок рівня запасів у системі товароруку виконується за формулою:

$$Q_i^{CHC} = Q_{i-1}^{CHC} - q_i^D + q^S(t_i), \quad (1)$$

де Q_{i-1}^{CHC} – рівень запасів у системі в попередній період часу;

q_i^D – реальний обсяг попиту в i -й період часу;

$q^S(t_i)$ – запланований розмір поставок в i -й період часу;

Далі формується інтервальный ряд розподілу рівнів запасів у системі руху товару з урахуванням коливань попиту. Для розрахунку ймовірності виникнення дефіциту, необхідно визначити, якому закону підпорядковується даний розподіл.

Виконавши аналіз формувань запасів в декількох регіональних транспортно-розподільчих центрах Черкаської області можна зробити висновок, що більшість формувань рівнів запасів підпорядковуються нормальному розподілу, тому стає можливим визначити ймовірність виникнення дефіциту за формулою:

$$P(Q_{\min} < Q < 0) = \Phi\left(\frac{0 - \bar{Q}}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{Q_{\min} - \bar{Q}}{\sigma}\right), \quad (2)$$

де \bar{Q} – середній рівень запасу ланцюга розраховується як середня проста арифметична величина значень розмірів запасів, т:

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}, \quad (3)$$

де Q_i – рівень запасів в i -й період часу;

σ – середнє квадратичне відхилення розмірів запасів від середнього їх рівня:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n}}, \quad (4)$$

5 етап - визначення середньої величини дефіциту, що виникає внаслідок відхилення реального ринкового попиту від запланованої величини пропозиції.

Середня величина дефіциту визначається як середнє арифметичне значення всіх розмірів дефіциту, що спостерігаються протягом певного періоду:

$$\bar{Q}_G^{ДЕФ} = \frac{\sum_{i=1}^t Q_i^{ДЕФ}}{t}, \quad (5)$$

де t – кількість днів, коли спостерігався дефіцит;

G – позначення фактора, що впливає на виникнення дефіциту.

6 етап - визначення ймовірності виникнення дефіциту у системі управління запасами. Для визначення ймовірності виникнення дефіциту $\left(P(G^\Sigma)\right)$ та ймовірності

його відсутності $(P(\overline{G_1 G_2 G_3}))$ використовується формула повної ймовірності появи незалежних подій:

$$\begin{aligned} (P(G^\Sigma)) = \sum P(K_k) = 1 - P(\overline{G_1 G_2 G_3}) = & P(G_1) + P(G_1) + P(G_1) - P(G_1 G_2 \overline{G_3}) - \\ & - P(G_1 \overline{G_2} G_3) - P(\overline{G_1} G_2 G_3) - 2P(G_1 G_2 G_3) \end{aligned} \quad (6)$$

де K_k – комбінація факторів, що впливають на виникнення дефіциту в транспортно-логістичній системі.

Фактори: G_1 – коливання попиту;

G_2 – надійність постачальника;

G_3 – надійність перевізника;

Виконують розрахунок ймовірностей виникнення дефіциту враховуючи комбінації наступних факторів:

$P(K_1)$ – впливає лише перший фактор;

$P(K_2)$ – впливає лише другий фактор;

$P(K_3)$ – впливає лише третій фактор;

$P(K_4)$ – одночасно впливають перший та другий фактори;

$P(K_5)$ – одночасно впливають перший та третій фактори;

$P(K_6)$ – одночасно впливають другий та третій фактори;

$P(K_7)$ – одночасно впливають усі три фактори;

7 етап – розрахунок розміру страхового запасу.

Страховий запас розраховується як середня зважена величина дефіциту, що виникає внаслідок усіх трьох факторів, за такою формулою:

$$Q_{\text{АРАНТ}} = \overline{Q}^{\text{ДЕФ}} = \frac{\sum P \cdot (K_k) Q^{\text{ДЕФ}}(K_k)}{\sum P(G^\Sigma)} \quad (7)$$

Така величина дефіциту визначається за формулою (8) і є сумою середніх значень дефіцитів, що виникають внаслідок G -го фактора:

$$Q^{\text{ДЕФ}}(K_k) = \sum Q_{G(k)} \quad (8)$$

де $Q^{\text{ДЕФ}}(K_k)$ – величина дефіциту, що виникає в k -й комбінації факторів, що впливають на виникнення дефіциту.

8 етап - перевірка відповідності надійності транспортно-логістичної системи зі страховим запасом необхідному рівню надійності.

Для перевірки надійності з урахуванням розміру страхового запасу будується план-графік надходження та витрачання запасів у другому наближенні. На графіку наводяться зображення фрагментів планів-графіків у першому наближенні (без страхового запасу) та другому наближенні (зі страховим запасом). У разі виникнення чинників, що призводять до дефіциту, використовується страховий запас, який поповнюється у моменти наступних поставок.

Динаміка зміни рівнів запасів внаслідок впливу перерахованих вище факторів вивчається щодо системи зі страховим запасом аналогічно четвертому етапу: будуються ряди розподілу, виявляється характер їх закономірності та визначається ймовірність виникнення дефіциту.

9 етап - Формування та регулювання системи управління запасами зазвичай здійснюється у чотири етапи:

1 етап. Формування вихідного масиву інформації.

2 етап. Розрахунок розміру замовлення для вибраних номенклатурних позицій, з моделі оптимального розміру замовлення.

3 етап. Моделювання роботи системи керування запасами з фіксованим розміром замовлення.

4 етап. Розробка інструкції з контролю за станом системи управління запасами.

Висновки. Запропонована методика визначення розміру страхового запасу в транспортно-логістичному ланцюзі є альтернативою традиційним методикам, які залежать тільки від часу запізнення поставки з вини перевізника. Переваги розробленої методики полягають у таких положеннях:

– можливість враховувати кілька факторів, що впливають на функціонування систем керування запасами у транспортно-логістичній системі. Це дозволяє не тільки розрахувати потрібний розмір страхового запасу в системі, але також зробити висновки про надійність підприємств, що поставляють і транспортують товар;

– використання двох основних груп характеристик роботи систем управління запасами: тимчасових (транспортування партії, витрачання запасу тощо) та об'ємних (розміри партій товару, що постачаються, та інтенсивність їх споживання). Традиційні методики використовують переважно тимчасові характеристики, не враховуючи обсяги попиту та пропозиції товару;

– аналіз необхідного рівня надійності роботи транспортно-логістичного ланцюга визначає якість логістичного обслуговування та дозволяє враховувати обґрунтовані характеристики функціонування транспортно-логістичного ланцюга.

Список літератури

1. Алькема В.Г., Сумець О.М. Логістика. Теорія та практика: навч. посіб. К.: «Видавничий дім «Професіонал», 2008. 272 с.
2. Кислий В. М., Біловодська О. А., Олефіренко О. М., Смоляник О. М. Логістика: Теорія та практика : навч. посіб. К. : ЦУЛ, 2010. 360 с.
3. Миротін Л.Б. Транспортна логістика: підручник для транспортних вишів. К.: Видавництво «Іспит», 2003.
4. Дзюбан І.Ю. Жиров О.Л., Охріменко О. Г. Методи дослідження операцій . Київ : ІВЦ «Видавництво «Політехніка », 2005. 108 с
5. Логістика: навч. посіб. / О.М.Тридід, Г.М.Азаренкова, С.В.Мішина, І.І.Борисенко. К.: Знання. 2008. 566 с.
6. Bowersox D.J., Closs D.J. *Logistical Management / The Integrated Supply Chain Process*. The McGraw, New York, 1996. P.57.
7. Hoel, L. A., Garber, N. J., & Sadek, A. W. (2011). *Transportation infrastructure engineering*. Library of Congress Control Number: 2006908593. ISBN-13: 978-0-495-66789-6.
8. Slack B. Intermodal transportation in North America and the development of inland load centers. *The Professional Geographer*. 1990. 42(1). 7283.

References

1. Alkema, V.H. & Sumets, O.M. (2008). *Lohistyka. Teoriia ta praktyka [Logistics: Theory and practice]*. Kyiv: Vydavnychiy dim «Profesional» [in Ukrainian].
2. Kyslyi, V.M., Bilovodska, O.A., Olefirenko, O.M. & Smolianyuk, O.M. (2010). *Lohistyka: Teoriia ta praktyka [Logistics: Theory and practice]*. Kyiv : TsUL [in Ukrainian].
3. Mirotin, L.B. (2003). *Transportna lohistyka: Pidruchnyk dlia transportnykh vyshiv [Transport logistics]*. Kyiv: Vydavnytstvo «Ispyt» [in Ukrainian].
4. Dziuban, I.Yu., Zhyrov, O.L. & Okhrimenko, O.H. (2005). *Metody doslidzhennia operatsii [Operations research methods]*. Kyiv : IVTs «Vydavnytstvo «Politekhnikha» [in Ukrainian].
5. Trydid, O.M., Azarenkova, H.M., Mishyna, S.V. & Borysenko, I.I. (2008) *Lohistyka [Logistics]*. Kyiv: Znannia [in Ukrainian].
6. Bowersox, D.J. & Closs, D.J. (1996). *Logistical Management / The Integrated Supply Chain Process*. The McGraw, New York [in English].

7. Hoel, L. A., Garber, N. J., & Sadek, A. W. (2011). Transportation infrastructure engineering. Library of Congress Control Number [in English].
8. Slack, B (1990). Intermodal transportation in North America and the development of inland load centers. The Professional Geographer [in English].

Ludmyla Tarandushka, Prof., DSc., **Ivan Tarandushka**, Senior Lecturer

Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

Development of the Methodology for Determining the Size of the Insurable Stock of Goods in the Transport and Logistics Chain to Increase the Competitiveness of the Enterprise

The methodology of inventory management in the transport and logistics chain was developed based on the justification of organizational decisions, the characteristics of the inventory management system in the intermediate link of the logistics chain (regional transport and distribution center), which interacts with manufacturers, consumers and carriers of goods.

The proposed method of determining the size of the insurance stock in the transport and logistics chain is an alternative to traditional methods that depend only on the time of late delivery due to the fault of the carrier. This allows not only to calculate the required size of the insurance stock in the system, but also to draw conclusions about the reliability of enterprises that supply and transport goods. Analysis of the necessary level reliability of the transport and logistics chain determines the quality of logistics service and allows taking into account the well-founded characteristics of the operation of the transport and logistics chain.

The results of the study are proposed to be used in the process of optimizing the functioning of the enterprise in the market of goods sales.

increasing competitiveness, transport and logistics chain, insurance reserve

Одержано (Received) 06.10.2023

Прорецензовано (Reviewed) 19.10.2023

Прийнято до друку (Approved) 30.10.2023

ЗМІСТ**Матеріалознавство***В.І. Калініченко, А.В. Рутковський, С.І. Маркович*

Мікроструктура поверхневого шару титанового сплаву модифікованого вакуумним іонним азотуванням в імпульсному режимі 3

Л.А. Тарандушка, В.С. Ковтуненко

Будова груп атомів пари системи As-S для створення перспективних матеріалів для автомобільної промисловості 10

В.М. Гвоздецький, С.І. Маркович, Х.Р. Задорожна, М.М. Студент

Дослідження впливу температури електроліту при імпульсному анодуванні на властивості поверхневих шарів технічного алюмінію 20

Прикладна механіка*А.О. Сергєєв, В.М. Боков, В.М. Шмельов*

Багатомодульна електроерозійна головка розмірної обробки дугою 28

Галузеве машинобудування*В.О. Дзюра, П.О. Марущак, В.О. Семеген, В.В. Головка, В.Я. Федів*

Обґрунтування параметрів регулярних мікрорельєфів сформованих на плоских поверхнях 37

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка*С. В. Кравцов, Р. В. Жесан, О. П. Голик*

Відновлювані джерела енергії й інші базові компоненти зростання енергоефективності та енергонезалежності 48

Будівництво та цивільна інженерія*М.В. Гаркуша*

Впливу корозії на технічний стан дорожніх водопропускних труб та сучасні методи їх ремонту 57

Агроінженерія*С.І. Павленко*

Виробничі комплекси машин для аерації при компостуванні органічної сировини 67

А.М. Пугач, О.А. Черній, Є.В. Калганков

Дослідження ефекту релаксації напруження та залишкової деформації сучасних полімерних матеріалів для захисту поверхонь деталей від зношування 76

С.О. Коваль

Синтез гвинтових конвеєрів-змішувачів з обертовим кожухом 85

*Myroslav Stechyshyn, Mykola Lukyanyuk, Andriy Martynyuk,
Viktor Olekasandrenko, Nadiya Stechyshyna*

Increasing the wear resistance of the working bodies of soil processing machines
by nitridation in the ignition discharge 95

О.Л. Ляшук, Є.Б. Береженко, О.В. Козаченко

Математична модель переміщення зрізаної гички коренеплодів цикорію в
направляючому каналі 104

М.І. Підгурський, М.М. Борис, Г.Б. Цьонь

Експериментальні дослідження ширини утвореного валка зрізаної гички
коренеплодів цикорію 117

Автомобільний транспорт

Ів.Б. Гевко, В.З. Гудь, М.Г. Левкович, М.Д. Сіправська

Дослідження захисних елементів технологічного устаткування та обладнання
на автотранспортних підприємствах 128

О.Л. Ляшук, У.М. Плекан, О.П. Цьонь, Б.Р. Гевко

Розвиток технологій гібридних силових установок автомобілів 139

*Michael Podryhalo, Olexand Polyanskyi, Yevgeniy Dubinin, Dmytro Klets,
Vladyslava Baidala, Maksym Krasnokutskyi*

Improving the accuracy of wheeled vehicle acceleration estimation during testing..... 146

І.Б. Гевко, О.Л. Ляшук, Р.М. Рогатинський, А.Й. Матвійшин, Р.В. Хорошун

Синтез підвіски автотранспортних засобів 153

Л.А. Тарандушка, Д.О. Шалапко

Покращення показників автомобільних дизельних двигунів при додаванні
водневої каталітичної добавки 164

Транспортні технології (за видами)

В. Г. Загорянський

Розробка практичної методики застосування експертних методів теорії систем
при дослідженнях транспортного процесу 170

В.В. Драгобецький, Д.В. Молоштан, А. Черниш

Відновлення листових деталей транспортних засобів після дорожньо-
транспортних пригод 175

*О.М. Горяїнов, А.С. Козенок, Н.Г. Бережна, І.І. Сисенко, І.А. Бабич,
О.В. Войтов*

Дослідження математичної моделі стійкості транспортного потоку на ділянках
дорожньої мережі міста 183

Dmytro Levkin, Natalija Berezhna, Anna Kozenok, Inna Babych

Mathematical modeling of the process of containerized cargo handling
at terminals 196

<i>С.М. Пашкевич, В.М. Никончук, М.Є.Кристончук</i> Оцінка пропускної спроможності міської дорожньої мережі з урахуванням пропозиції паркування.....	201
<i>І.О. Кузєв, К.Г. Ковцур</i> Інформаційні системи і комп'ютерні технології на транспорті	212
<i>О.Л. Ляшук, М.Я. Сташків, О.П. Цьонь, Н.Я. Рожко, У.М. Плекан, Б.Р. Гевко</i> Підвищення ефективності функціонування нерегульованого перехрестя з круговим рухом	219
<i>Л.А. Тарандушка, І.П. Тарандушка</i> Розробка методики визначення розміру страхового запасу товарів в транспортно-логістичному ланцюзі для підвищення конкурентоздатності підприємства.....	230

CONTENT

Material Science

Vitalii Kalinichenko, Anatoly Rutkovskiy, Sergiy Markovych
The Microstructure of the Surface Layer of the Titanium Alloy Modified
by Vacuum Ion Nitriding in the Pulse Mode 3

Ludmyla Tarandushka, Viktor Kovtunenکو
The Structure of Groups of Atoms of the As-S System Vapor for the Creation
of Promising Materials for the Automotive Industry 10

*Volodymyr Hvozdet'skii, Sergiy Markovych, Khrystyna Zadorozhna,
Mykhajlo Student*
Study of the Influence of the Temperature of the Electrolyte During Pulse
Anodization on the Properties of the Surface Layers of Technical Aluminum 20

Applied Mechanics

Anton Sergeev, Viktor Bokov, Vitaly Shmelov
Multi-Module Electroerosion Head for arc Dimensional Processing 28

Industry Engineering

*Volodymyr Dzyura, Petro Maruschak, Volodymyr Semehen, Volodymyr Holovko,
Vasyl Fediv*
Justification of the Parameters of Regular Microreliefs Formed on Flat Surfaces 37

Automation and Computer Integrated Technologies

Serhii Kravtsov, Roman Zhesan, Olena Holyk
Renewable Energy Sources and Other Basic Components of Increasing Energy
Efficiency and Energy Independence..... 48

Construction and Civil Engineering

Mykola Harkusha
The Impact of Corrosion on the Technical Condition of Road Culverts and
Modern Methods of Their Repair..... 57

Agroengineering

Sergiy Pavlenko
Production Complexes of Machines for Aeration During Composting
of Organic Raw Materials 67

Andrii Puhach, Olexandr Chernii, Yevhen Kalhankov
Study of the Effect of Stress Relaxation and Residual Deformation of Modern
Polymer Materials to Protect the Surfaces of Parts From Wear 76

Sergii Koval
Synthesis of Screw Conveyors-mixers With a Rotating Casing 85

*Myroslav Stechyshyn, Mykola Lukyanyuk, Andriy Martynyuk,
Viktor Olekasandrenko, Nadiya Stechyshyna*

Increasing the wear resistance of the working bodies of soil processing machines
by nitridation in the ignition discharge 95

Oleg Lyashuk, Yevhen Berezhenko, Oleksiy Kozachenko
Mathematical Model of the Movement of the Cut end of Chicory Roots
in the Guide Channel..... 104

Mykola Pidhurskyi, Mykola Boris, Hanna Tsyon
Experimental Studies of the Width of the Formed Swath of Cut Chicory
Root Crops..... 117

Road Transport

Ivan Hevko, Victor Hud, Mykhailo Levkovich, Maria Sipravska
Research of Protective Elements of Technological Equipment and Equipment of Motor
Transport Enterprises 128

Oleg Lyashuk, Uliana Plekan, Oleg Tson, Bogdan Gevko
Development Technologies of Cars Hybrid Power Plants..... 139

*Michael Podryhalo, Olexand Polyanskyi, Yevgeniy Dubinin, Dmytro Klets,
Vladyslava Baidala, Maksym Krasnokutskyi*
Improving the accuracy of wheeled vehicle acceleration estimation
during testing..... 146

*Ivan Hevko, Oleg Lyashuk, Roman Rohatynskyi, Anatolii Matviishyn,
Roman Khoroshun*
Synthesis of Suspension of Motor Vehicles..... 153

Ludmyla Tarandushka, Denys Shalapko
Enhancement of Automotive Diesel Engine Performance Through the
Addition of Hydrogen Catalytic Additive..... 164

Transport Technologies (by Types)

Volodymyr Zahorianskyi
Development of Practical Methods of Application of Expert Methods
of Systems Theory in Transport Process Research 170

Volodymyr Dragobetskii, Dmytro Moloshtan, Andrii Chernysh
Restoration of Vehicle Sheet Metal Parts After Road Accidents..... 175

*Oleksiy Goryayinov, Anna Kozenok, Nataliia Berezhna, Igor Sysenko,
Inna Babych, Olexsiy Voytov*
Study of the Mathematical Model of the Stability of the Traffic Flow in the
Sections of the Road Network of the City..... 183

Dmytro Levkin, Natalija Berezhna, Anna Kozenok, Inna Babych
Mathematical modeling of the process of containerized cargo handling
at terminals 196

<i>Svitlana Pashkevych, Viktoria Nykonchuk, Mykhailo Krystopchuk</i> Assessment of the Capacity of the City Road Network Taking Into Account the Parking Offer.....	201
<i>Ihor Kuziev, Kateryna Kovtsur</i> Information Systems and Computer Technologies in Transport	212
<i>Oleg Lyashuk, Mykola Stashkiv, Oleg Tson, Nataliya Rozhko, Uliana Plekan, Bogdan Gevko</i> Increasing the Efficiency of the Functioning of an Unregulated Intersection with Circular Traffic.....	219
<i>Ludmyla Tarandushka, Ivan Tarandushka</i> Development of the Methodology for Determining the Size of the Insurable Stock of Goods in the Transport and Logistics Chain to Increase the Competitiveness of the Enterprise.....	230

Матеріали подаються у друкованому вигляді та на електронному носії. Обсяг статті – 5-12 сторінок. Основний текст рукопису друкується 12 кеглем; шрифт – Times New Roman; міжрядковий інтервал – 1,0; відступ – 1,25 см; поля: верх – 2 см, низ – 3см, право, ліво – 2 см. Текст повинен бути вирівняний по ширині аркуша.

Підписи до рисунків і набирати шрифтом Times New Roman 10 (по центру), таблиць 14 (з абзацу). Після рисунка, таблиці схеми – вказується джерело
Рисунки й таблиці розміщуються в тексті статті з вирівнюванням по центру сторінки, без обтікання текстом у рамках поля набору. Рисунки й таблиці подаються в статті безпосередньо після тексту, де їх згадано вперше. На кожен формулу, таблицю, рисунок, графік у тексті мають бути обов'язкові посилання.

Анотація українською мовою – до 10 рядків тексту (до 500 знаків), обов'язково 3-7 ключових слів;

Анотація англійською мовою повинна бути не менше ніж 1800 знаків:

Структура анотацій:

- мета статті;
- короткий опис виконаної роботи;
- висновки по роботі;
- перелік ключових слів;

Структура основного тексту статті:

1. **Постановка проблеми.**
2. **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**
3. **Постановка завдання (мета статті).**
4. **Виклад основного матеріалу.**
5. **Висновки і перспективи подальших досліджень.**

Схема організації матеріалу статті:

1. УДК
2. Ініціали, прізвище, вчене звання, науковий ступінь
3. Місце роботи, місто, країна. e-mail
4. Назва статті.
5. Анотація і ключові слова мовою статті.
7. Основний текст статті.
8. Список літератури. *
9. References
10. Розширена анотація і ключові слова англійською (українською) мовою.

Редакційна колегія Центральноукраїнського наукового вісника повідомляє, що всі статті які надходять перевіряються на плагіат системою Unicheck (<https://corp.unicheck.com>)

Адреса для надсилання: stat_kntu@ukr.net, aulinvv@gmail.com

ДОВІДКА ПРО АВТОРА
українською та англійською мовами

	Українською	Англійською
Прізвище, ім'я, по-батькові:		
Місце роботи (повна назва, без абревіатур), місто, країна:		
Посада (повна назва, без абревіатур):		
Наукова ступінь:		
Вчене звання:		
Назва статті:		
*Спеціальність:		
Адреса для надсилання збірнику:		
Контактні телефони (бажано мобільний):		
E-mail:		
ORCID ID (XXXX-XXXX-XXXX-XXXX)		

* – 122 Комп'ютерні науки; 131 Прикладна механіка; 132 Матеріалознавство; 133 Галузеве машинобудування; 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології; 208 Агроінженерія

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.
ТЕХНІЧНІ НАУКИ

В и п у с к 8(39)
Частина I

Відповідальний за випуск С.В. Лисенко, О.П. Доренський

Комп'ютерна верстка І.М. Каліч

Тиражування О. Г. Каліч

*Приватне підприємство «Ексклюзив-Систем»
Свідоцтво № ДК 4470 від 17.01.2013р.
25006, м. Кіровоград, вул. Шевченка, 25
тел./факс 24-35-53*

Підписано до друку 30.10.2023р. Формат 60x84/8. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Офсетний друк. Умов. друк. арк. 30,5
Тираж 300 прим. Зам. № 0825