

Видається з 1996 року

Засновник і видавець  
Сумський національний аграрний  
університет

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

Редакційна колегія серії

**Тарельник В.Б.**, доктор технічних наук, професор, головний редактор, Сумський національний аграрний університет (Україна)  
**Соларьов О.О.**, кандидат технічних наук, доцент, заступник головного редактора, Сумський національний аграрний університет (Україна)

**Думанчук М.Ю.**, Сумський національний аграрний університет, відповідальний секретар (Україна)

**Антошевський Б.**, доктор технічних наук, професор, Келецький технічний університет (Польща)

**Кундера Чеслав**, доктор технічних наук, професор, Келецький технічний університет (Польща)

**Кирик Г.В.**, доктор технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет (Україна)

**Лобода В.Б.**, кандидат фізико-математичних наук, професор, заступник редактора, Сумський національний аграрний університет (Україна)

**Коноплянченко Є.В.**, кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет (Україна)

**Хінек Рубік**, кандидат технічних наук, Чеський університет наук про життя (Чехія)

**Девід Херак**, кандидат технічних наук, Чеський університет наук про життя (Чехія)

**Сабадаш С.М.**, кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет (Україна)

# ВІСНИК СУМСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО АГРАРНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Виходить 4 рази на рік.

Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»  
Випуск 2 (48), 2022

## ЗМІСТ

<b>Босий М. В.</b> Теплові насоси для тепlopостачання та гарячого водopостачання агропромислових підприємств .....	3
<b>Дерев'яно Д. А., Поліщук В. М., Грудовий Р. С., Дерев'яно О. Д.</b> Травмування і якість насіння зернових культур під час технологічного процесу його підготовки.....	9
<b>Довжик М. Я., Сіренко Ю. В., Калнагуз О. М.</b> Аналіз кінематики руху польових агрегатів зі всіма керованими колесами.....	14
<b>Єрмаков С. В., Гуцол Т. Д., Гарасимчук І. Д., Вусатий М. В.</b> Закономірності руху стрержнеподібних матеріалів у процесі їх висипання з бункерів.....	21
<b>Мельник В. І., Зеленський О. П., Зеленський А. П.</b> Чисельне моделювання газоподібних середовищ в проточній частині вентилятора.....	28
<b>Можарівський Д. М., Тітова Л. Л.</b> Інженерний менеджмент діагностичних параметрів двигунів зернозбиральних комбайнів.....	35
<b>Панкова О. В., Сировицький К. Г., Харченко С. О., Оничко В. І., Тарельник В. Б., Думанчук М. Ю.</b> Підготовка насінневого матеріалу кукурудзи електромагнітним випромінюванням на різних режимах як спосіб підвищення врожайності.....	50
<b>Пуховський Є. С., Фролов В. К., Приходько В. П., Бецко Ю. М.</b> Управління точністю обробки в гнучких виробничих системах.....	56
<b>Рибалко І. М., Сайчук О. В., Захаров А. В., Потоскаєв О. М.</b> Електрошлакова наплавка поверхонь виробів композиційним зносостійким сплавом.....	61
<b>Тарельник В. Б., Пирогов В. О.</b> Підвищення довговічності насосних агрегатів задіяних в системах зрошення комбінованими екологічно безпечними технологічними методами .....	66
<b>Тітова Л. Л., Надточій О. В.</b> Інженерний менеджмент впливу показників безвідмовності і ремонтпридатності зернозбирального комбайна на ефективність його машинвикористання.....	76
<b>Харченко С. О., Харченко Ф. М., Панкова О. В., Бакум М. В., Харченко Д. О.</b> Ідентифікація властивостей насінневих сумішей при їх поділі на вібровідцентрових решетних сепараторах.....	83
<b>Шатров Р. Р., Роговський І. Л.</b> Інженерний менеджмент алгоритмічності формування комбайнового збирання зернового збіжжя.....	88
<b>Юрченко О. Ю., Барсукова Г. В., Тимошенко Г. А.</b> Розробка лопаті вітроенергетичної установки для районів з низькою швидкістю вітру.....	94
<b>Юрченко О. Ю., Колодненко В. М.</b> Композитні відвали TEKRONE – альтернатива для сучасної сільськогосподарської техніки.....	101



Науковий журнал  
«Вісник Сумського національного  
аграрного університету.  
Серія: Механізація та автоматизація  
виробничих процесів»  
внесений до переліку наукових  
фахових видань України  
(категорії «Б») у галузі технічних наук  
(131 «Прикладна механіка»,  
133 «Галузеве машинобудування»,  
208 «Агроінженерія»)  
на підставі Наказу Міністерства  
освіти і науки України № 1188  
від 24.09.2020 (додаток 5)

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

Матеріали журналу знаходяться  
у вільному доступі на сайті  
<https://snaubulletin.com.ua/index.php/mapp>

Усі статті проходять процедуру  
таємного рецензування. До  
публікації в журналі не допускаються  
матеріали, якщо є достатньо підстав  
вважати, що вони є плагіатом.  
Відповідальність за точність  
наведених даних і цитат  
покладається на авторів.  
Матеріали друкуються українською  
та англійською мовами.  
У разі цитування посилання на  
«Вісник Сумського національного  
аграрного університету» обов'язкове

Друкується згідно з рішенням  
вченої ради  
Сумського національного  
аграрного університету  
(Протокол № 3 від 26.09.2022 р.)

Видавництво і друкарня –  
Видавничий дім «Гельветика»  
65101, Україна, м. Одеса,  
вул. Інглєзі, 6/1  
Телефони: +38 (095) 934-48-28,  
+38 (097) 723-06-08  
E-mail: [mailbox@helvetica.ua](mailto:mailbox@helvetica.ua)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої  
справи ДК № 7623 від 22.06.2022 р.

Тираж 300 пр.  
Зам. № 1222/501

© Сумський національний  
аграрний університет, 2022

## ТЕПЛОВІ НАСОСИ ДЛЯ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ АГРОПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

**Босий Микола Вікторович**

викладач

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

ORCID ID: 0000-0002-3090-0427

bosiyvm@ukr.net

*Натепер зміни, які відбуваються в агропромисловому комплексі України потребують розробки та створення новітніх теплонасосних технологій для теплопостачання та гарячого водопостачання агропромислових підприємств. У статті розглядається проблема використання теплових насосів (ТН), що працюють на альтернативних джерелах енергії для теплопостачання та гарячого водопостачання агропромислових підприємств. У своїй роботі ТН використовують низькопотенційну теплоту повітря, водоєм і надр землі. Метою роботи є обґрунтування та дослідження доцільності використання ТН на підприємствах агропромислового виробництва. Виконано аналіз характеристик ТН, що працюють з різними джерелами низькопотенційної теплоти. Визначено фактори, які впливають на енергетичну ефективність ТН, оцінені особливості роботи ґрунтових, водяних та повітряних ТН для агропромислових підприємств України. Проаналізовано вплив тривалості температур повітря різних величин на теплопродуктивність ТН. Для підвищення ефективності роботи теплонасосної системи запропоновано схему відбору низькопотенційної теплоти з використанням ґрунтового ТН. На підставі проведених досліджень встановлено, що перевагою повітря як теплоносія є те, що повітряні ТН можуть працювати практично повсюди і не вимагають облаштування низькотемпературного контуру. Перспективним способом підвищення ефективності ТН при річному циклі його роботи є комбіноване використання низькопотенційної теплоти ґрунту та повітря. Теплонасосна система з двома джерелами енергії забезпечує високу теплопродуктивність ТН протягом всього року і має більш високий показник енергетичної ефективності у порівнянні з традиційними рішеннями. ТН мають значну перевагу перед іншими теплоенергетичними установками. Вони споживають енергію поновлюваних джерел, знижують витрати на електропостачання більш ніж в половину – це повністю автоматизований пристрій. Використання ТН для утилізації низькопотенційних теплових потоків економічно вигідно. Аналіз ефективності систем теплопостачання показує, що в сучасних економічних умовах тенденція систем теплопостачання може розвиватися в наступних напрямках: застосування парокompресійних ТН, використання вторинних енергоресурсів промислових підприємств агропромислового комплексу, підвищення теплотехнічних характеристик будівель. Модернізація із застосуванням даних заходів може суттєво підвищити економічні і технічні характеристики теплопостачального обладнання для будівель агропромислового виробництва.*

**Ключові слова:** *тепловий насос, агропромислові підприємства, термодинамічний цикл, тепла енергія, низькопотенційне джерело теплоти, системи теплопостачання, коефіцієнт трансформації.*

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.1>

**Вступ.** Нині зі скороченням запасів органічних видів палива та зростанням цін на енергоносії, як в Україні, так і у світі в цілому, необхідно на сучасному етапі використовувати та впроваджувати найновіші технології з використанням відновлювальних альтернативних природних джерел енергії, які відкривають для сьогодення можливість до енергозбереження і зменшення викидів парникових газів в довкілля. Одним із видів таких технологій є використання теплових насосів (ТН) (Zakon Ukrainy, 2017; Maliarenko & Lysak, 2004; Bezrodnyi et al., 2013; Ostapenko, 2015; Arseniev & Meleichuk, 2018).

На теперішньому етапі розвитку енергоефективних екологічно чистих теплонасосних технологій для систем теплопостачання сучасним екологічним та найефективнішим джерелом енергії для системи опалення агропромислових підприємств є використання енергії землі, що міститься у повітрі, ґрунті та воді. Тому ТН типу «повітря–вода», «ґрунт–вода» і «вода–вода» працюють з високими показниками ефективності і за опалювальний період заощаджують до 70% коштів у порівнянні із традиційною системою опалення газовим котлом, що

є вигідною інвестицією на майбутнє (Sniezhkin et al., 2008; Bosyi & Kuzyk, 2022; Pisarev, 2002; Bezrodnyi & Prytula, 2012).

Тому, необхідно впроваджувати теплонасосні технології з використанням поновлювальних альтернативних джерел енергії, які відкривають можливість до енергозбереження і зменшення викидів парникових газів в атмосферу. Проблема зниження затрат на опалення та гаряче водопостачання актуальна натепер і для агропромислових підприємств (Shevel, 2004; Khmelniuk & Martyniuk, 2008; Bosyi et al., 2020; Arseniev, 2009).

Підвищення енергоефективності ТН, які використовують геотермальну теплоту, в наш час є одним із найважливіших питань для подальшого розвитку та впровадження технологій застосування відновлювальних джерел енергії в системах теплопостачання для підприємств агропромислового комплексу (Bosyi, 2022; Moroziuk, 2006).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найбільші енергетичні компанії займаються проектуванням, виготовленням і впровадженням ТН. Забезпечення енергетичної безпеки України і пошук шляхів поліпшення

екологічної ситуації є головним питанням впровадження ТН. Досвід зарубіжних країн, таких як Англія, Франція, Японія, Швеція, Фінляндія, Німеччина та інших доводить доцільність застосування ТН. При проектуванні та реконструкції сучасних систем теплопостачання необхідно враховувати можливість використання технологій ТН. Застосування ТН в комплексі з традиційною схемою теплопостачання для систем опалення, кондиціонування і вентиляції великих об'єктів агропромислових підприємств забезпечує повну автономність зон регулювання та істотну економію паливно-енергетичних ресурсів навіть при використанні традиційних джерел енергії (Bosyi & Kuzyk, 2020; Bosyi, 2022).

Термодинамічний цикл теплового насосу аналогічний холодильній машині, але навпаки. У теплому насосі конденсатор є теплообмінним апаратом, що виділяє теплоту для споживача, а випарник – теплообмінним апаратом, що утилізує низькопотенційну теплоту: вторинні енергетичні ресурси і нетрадиційні поновлювані джерела енергії. Залежно від принципу роботи ТН поділяються на компресійні і абсорбційні. Компресійні теплові насоси завжди приводяться в дію за допомогою механічної енергії (електроенергії), у той час, як абсорбційні ТН можуть також використовувати теплоту в якості джерела енергії (за допомогою електроенергії або палива). Найбільше розповсюдження отримали компресійні ТН (Morozuk, 2006; Tkachenko & Ostapenko, 2009).

Схема парокомпресійного теплового насоса наведена на рис. 1.

**Постановка завдання.** Метою статті є обґрунтування та дослідження доцільності використання ТН на підприємствах агропромислового комплексу.

**Матеріали і методи дослідження.** Залежно від джерела відбору низькопотенційної теплоти ТН поділяють на: геотермальні ґрунтові (ґрунт-вода), водяні (вода-вода) та повітряні (повітря-вода), а також ТН, які використовують вторинну теплоту.

Геотермальний ТН з вертикальним контуром (система «ґрунт-вода»), є ідеальним варіантом за всіма показниками: короткий контур, найбільш висока температура навколишнього середовища, як наслідок

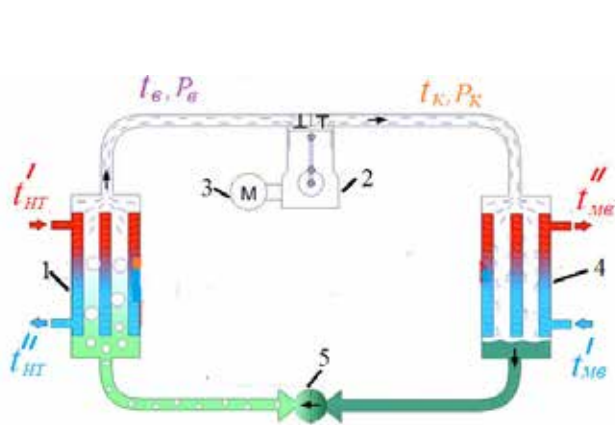


Рис. 1. Схема парокомпресійного ТН:  
1 – випарник; 2 – компресор; 3 – електродвигун;  
4 – конденсатор; 5 – дросель

висока ефективність роботи. Один метр труби підводного контуру дорівнює 30 Вт теплової енергії. Для отримання 10 кВт теплоти, потрібно 330 метри контурної труби. Це найбільш дешевий варіант, але є вимоги по мінімальній глибині.

Розглянемо геотермальний ТН з притопленим контуром (система «вода-вода»). Ґрунтові води є кращим джерелом енергії завдяки тому, що навіть в зимовий час температура цього ресурсу не опускається нижче від'ємної позначки та знаходиться в діапазоні від +5 до +15 °С. ТН, які отримують енергію від ґрунтових вод, мають найбільш високий ККД. Проходячи через нього, вода віддає свою теплоту (Arsenev & Hrechanenko, 2002).

Принципова схема парокомпресійного теплового насоса «ґрунт-вода» наведена на рис. 2.

Повітряні ТН використовують як джерело низькопотенційної теплової енергії повітря. Причому джерелом теплоти може бути не тільки зовнішнє (атмосферне) повітря, а й витяжне вентиляційне повітря (загальнообмінної або місцевої) вентиляції будівель підприємств агропромислового комплексу. Даний агрегат не вимагає монтажу підземного чи підводного контуру. Як правило, установки даного типу використовуються в тому випадку, коли інші варіанти відбору теплоти не можуть бути реалізовані. Теплова енергія повітря використовується до позначки -15 °С. Якщо вдарили сильні морози, і температура нижче цього показника, за справу в загальному випадку береться додатковий теплогенератор, а для ТН Heloitem, які мають робочий діапазон температур від -25 до +45 °С додатковий теплогенератор не потрібний (Bosyi et al., 2022). Існують також повітряні ТН, які відбирають низькопотенційну теплоту з повітря і використовують її для обігріву приміщень в будинку за допомогою повітряної каналної системи (система «повітря-повітря»). Особливість даного типу повітряного ТН в тому, що вони працюють або в режимі нагріву, або в режимі охолодження. Повітряне опалення можна використовувати в офісних будівлях, торгових центрах, промислових і складських приміщеннях, а також на підприємствах агропромислового комплексу (Bosyi et al., 2022).

Далі розглянемо ТН, які використовують вторинну

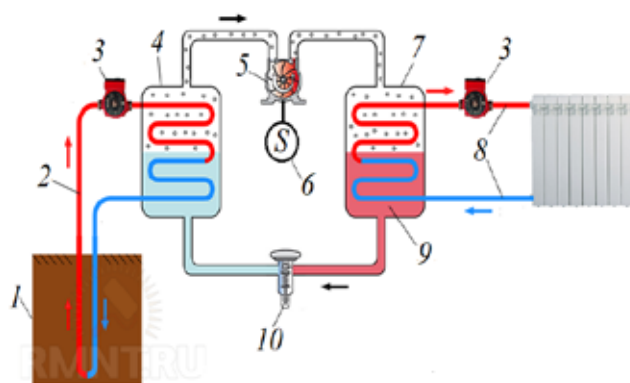


Рис. 2. Принципова схема ТН «ґрунт-вода»  
1 – ґрунт; 2 – розсіп; 3 – насос; 4 – випарник;  
5 – компресор; 6 – електродвигун; 7 – конденсатор;  
8 – система опалення; 9 – холодоагент R290;  
10 – дросель

теплоту (наприклад, теплоту трубопроводу центрального опалення, вентиляційні викиди тощо). Подібний варіант є найбільш доцільним для промислових об'єктів, де є джерела скидної теплоти, які вимагають утилізації. Одним з найефективніших джерел даного типу є використання відпрацьованої теплоти повітряних та холодильних компресорів, оскільки вона має високу температуру. За останні роки в різних засобах масової інформації, включаючи Інтернет видання, з'явилися численні публікації, що стосуються використання технології ТН в системах опалення і гарячого водопостачання об'єктів різної сфери – від окремих будинків до житлових мікрорайонів. Внаслідок зниження питомих тепловтрат будівлі актуальною стала тематика низькопотенційних систем опалення.

Загальні переваги, недоліки і особливості експлуатації ТН. Основною перевагою ТН є можливість перемикання з режиму опалення взимку на режим кондиціонування влітку: замість радіаторів до зовнішнього колектору підключаються фанкойли або система «холодні стелі» (Moroziuk, 2006; Tkachenko & Ostapenko, 2009; Bosyi et al., 2022).

ТН надійний, його роботою керує автоматика. ТН компактний (його модуль за розмірами не перевищує звичайний холодильник) і практично безшумний. До недоліків геотермальних ТН, які використовуються для опалення, слід віднести велику вартість монтажу зовнішніх підземних або підводних теплообмінних контурів. Період окупності ТН становить 4–6 років, при терміні служби 15–20 років до капітального ремонту. Реальні значення ефективності сучасних ТН становлять близько  $COP = 2,0$  при температурі джерела  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  і порядку  $COP = 5,0$  при температурі джерела  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  призводить до того, що для забезпечення заданого температурного режиму споживача при низьких температурах повітря необхідно використовувати обладнання зі значною надлишковою потужністю, що пов'язане з нераціональним використанням капіталовкладень (втім, це стосується і будь-яких інших джерел теплової енергії). Всі, навіть найефективніші ТН нагрівають воду в системі опалення не більше  $+62\dots+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ , причому, чим вище температура води, що нагрівається, тим менше ефективність і надійність ТН. Якщо теплоти із зовнішнього контуру все ж недостатньо для опалення в сильні морози, практикується експлуатація ТН в парі з додатковим генератором теплоти (в таких випадках це використання бівалентної схеми опалення). Коли вулична температура опускається нижче розрахункового рівня (температури бівалентності), в роботу включається другий генератор теплоти – найчастіше невеликий електронагрівач, рідше газовий або твердопаливний котли. Оптимальна потужність теплонасосної установки становить 60-70% від необхідної встановленої потужності, що також впливає на закупівельну вартість установки опалення ТН. В цьому випадку ТН забезпечує не менше 95 % потреби споживача в тепловій енергії за весь опалювальний період. При такій схемі середньосезонний коефіцієнт перетворення енергії для кліматичних умов України дорівнює порядку  $COP = 3$  (Bosyi et al., 2022; Bosyi et al., 2021).

Наявні ресурси теплової енергії довкілля багаторазово перевищують прогнозований рівень споживання

всіма секторами промисловості, особливо в агропромисловому виробництві України. На сьогоднішній день для вирішення проблем енергозбереження ТН є найбільш перспективним серед джерел нетрадиційної енергетики. Використання відновлювальних джерел енергії дає можливість обмежити використання традиційних палив, зменшити забруднення довкілля. Температурні рівні основних джерел теплоти наступні: зовнішнє повітря  $+5\dots+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , витяжна вентиляція  $+15\dots+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , озерна вода  $0\dots+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , річкова вода  $0\dots+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , морська вода  $+3\dots+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ґрунт  $0\dots+12\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ґрунтові води  $>10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , геотермальна вода  $+20\dots+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Tkachenko & Ostapenko, 2009).

Розглянемо встановлення ґрунтового ТН на прикладі агропромислового підприємства. На підприємстві знаходяться дві опалювальні будівлі адміністративно-побутового (опалювальний об'єм  $6473\text{ м}^3$ ) та господарського корпусів (опалювальний об'єм  $8287\text{ м}^3$ ), крім цього в адміністративно-побутовому корпусі також присутня система гарячого водопостачання. Необхідна теплова потужність ТН на  $1\text{ м}^3$  опалювального об'єму становить  $80\text{ Вт/м}^3$ , для гарячого водопостачання при витраті на 1 людину 50 літрів води при температурі  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $800\text{ Вт/людину}$ . Теплове навантаження адміністративно-побутового корпусу становитиме  $354\text{ кВт}$  (з них на гаряче водопостачання  $18\text{ кВт}$ ), господарсько корпусу –  $745\text{ кВт}$ . Тому для даного підприємства найбільш актуальним буде встановлення ґрунтового ТН.

Наступний приклад – це адміністративна будівля агропромислового підприємства. Опалюваний об'єм будівлі становитиме  $2635\text{ м}^3$ . Теплове навантаження системи опалення становитиме  $50,0\text{ кВт}$ , системи гарячого водопостачання –  $5\text{ кВт}$ , сумарне  $55\text{ кВт}$ . Враховуючи географічне розташування агропромислової будівлі, особливості ландшафту, правила пожежної безпеки та ін. для покриття теплового навантаження даної будівлі найбільше підходить ТН Heliotherm Solid Split (повітря-вода) потужністю  $55\text{ кВт}$  (Sirko et al., 2020).

**Результати досліджень.** У процесі роботи ТН компресор споживає електроенергію. Співвідношення теплової енергії, що виробляється і електричної, яка споживається називається коефіцієнтом трансформації (або коефіцієнтом продуктивності (англ.  $COP$  – скор. від coefficient of performance) і є показником ефективності ТН (Tkachenko & Ostapenko, 2009; Arsenev et al., 2002; Bosyi et al., 2022).

Для розрахунку  $COP$  використовується наступний вираз

$$COP = Q/E, \quad (1)$$

де  $Q$  теплота, отримана з системи, Дж;  $E$  – отримана електроенергія, Дж;  $C_v$  – питома масова теплоємність рідини в циклі опалення, Дж/кг·К;  $m$  – маса теплоносія, кг;  $\Delta t$  – різниця температур теплоносія до і після віддачі теплової енергії, К.

$$Q = m \cdot C_v \cdot \Delta t, \quad (2)$$

де  $C_v$  – питома масова теплоємність рідини в циклі опалення, Дж/кг · К;  $m$  – маса теплоносія, кг;  $\Delta t$  – різниця

температур теплоносія до і після віддачі теплової енергії, К.

$$E = U \cdot I \cdot t, \quad (3)$$

де  $U$  – напруга, В;  $I$  – струм, А;  $t$  – час, год.

З рівняння (2) і (3) розраховуємо  $Q$  і  $E$ :

$$Q = 1000 \cdot 4,19 \cdot 40 = 167600 \text{ кДж} = 46,55 \text{ кВт} \cdot \text{год}; \quad (4)$$

$$E = 0,380 \cdot 122 \cdot 0,27 = 12,51 \text{ кВт} \cdot \text{год}. \quad (5)$$

Коефіцієнт трансформації COP ТН розраховуємо за рівнянням (1)

$$\text{COP} = 46,55/12,51 = 3,72. \quad (6)$$

Тобто, при температурі ґрунту 10 °С на кожний кіловат електричної енергії ми отримуємо 3,72 кВт теплової енергії.

ТН характеризуються вищою ефективністю ніж усі традиційні технології на ринку теплопостачання. Для порівняння: газовий котел, при споживанні 1 кВт електроенергії зможе виділити близько 0,9 кВт теплоти, тоді як ТН справляється з цим завданням, демонструючи віддачу в 4 кВт теплоти. Такий результату полягає в тому, що обладнання ТН не виробляє теплоту, а переносить її (Bosyi et al., 2022; Bosyi et al., 2021).

Проведемо дослідження термодинамічної ефективності ТН при різних значеннях температури зовнішнього джерела теплоти – ґрунту табл. 1.

Аналіз енергоефективності ПКТН «ґрунт-вода», провадився для робочого тіла холодоагента R290. Для R290 температура випаровування становить  $t_g = 2...5$  °С, а конденсації –  $t_k = 67$  °С. Вибираємо низькопотенційне джерело теплоти – ґрунт, на вході у випарник має температуру  $t'_{нт} = 8...12$  °С, а на виході з нього  $t''_{нт} = 4...8$  °С. Температура мережевої води (теплоносія) на вході в конденсатор становить  $t'_{мв} = 35$  °С, а на виході з нього –  $t''_{мв} = 55$  °С.

**Обговорення.** З проведених вище термодинамічних розрахунків і наведених даних в табл.1. видно, що показники ефективності роботи циклу теплового насоса «ґрунт-вода», коефіцієнт перетворення COP і ексергетичний ККД суттєво залежить від середньотермодинамічних температур входу і виходу теплоти, а також довкілля. Проведений термодинамічний аналіз впливу температур на ефективність теплового насоса «ґрунт-вода» дозволяє прогнозувати оптимальні температурні режими його роботи.

**Висновки.** Використання ТН для теплопостачання підприємств агропромислового комплексу передбачає лише оплату за електроенергію на роботу та технічне обслуговування установки при порівнянні з витратами на центральне опалення та роботу газових або електричних котлів аналогічної потужності, яка в декілька разів менша. Впровадження ТН є перспективним напрямком використання альтернативних джерел енергії для забезпечення потреб систем опалення, вентиляції та гарячого водопостачання підприємств агропромислового комплексу, але даний процес суттєво залежить від місцезнаходження об'єкта та наявності доступу до певного оптимального для нього джерела низькопотенціальної теплової енергії. Незважаючи на свою ефективність ТН (особливо повітряні) далеко не завжди повноцінно покривають теплове навантаження будівель в сильні морози, тому необхідно поєднувати їх експлуатацію з додатковим джерелом теплоти: електричним, газовим або твердопаливним котлом, які будуть вмикатися при досягненні вуличної температури певного критичного значення (точки бівалентності). Найефективнішим джерелом низькопотенціальної теплової енергії є теплота ґрунту, оскільки значення температури знаходиться в межах +8...+12 °С протягом року, коефіцієнт перетворення ТН при цьому становить 3,67 а ексергетичний коефіцієнт 43 %. Тому, найбільшим потенціалом з природних низькотемпературних джерел теплоти є теплота ґрунту.

Таблиця 1

Термодинамічний розрахунок ТН «ґрунт-вода»

Параметр	Розмірність	Розрахункові значення
Температура випаровування R290, $T_B$	К	275
Ентальпія R290 після випарника, $h_1$	кДж/кг	540
Тиск R290 у випарник, $p_B$	МПа	0,48
Температура конденсації R290, $T_K$	К	340
Ентальпія R290 після конденсатора, $h_3$	кДж/кг	220
Тиск конденсації R290, $P_K$	МПа	2,75
Ентальпія R290 на вході в компресор, $h_1$	кДж/кг	540
Ентальпія R290 після компресора, $h_2$	кДж/кг	660
Ентальпія R290 перед випарником, $h_4$	кДж/кг	220
Питоме теплове навантаження випарника, $q_B$	кДж/кг	320
Питоме теплове навантаження конденсатора, $q_K$	кДж/кг	440
Робота стиснення в компресорі, $l_{ст}$	кДж/кг	120
Перевірка теплового балансу ТН, $q_{тб.тн}$	–	440
Коефіцієнт перетворення теплоти, COP	–	3,67
Ексергетичний ККД ТН, $\eta_{ек}$	–	0,43

### Бібліографічні посилання:

1. Pro vnesennia zmin do Zakonu Ukrainy "Pro teplopостachannia" shchodo stymulivannia vyrobnytstva teplovoi enerhii z alternatyvnykh dzherel enerhii": Zakon Ukrainy vid 21.03.2017. №1959-VIII". [On Amendments to the Law of Ukraine "On Heat Supply" Regarding the Stimulation of the Production of Thermal Energy from Alternative Energy Sources": Law of Ukraine dated March 21.03.2017. No. 1959-VIII]. *Information of the Verkhovna Rada (VVR)*. 2017. No. 17. Art. 207 (in Ukrainian).
2. Maliarenko, V. A., & Lysak L. V. (2004). Enerhetyka, dokillia, enerhozberezhennia [Energy, environment, energy saving]. H: Rubicon. 368 p. (in Ukrainian).
3. Bezrodnyi, M. K., Pukhovyi, I. I., & Kutra, D. S. (2013). Teplovi nasosy ta yikh vykorystannia [Heat pumps and their use]. Tutorial. Kyiv: NTUU "KPI" 312 p. (in Ukrainian).
4. Ostapenko, O. P. (2015). Kholodylna tekhnika ta tekhnolohiia. Teplovi nasosy [Refrigeration equipment and technology. Heat pumps]. Tutorial. Vinnytsia: VNTU. 123 p. (in Ukrainian).
5. Arseniev, V. M., & Meleichuk, S. S. (2018). Teplovi nasosy: osnovy teorii i rozrakhunku [Heat pumps: basics of theory and calculation]. Tutorial. Sumy: SDU. 364 p. (in Ukrainian).
6. Arsenev, V. M. (2009). Teplonasosnaya tekhnologiya yenergozberezhennya [Heat pump energy saving technology]. Sumy: Type of SDU. 251 p. (in Russian).
7. Bosyi, M. V., & Kuzyk, O. V. (2022). Teplovi nasosy dlia opalennia ta hariachoho vodopostachannia [Heat pumps for scorching and hot water supply]. Findings of modern engineering research and developments: Scientific monograph. Riga, Latvia: «Baltija Publishing». P. 24-40 (in Ukrainian).
8. URL:<http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/book/217>
9. Pisarev, V. Ie. (2002). Teplovi nasosy ta kholodylni ustanovky [Heat pumps and refrigeration units]. Tutorial. K: KNUBA. 124 p. (in Ukrainian).
10. Sniezhkin, Yu. F., Chalaiev, D. M., Shavrin, V. S., & Dabizha, N. O. (2008). Teplovi nasosy v systemakh teplokhodopostachannia [Heat pumps in heating and cooling systems]. Under. ed. Acad. NAS of Ukraine A.A. Dolinskyi; National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Technology thermophysics. To: 104 p. (in Ukrainian).
11. Bezrodnyi, M. K., & Prytula, N. O. (2012). Enerhetychna efektyvnist teplonasosnykh skhem teplopостachannia [Energy efficiency of heat pump schemes of heat supply]. monograph. K: NTUU "KPI". 208 p. (in Ukrainian).
12. Shevel, V. Y. (2004). Rabota kompressorov seriinogo ispolneniia na smeci propan–butan v teplonasosnom rezhime raboti [Operation of series compressors for propane-butane oil in the heat pump mode]. Kompressornaia tekhnika y pnevmatyka v KhKhl veke: KhIII Mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia po kompressorostroenyiu. Sums: SumHU. P. 239–244 (in Russian).
13. Khmelniuk, M. H., & Martyniuk, M. O. (2008). Povishenie effektivnosti ustanovki nizkotemperaturnoi kondensatsiui prirodnoho gaza [Increasing the efficiency of a low-temperature natural gas condensation installation]. Odessa: ODAH. Technical gases. № 4. P. 30–35 (in Russian).
14. Bosyi, M. V., & Kuzyk, O. V. (2020). Efektyvnist tsykladu teplovoho nasosa dlia teplopостachannia [Efficiency of the heat pump cycle for heat supply]. *Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*. Vol. 3(34). P. 136–142. (in Ukrainian). URL: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/10447>
15. Bosyi, M. V. (2022). Termodynamichna enerhoefektyvnist heotermalnoho teplovoho nasosa na hruntovykh vodakh [Thermodynamic energy efficiency of a geothermal heat pump on groundwater]. *Moderní aspekty vědy: XX. Díl mezinárodní kolektivní monografie / Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika: Publishing Group. "Vědecká perspektiva"* P. 556–568 (in Ukrainian). URL: [http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36\\_1.html](http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36_1.html)
16. Bosyi, M. V. (2022). Teplovi nasosy – enerhoefektyvne vidnovliuvalne ekolohichno chyste dzherelo teploty [Thermal pumps are energy efficient, environmentally friendly, and provide warmth]. *Moderní aspekty vědy: XXI Díl mezinárodní kolektivní monografie Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika: Publishing Group "Vědecká perspektiva"* P. 357–380. (in Ukrainian). URL:<http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/monography-21.pdf>
17. Moroziuk, T. V. (2006). Teoriya kholodilnikh mashin i teplovikh nasosov [Theory of refrigeration machines and heat pumps]. Odessa: Studio "Negotiant". 712 p. (in Russian).
18. Tkachenko, S. I., & Ostapenko, O. P. (2009). Parokompresiini teplonasosni ustanovky v systemakh teplopостachannia [Steam compression heat pump installations in heat supply systems]. Monograph. Vinnytsia: VNTU. 176 p. (in Ukrainian).
19. Arsenev, V. M., & Hrechanenko, V. A. (2002). Eksergeticheskaya otsenka effektivnosti teplonasosnoi tekhnologii energosberezhenii [Exergetic evaluation of the efficiency of heat pump technology energy-saving]. *Bulletin of Sumy State University*. № 9 (42). P. 81–85. (in Russian).
20. Bosyi, M. V., Kropivnyi, V. M., Kuzyk, O. V., Kropivna, A. V., & Molokost, L. A. (2022). Termodynamichna enerhoefektyvnist parokompresiinoho teplovoho nasosa na hruntovykh vodakh [Thermodynamic energy efficiency of a vapor compression heat pump on groundwater]. *Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences. Kropyvnytskyi*. Vol. 5(36). P. 47–54. (in Ukrainian).
21. URL: [http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36\\_1.html](http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36_1.html)
22. Bosyi, M. V., Kropivnyi, V. M., & Kuzyk, O. V. (2022). Termodynamichne doslidzhennia tsykladu teplovoho nasosa «hrunt-voda» dlia systemy opalennia prymishchennia [Thermodynamic study of the soil-water heat pump cycle for the room heating system]. *Scientific journal Visnyk of the Kremenchuk National University named after M. Ostrogradskyi. Kremenchuk*: No. 1(132). P. 165–172. (in Ukrainian).
23. URL: <http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/pravila.php>

24. Sirko, Z. S., Korenda, V. A., Vyshniakov, I. Iu., Protasov, O. S., & Okhrimenko S. M., Tsiren N. L. (2020). Vykorystannia teplovykh nasosiv dlia opalennia ta hariachoho vodopostachannia budivel pidpriemstv na prykladi ustanovok Helioterm [The use of heat pumps for heating and hot water supply of enterprise buildings on the example of Helioterm installations]. *Scientific reports of NUBiP of Ukraine. Technology and energy of agricultural industry*. № 5 (87) (in Ukrainian).

25. Bosyi, M. V. (2022). Enerhetychna efektyvnist povitrianoho teplovoho nasosa na ekolohichno chystomu robochomu tili propani [The energy efficiency of an air heat pump based on an ecologically clean working medium of propane]. *Scientific journal "Scientific Notes of the Tavra National University named after V.I. Vernadsky". Series: Technical sciences*. Kyiv: Volume 33 (72), No. 4. P. 144–148. (in Ukrainian). DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/22>. URL: <https://tech.vernadskyjournals.in.ua/33-72-4>

26. Bosyi, M. V., Lysenko, A. Ia., Manuilovych, V. V., & Panishko, O. V. (2021). Efektyvnist tsykladu heotermalnoho teplovoho nasosa [Efficiency of the geothermal heat pump cycle]. The 5th International scientific and practical conference «Topical issues of modern science, society and education» (November 28–30) SPC «Sci-conf.com.ua». Kharkiv. Ukraine. P. 418–422. (in Ukrainian). URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/TOPICAL-ISSUES-OF-MODERN-SCIENCE-SOCIETY-AND-EDUCATION-28-30.11.21.pdf>

27. Bosyi, M. V., Lysenko, A. Ia., Manuilovych, V. V., & Barkar, M. M. (2021). Termodynamichna enerhoefektyvnist heotermalnoho teplovoho nasosa «voda-voda» [Thermodynamic energy efficiency of the water-to-water geothermal heat pump]. The 3rd International scientific and practical conference "Modern science: innovations and prospects" (December 5-7) SSPG Publish, Stockholm, Sweden. ISBN 978-91-87224-02-7. 1036 p. (in Ukrainian). URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/MODERN-SCIENCE-INNOVATIONS-AND-PROSPECTS-5-7.12.21.pdf>

28. Bosyi, M. V., Lysenko, A. Ya., Manuilovych, A. V., Panishko, O. V., & Barkar, M. M. (2022). Heotermalnyi teplovyi nasos «hrunt-voda» [Ground-water geothermal heat pump]. The 2nd International scientific and practical conference "Modern research in world science" (May 15–17) SPC "Sci-conf.com.ua". Lviv. Ukraine. ISBN 978-966-8219-86-3. P. 406–413. (in Ukrainian). URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/05/MODERN-RESEARCH-IN-WORLD-SCIENCE-15-17.05.22.pdf>

**Bosyi M. V.**, Lecturer, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

#### **Heat pumps for heat supply and hot supply of agricultural enterprises**

Currently, the changes taking place in the agro-industrial complex of Ukraine require the development and creation of the latest heat pump technologies for heat and hot water supply of agro-industrial enterprises. The article considers the problem of using heat pumps (TN) operating on alternative energy sources for heat and hot water supply of agro-industrial enterprises. In its work, TN uses low-potential heat, air, water bodies, and the subsoil of the earth. The purpose of the work is to substantiate and investigate the expediency of using TN at agro-industrial production enterprises. An analysis of the characteristics of TNs operating with various sources of low-potential heat was performed. The factors affecting the energy efficiency of TN are determined, the peculiarities of the operation of soil, water and air TN for agro-industrial enterprises of Ukraine are evaluated. The influence of the duration of air temperatures of different values on the thermal productivity of TN was analyzed. In order to increase the efficiency of the heat pump system, a scheme for selecting low-potential heat using soil TN is proposed. On the basis of the conducted research, it was established that the advantage of air as a heat carrier is that air heaters can work almost everywhere and do not require the arrangement of a low-temperature circuit. A promising way to increase the efficiency of the TN during the annual cycle of its operation is the combined use of low-potential heat of the soil and air. A heat pump system with two sources of energy ensures high thermal productivity of the heating system throughout the year and has a higher energy efficiency index compared to traditional solutions. TNs have a significant advantage over other thermal power plants. They consume energy from renewable sources, reduce electricity costs by more than half. It is a fully automated device. The use of TN for the disposal of low-potential heat flows is economically beneficial. The analysis of the efficiency of heat supply systems shows that in modern economic conditions, the trend of heat supply systems can develop in the following directions: the use of steam-compression heating systems, the use of secondary energy resources of industrial enterprises of the agro-industrial complex, and the improvement of the thermal characteristics of buildings. Modernization with the application of these measures can significantly improve the economic and technical characteristics of heat supply equipment for buildings of agro-industrial production.

**Key words:** heat pump, agro-industrial enterprises, thermodynamic cycle, thermal energy, low-potential heat source, heat supply systems, transformation coefficient.



## ТРАВМУВАННЯ І ЯКІСТЬ НАСІННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР ПІД ЧАС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЙОГО ПІДГОТОВЛЕННЯ

**Дерев'яно Дмитро Аксентійович**

доктор технічних наук, професор  
Поліський національний університет, м. Житомир, Україна  
ORCID: 0000-0001-8487-2153  
derevyanko.dmutro@gmail.com

**Поліщук Віктор Миколайович**

доктор технічних наук, професор  
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна  
ORCID: 0000-0002-9654-9051  
polishchuk@nubip.edu.ua

**Грудовий Роман Сергійович**

кандидат технічних наук, доцент  
Поліський національний університет, м. Житомир, Україна  
ORCID: 0000-0002-7273-9432  
derevyanko.dmutro@gmail.com

**Дерев'яно Олексій Дмитрович**

магістр  
Поліський національний університет, м. Житомир, Україна  
ORCID: 0000-0001-8487-2153  
derevyanko.dmutro@gmail.com

*У зв'язку із збільшенням кількості населення на нашій планеті у найближчі 20-30 років до 10 мільярдів осіб та погіршенням екологічного стану довкілля, тобто забруднення ґрунту, води, повітря, особливого значення набуває виробництво і забезпечення людей якісними продуктами харчування. Тому виробництво в Україні зерна в кількості 100 млн. тонн є важливим завданням державного значення. Для його виконання необхідною умовою є підготовка не менше 2,5 млн тонн високоякісного насіння, що в значній мірі залежить від наявності технічних засобів і технологічних можливостей вітчизняної агроінженерної галузі.*

*Головною метою досліджень ставиться отримання насіння високої якості за всіх технологічних процесів його підготовки від збирання до сівби шляхом зниження макро- та мікротравмування зернівок і вдосконалення оптимальних режимів роботи робочих органів різних технічних засобів, тобто конструкційних вдосконалень і модернізації.*

*В результаті досліджень встановлено, що травмування насіння під час технологічного процесу його підготовки залежить від кількості завантаження, властивостей компонентів, технічних характеристик технічних засобів і їх робочих органів, зокрема швидкості руху, обертання, кроку розміщення витків, діаметру, кута нахилу, матеріалу тощо.*

*При нахилі витків шнекового транспортера під час протруювання більше 15°, а обертання маси в камері під час проходження процесу із швидкістю більше 6 рад. с-1 кількість травмованих зернівок збільшується.*

*У перспективі подальшого дослідження впливу робочих органів різних технічних засобів за технологічних процесів підготовки насіння високої якості, необхідне їх проведення у комплексі та взаємозв'язку.*

**Ключові слова:** насіння, якість, рух, швидкість, кути нахилу, сила, мікротравмування, технічні засоби.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.2>

Постановка проблеми. У аграрному секторі економіки за кількістю виробленого зерна оцінюється сталий, економічний і стратегічний розвиток України. А з урахуванням прогнозу найближчих двох – трьох десятиріч років щодо зростання світової чисельності населення до 10 мільярдів чоловік, забезпечення їх якісними продовольчими товарами, де зерно-продукти відіграватимуть важливу роль, буде дуже серйозним завданням.

Наявність високородючих ґрунтів, високий рівень технічного та технологічного розвитку, вагомий кадровий

потенціал, потужна селекційна робота та інші позитивні фактори дають можливість виробляти біля 100 млн. тонн зерна, для цього необхідно забезпечити підготовку високоякісного насіння в межах 2,5 млн. тонн, що є актуальним з точки зору науки і практики.

Необхідно наголосити, що за останні 2–3 роки до 2022 року продукція рослинництва у нашій країні займала біля 80% від усієї сільськогосподарської продукції, із якої зернобобові займали біля 40%, а експортна реалізація у валютному еквіваленті перевищувала 30% валютного

прибутку країни, тому підготовки і засівання більше 10 млн площ зернових високоякісним насінням є важливим економічним і стратегічним завданням.

Адже саме якісне, високопродуктивне насіння поряд з іншими важливими факторами забезпечує формування більше 50% майбутнього врожаю. Але поряд із цим існує інша важлива реальність відставання із конструюванням та виробництвом нових, вітчизняних, сучасних, високопродуктивних технічних засобів та технологічних складових підготовки високоякісного насіння.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження (Vasilenko et al., 1985; Golovach et al., 2017) свідчать, що робочі поверхні технічних засобів під час технологічного процесу впливають на пошкодження насіння, а забезпечення поживними речовинами і травмування знижує якість насіння.

В роботах (Gamayunova et al., 2019; Gadzovsky et al., 2019) стверджується, що під час збирання зернових культур мікротравмування зернівок молотильними апаратами, особливо барабанного типу, сягає інколи більше 35%, що підтверджується даними інших вітчизняних і закордонних дослідників. Встановлено, що під час післязбирального оброблення зернового вороху і підготовки посівного матеріалу різними насіннеочисними машинами травмується більше 30% зернівок, а під час транспортування та завантаження мікротравмування насіння озимої пшениці зростає більше 20%, а озимого жита сягає інколи навіть 30% і більше.

Внаслідок суттєвого травмування зернівок відбувається швидкий розвиток мікроорганізмів, особливо таких як фузаріоз, гельмінтоспоріоз, септоріоз та плісневі грибки. Тому у взаємозв'язку, біологічні особливості, навколишнє середовище, мікротравмування та бактерії сприяють псуванню насіння і зниженню його якісних показників, особливо схожості, що при будь-яких наступних сприятливих обставинах приведе до зниження майбутнього врожаю.

В наступних роботах (Derevyanko et al., 2020; Zabrodin et al., 2018; Pospelov et al., 2019; Mellmann et al., 2019; Orobinsky et al., 2018; Vogatyreva et al., 2016; Pascoe et al., 2015; Tarasenko et al., 2009; Tishchenko et al., 2011) вказується, що забезпечення ґрунту поживними речовинами у повній відповідності щодо потреби всіх необхідних поживних елементів сприяє значному підвищенню якості насіння, а вплив робочих органів технічних засобів під час післязбирального оброблення і транспортування насіння сприяє його травмуванню в межах 20–30%, в залежності від інших діючих факторів.

**Метою досліджень** є покращення показників якості насіння зернових культур, особливо його схожості, маси натурі, наявності білка, клейковини шляхом зниження його травмування на всіх стадіях технологічних процесів від збирання до сівби та розроблення обладнання для реалізації цих процесів під час виробництва.

**Результати досліджень.** Під час технологічного процесу протруювання насіння озимої пшениці, жита або будь-якої іншої зернової культури, відбувається його транспортування шнековим транспортером у камеру змішування, де на деформацію і мікротравмування впли-

ває кут нахилу витків, зусилля притиснення до корпусу, обертання, дії відцентрової  $F_{відц}$  сили, сили ваги зернівки  $G$  та сили  $F_{тр}$  тертя із внутрішньою частиною корпусу та шнека. Дослідження показують, що кількість насіння, що транспортується гвинтовим транспортером у камеру протруєння має лінійну залежність до площі поперечного перерізу шнека. В такому випадку аналітична залежність розрахунку відповідного об'єму насіння буде пропорційна кроку розміщення витків, або коефіцієнту  $k$ , що виражає щільність насіння і відстані між витками, діаметру  $d$  та частоти обертання шнека  $n$ , м і об/хв.

$$V_n = k \cdot d \cdot n. \quad (1)$$

Під час обертання шнека на травмування зернівок діє сила тертя  $F_{тр}$  і відцентрова сила  $F_{відц}$  (рис.1).

Аналіз задачі теорії пружності, деформації і напружень у механіці сипучого середовища потребує, щоб до рівня рівноваги необхідно додати експериментальне обґрунтування присутності в кожній точці максимально напруженого стану, або дотримання критерію Кулона-Мора.

При такому статистичному визначенні системи, опис кількості насіння можна надати наступним виразом:

$$(\delta_x - \delta_y)^2 + \phi \cdot \tau_{xy}^2 = \sin^2 \phi (\delta_x + \delta_y + 2H)^2, \quad (2)$$

де  $\delta_x, \delta_y, \tau_{xy}$  – компоненти напружень у декартовій системі координат;  $H$  – опір розрідження;  $\phi$  – кут тертя внутрішніх робочих органів.

Таким чином нахилення витків, згідно цих розрахунків, сприяє зростанню зусилля притиснення насіння до внутрішньої частини корпусу, внаслідок чого інколи травмується 35–40% зернівок.

Аналітичним методом можемо визначити вплив кута у при взаємозв'язку коефіцієнта тертя зернівок із поверхнею шнека. Збільшення сили притиснення насіння до корпусу дорівнюватиме нулю, якщо  $\sin \gamma = \cos \gamma \tan \phi$ , якщо  $\gamma = \arctg \tan \phi$  і якщо перша частина практично не залежить від кута  $\gamma$  при допустимій межі 10–20°, (рис. 2).

Для забезпечення зменшення зусилля притиснення і мікротравмування насіння під час технологічного процесу його оброблення необхідно ретельно обробляти

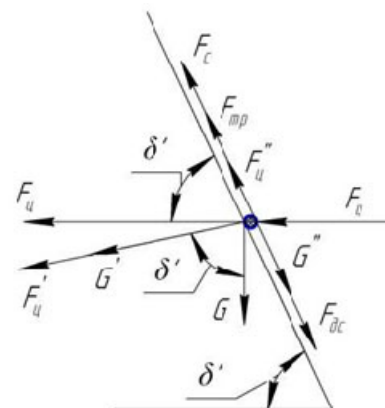


Рис. 1. Дія сил на насіння під час обертання гвинта шнека

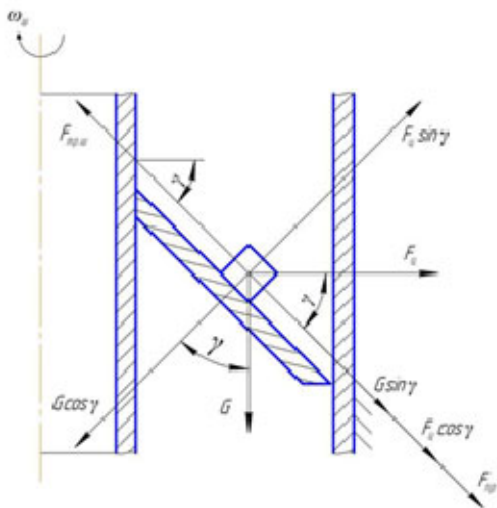


Рис. 2. Дія сил на зернівку при нахилених витках гвинта

поверхню гвинта шнека під час його виготовлення, щоб досягти коефіцієнта тертя 0,2–0,3, а кут нахилення витки відносно осі шнека повинен знаходитися в межах 10–15°. Якщо витки розміщені в таких параметрах, то обчислення критичної частоти обертання шнека проводимо за таким виразом:

$$n_{кр} \geq \frac{30}{\pi \sqrt{\frac{g(\sin \alpha + f_{ш} \cdot \cos \alpha)}{R \cdot f_k (\cos \alpha - f_{ш} \cdot \sin \alpha)}}}. \quad (3)$$

Тому зменшення критичної частоти обертання вертикального шнека із-за мінімального кута нахилу знижує притискання і відповідно травмування насіння (рис. 3).

Для підвищення ефективності процесу транспортування та зниження мікротравмування насіння гвинтовим шнеком, необхідно у його нижній частині встановити короткий наконечник із однією короткою лопатею і виготовлений з гуми, або пластмаси, тобто пом'якшувальних матеріалів.

Під час технологічного процесу протруювання насіння до завантаження в камеру, або після неї може

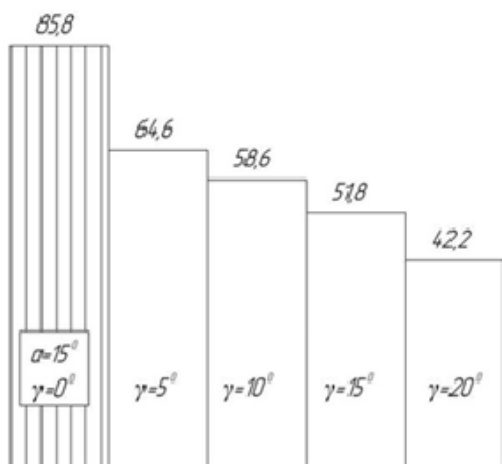


Рис. 3. Розподілення критичної частоти обертання гвинта шнека

накопичуватись у відповідних бункерах, де необхідно бокові стінки розмістити під оптимальним кутом нахилу. Від такого кута залежатиме сила тертя  $F_{тр}$  зернівок із стінками і відцентрової сили,  $F_{відц}$  (рис. 4).

Кут нахилу бокових стінок від якого залежить мікротравмування зернівок у місцях накопичення насіння під час протруювання отримаємо згідно наступного розрахунку:

$$\delta > \arctg \left( \frac{\omega_{ш}^2 \cdot R + g \cdot f_3}{g - \omega_{ш}^2 \cdot R \cdot f_3} \right), \quad (4)$$

де  $f_3$  – коефіцієнт тертя зернівок з внутрішніми стінками бункера накопичення насіння.

Під час потрапляння насіння в камеру протруювача при обертах диска-розподільника із швидкістю  $\omega=60$  об/хв. проходить зіткнення зернівок з внутрішніми стінками камери змішування, сила ударяння при цьому буде пропорційною масі, швидкості руху і оберненопропорційною часу, за який насіння сягає робочої поверхні. Рівняння руху матиме наступний вигляд:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_x \left( t, x(t), y(t), z(t), \frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt} \right); \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_y \left( t, x(t), y(t), z(t), \frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt} \right); \\ m \frac{d^2 z}{dt^2} = F_z \left( t, x(t), y(t), z(t), \frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt} \right). \end{cases} \quad (5)$$

де  $F_x, F_y, F_z$  – проекції на осі діючих сил, які надають прискорення зернівкам масою  $m$  за час  $\Delta t$  за який вони досягають стінки камери, що впливає на мікротравмування насіння під час технологічного процесу яке відбувається на різних ділянках, а саме під час завантаження, накопичення, змішування та розвантаження.

Застосуємо метод стохастичного моделювання з певним інтервалом часу, впродовж якого певна частина насіння проходить окрему частину шляху під час технологічного процесу. Такий час буде залежати від параметрів робочих органів, швидкості їх обертання, шляху руху

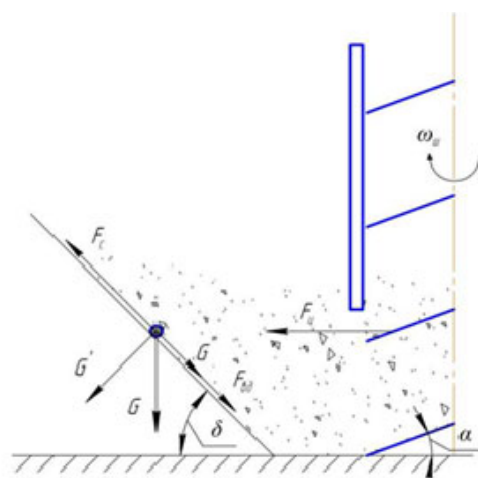


Рис. 4. Дія сил на зернівку біля внутрішніх стінок

насіння, висоти падання насіння зернівок, консистенції, в'язкості, вологості робочого органу і всієї насінневої маси, що протруюється.

Для моделювання динаміки руху під час цих процесів з урахуванням згаданих факторів застосовуємо нормальний закон ймовірності розподілення при падінні зернівок від часу і сили ударяння за щільністю розміщення.

Таким чином при моделюванні компоненти ударів  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  є функціями від часу  $t$ :  $F_x(t)$ ,  $F_y(t)$ ,  $F_z(t)$ , а розрахунок виконується у полярних координатах при допомозі комп'ютерного обчислення з використанням програмного забезпечення.

Мікротравмування насіння відбувається протягом повного обертання диска-розподільника, повного циклу роботи камери протруювача, за певний період часу, що розглядається під час стохастичного моделювання. Пружні та в'язкі властивості насіння у вологому робочому розчині є змінними, що суттєво впливає на характер деформації, травмування і якісні показники зернівок.

Для теоретичних розрахунків пружних та в'язких властивостей зернівок необхідні початкові умови значень параметру розмірності розсіювання зовнішнього впливу.

Дослідження деформації та травмування зернівок, що надано рівняннями, виконано способом чисельного їх розв'язку. Початкові розмірності деформації, це геометричні та вагові їх значення у вигляді радіуса  $r = 4,5-5,5$  мм і маси  $m = 0,04-0,06$  г.

Використавши програми файл-функції "ELIPS" проведено теоретичні розрахунки і побудовано графічні залежності, (рис. 5, 6, 7).

Аналіз рис. 5, 6, 7 показує, що широкою лінією надано результати моделювання сил, що сприяють травмуванню насіння, а ділянки напруження показують тонкі лінії. Коливання нормальних напружень, що чергуються з плавними та різкими перепадами пов'язано з пластичними, пружними і в'язкими властивостями зернівок, що проявляються у загальній вологій зерновій масі під час протруювання. Дисперсія сили  $F_z$  на вертикальну вісь, рис. 7, суттєво перевищує дисперсії проєкцій сил  $F_x$  і  $F_y$ , що є свідченням про переважання впливу висоти

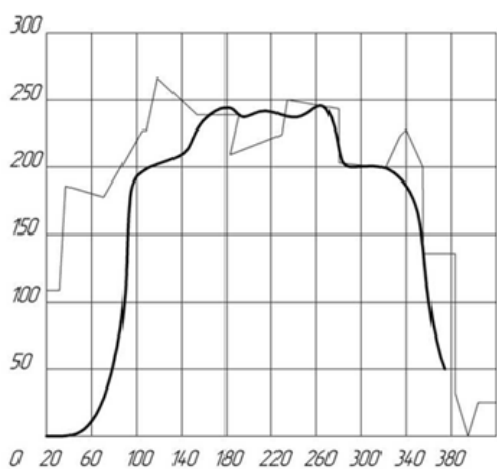


Рис. 5. Залежність від часу  $t$  напруження  $\delta_x(t)$  і сили  $F_x(t)$

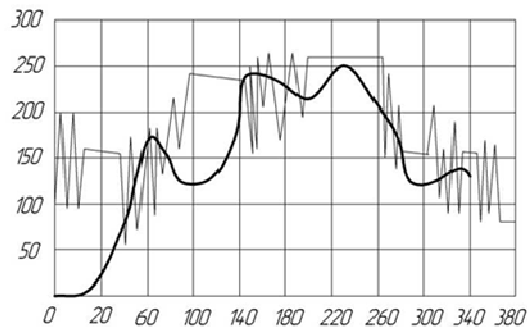


Рис. 6. Залежність від часу  $t$  напруження  $\delta_y(t)$  і сили  $F_y(t)$

падіння зернівок до дна камери порівняно із переміщенням маси в камері на мікротравмування.

**Висновки.** Під час технологічного процесу протруювання озимої пшениці Миронівська 65 експериментально встановлено, що маса 1000 зернівок знаходиться в межах 45–55 г, швидкість руху з диска в камеру становить біля 5,5 м/с, час переміщення до внутрішньої поверхні стінки камери коливається 0,001–0,002 с, висота падіння з диска діаметром 850 мм до дна камери становить 600 мм, а сила ударяння під час падіння зернівок становитиме біля 0,6–0,8 Н, що створюватиме сприятливі умови для мікротравмування насіння в кількості 6–6,5%, інколи навіть і більше.

Зменшення сили руху  $F_p$  в камері протруювача менше 1 Н і збільшення сили опору до 2–3 Н, сприятиме зменшенню мікротравмування на 2,1–2,4%, що забезпечить покращення якісних показників насіння.

Аналіз розрахунків мікротравмування насіння під час завантаження в накопичувальний бункер показує пряму залежність можливого мікротравмування від кількості насіння, його біологічних властивостей, щільності, кроку і нахилення витків до корпусу, діаметра і частоти обертання диска-розподільника насіння, сил притиснення зернівок до внутрішніх стінок корпусу.

При обертах диска-розподільника 60 об/хв насіння рухаючись ударяється між собою та із стінками камери,

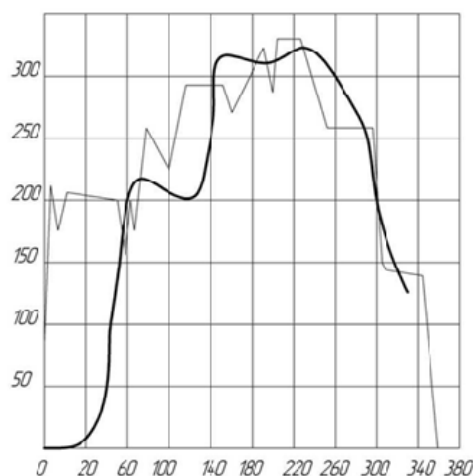


Рис. 7. Залежність від часу  $t$  напруження  $\delta_z(t)$  і сили  $F_z(t)$

травмується, а сила ударяння при цьому пропорційна масі насіння, швидкості руху і оберненопропорційна часу.

Дослідженнями встановлено, що під час перемішування насіння із вологим робочим розчином, у складі води, ядохімікатів-протруювачів і насіння, травмування зернівок проявляється через 3–4 хвилини від початку

проходження процесу, тобто від завантаження і перемішування від взаємозіткнення, взаємоударяння і ударяння із стінками камери. Мікротравмування негативно впливає на показники якості насіння, особливо на його схожість, що в свою чергу знижує врожайність будь-якої зернової культури.

#### **Бібліографічні посилання:**

1. Vasilenko, P.M., Pogorely, L.V. (1985). Fundamentals of scientific research. Kyiv, Higher school. 266.
2. Golovach, I.V., Derevyanko, D.A., Derevyanko, O.D. (2017). Injury of seeds during drying by technical means. All-Ukrainian scientific and technical journal. VNAU. 1 (96). 78–82.
3. Gamayunova, V.V., Kasatkina, T.O. (2019). Influence of optimization of nutrition of spring barley on formation of grain quality in the conditions of the Southern Steppe of Ukraine. Scientific Horizons. 10 (83), 3–12. doi: 10.33249/2663-2144-2019-83-10-3-12
4. Gadzovsky, G.L., Lemeshik, A.V., Novitskaya, N.V. (2019). Influence of injury on sowing qualities of seeds. For results II-th All-Ukrainian Scientific Internet Conference: Innovative technologies in crop production (May 15, 2019, Kamenets-Podolsky, Ukraine), 23.
5. Derevyanko, D.A., Derevyanko, O.D. (2020). Theory and experiments of injury and seed quality: a monograph. ZhNAEU. 559.
6. Derevjanko, D., Holovach, I., Bulgakov, V., Ihnatiev, Ye., Nozdrovický, L. (2020). Mathematical model of uniform cereal crops seeding using a double-disk coultter. Acta Technologica Agriculturae. 23 (4). 195-200. doi: 10247/ata-2020-0031
7. Zabrodin, V.P., Butenko, A.F., Sukhanova, M.V., Cheptsov, S.M. (2018). Investigation of the impact of a mechanical device on winter wheat seeds. Agricultural machines and technologies. 12 (2). 14–18. doi: 10.22314/2073-7599-2018-12-2-14-18
8. Pospelov, S.V., Pospelova, G.D. (2019). Evaluation of sowing qualities of echinacea seeds depending on their injury. ScienceRise. 2-3 (55-56). 25-30.
9. Mellmann, J., Weigler, F., Scaar, H. (2019). Research on procedural optimization and development of agricultural drying processes. Drying technology. 5. 569–578. doi: 10.1080/07373937.2018.1494186.
10. Orobinsky, V.I., Gievsky, A.M., Schwartz, A.A., Baskakov, I.V., Chernyshov, A.V. (2018). Improving the efficiency of apparatus of exact seeding of small-seeded crops. Journal of Fundamental and Applied Sciences. 10 (5S). 1226–1241. doi: 10.4314/jfas.v10i5s.103.
11. Bogatyreva, E.N., Seraya, T.M., Biryukova, O.M., Kirdun, T.M., Belyavskaya, Y.A. (2016). Factors for conversion of grain and seeds into by-products and the content of basic nutrients in by-products of agricultural crops in the Republic of Belarus. Soil science and agrochemistry. 2 (57). 78-89.
12. Pascoe, R.D., Fitzpatrick, R., Garratt, J.R. (2015). Prediction of automated sorter performance utilising a Monte Carlo simulation of feed characteristics. Minerals Engineering. 72. 101–107. doi: 10.1016/j.mineng.2014.12.026.
13. Tarasenko, A.P., Orobinsky, V.I., Gievskiy, A.M., Sundev, A.A. (2009). Qualitative indicators of the Pektus seed cleaning plant. Bulletin of VGAIU, 2 (21).
14. Tishchenko, L.N., Olshansky, P.P., Olshansky, S.V. (2011). Vibroscreen separation of grain mixtures. Kharkiv, Ukraine: Miskdruk, 2011. 280.

**Derevjanko D. A.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Polissia National University, Zhytomyr, Ukraine

**Polishchuk V. M.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**Grudovy R. S.**, Candidate of Technical Sciences, Assistant of Professor, Polissia National University, Zhytomyr, Ukraine

**Derevjanko O. D.**, Master, Polissia National University, Zhytomyr, Ukraine

#### **Injury and quality grain crops seed during the technological process of the preparation**

*The production and provision of people with quality food becomes especially important due to the increase in population of the planet in the next 20-30 years to 10 billion people and the deterioration of the ecological state of the environment namely the pollution of soil, water and air. Therefore, the production of 100 million tons of grain in Ukraine is an important task of nationwide scale. A prerequisite for its implementation is the preparation of at least 2.5 million tons of high quality seeds which largely depends on the availability of technical facilities and technological capabilities of the national agro-engineering branch.*

*The main purpose of the research is to obtain high quality seeds for all technological processes of their preparation from harvesting to sowing by reducing grain macro- and micro-traumas and improving the optimum performance of various technical means namely design improvements and modernization.*

*As a result of research it is established that injury of seeds during technological process of their preparation depends on quantity of loading, properties of components, technical characteristics of technical means and their working bodies, in particular speed of movement, rotation, placement of turns, diameter, angle, material, etc.*

*The number of injured grains increases when tilting the turns of the auger conveyor during mordanting more than 15 ° and the rotation of the mass in the cabinet during the process at a speed of more than 6 rad. s-1.*

*In the direction of future research of the working bodies of various technical means influence on the technological processes of high quality seeds preparation, it is necessary to conduct them in a complex and interconnected way.*

**Key words:** seeds, quality, movement, speed, angles of slope, force, micro-traumas, technical means.

## АНАЛІЗ КІНЕМАТИКИ РУХУ ПОЛЬОВИХ АГРЕГАТІВ ЗІ ВСІМА КЕРОВАНИМИ КОЛЕСАМИ

**Довжик Михайло Якович**кандидат технічних наук, професор  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0000-0002-1627-4888  
dovgukm@ukr.net**Сіренко Юлія Володимирівна**доктор філософії, старший викладач  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0000-0003-1818-3653  
sirenko.ula2018@gmail.com**Калнагуз Олексій Миколайович**старший викладач  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0000-0003-1710-8416  
fakyltet-mex@ukr.net

*Рух агрегатів по кривих – найскладніший елемент руху в польових умовах.*

*Основна частина часу робіт польових агрегатів присвячена криволінійному руху, коли траєкторія змінюється за бажанням водія або в наслідок зовнішніх збурень, або в наслідок зміни деяких параметрів під час руху. Траєкторія колісної машини – це траєкторія її кінематичного центру. Не має принципової відмінності між трактором і автомобілем, так як функціональні якості під час криволінійного руху однакові. В даний час теоретичні та експериментальні методи дослідження криволінійного руху не в достатній мірі розроблені для колісних та тракторних поїздів при виконанні робіт.*

*Метою наукового дослідження є аналіз кінематики криволінійного руху енергетичних засобів зі всіма керованими колесами в складі польових агрегатів на розворотних смугах. В аналізі літературних джерел використовувались методи теоретичного аналізу математичних моделей кінематики неусталеного руху польових агрегатів, систематизація параметрів, послідовний аналіз характеристик. У багатьох статтях світових науковців зроблено спроби отримати рівняння траєкторії криволінійного руху польових агрегатів з отриманням математичних моделей криволінійного руху, але вони надто складні для використання їх на практиці.*

*Колісна машина з керованими передніми і задніми осями, при однакових кутах повороту відповідних коліс, може забезпечити в два рази менший радіус, ніж колісна машина з однією керованою віссю. Це призводить до скорочення необхідної ширини поворотної смуги, збільшенню довжини гонів, підвищенню продуктивності роботи агрегату, значному зменшенню кількості пошкоджених рослин на засіяних поворотних смугах, зменшенню механіко-технологічних властивостей ґрунту.*

*У висновках наукового дослідження наведена необхідність створення математичних рівнянь, які описують криволінійний рух польових агрегатів зі всіма керованими колесами, які більш прості і придані для використання на практиці та для моделювання будь-яких видів розворотів при виконанні робіт сільськогосподарського призначення.*

**Ключові слова:** рух по криволінійним траєкторіям, машинний агрегат, кінематика руху, поворот, траєкторія.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.3>

**Вступ.** Однією з найважливіших сучасних завдань тракторобудування є автоматизація управління агрегатами. Трактори рухаються траєкторіями, які мають як криволінійний напрямок зі змінним значенням кривизни, так і прямолінійний характер робіт сільськогосподарського призначення. Криволінійний рух (поворот) присутній у роботі будь-якої транспортної чи тягової машини. Теорія повороту налічує безліч різних моделей руху.

Слід зазначити, що процес криволінійного руху вивчений недостатньо. Істотно має відмінність криволінійного руху енергетичного засобу з технологічною робочою машиною по криволінійних траєкторіях від прямолінійного руху. Застосовується кінематичний спосіб повороту у більшості транспортних засобів, за рахунок повороту

щодо остова машини керованих коліс у площині, паралельній площині руху. Набагато складніше вивчення кінематики та динаміки криволінійного руху машин. Це потребує більш детального вивчення багатьох факторів, що впливають на керованість, стабільність та надійність руху енергетичного засобу.

Причина дослідження криволінійного руху – це впровадження практично автоматичного управління польових агрегатів (ПА) під час проведення польових операцій при вирощуванні сільськогосподарських культур.

При виконанні операцій колісними тракторами та сільськогосподарськими машинами, внаслідок збурень з боку опорної поверхні, дії сил інерції та нахилу опорної поверхні відбувається відхилення від заданої

траєкторії руху ПА. При цьому створюються похибки, відбувається збільшення шляху та підвищення витрати палива, витрата насіння та добрив. При спробах збільшити швидкість руху водій не встигає реагувати на відхилення і змушений знизити швидкість, що негативно впливає на продуктивність його роботи (*Penjushkin, 2011*).

Забезпечення точною інформацією про положення агрегату щодо заданої траєкторії необхідне для повної автоматизації управління роботою ПА. Саме задана траєкторія руху агрегату називається траєкторією управління. Саме вона є теоретичною функцією криволінійного руху, яку необхідно отримати для будь-яких переміщень агрегату з високою точністю. Теоретичні дослідження вимагають насамперед отримання математичних рівнянь траєкторії руху під час повороту та розвороту як для агрегатів з передніми керованими колесами (*Melnik, 2017*), так і для агрегатів зі всіма керованими колесами.

Розвороти тракторного агрегату в умовах невеликих розмірів полів, становлять значну частину загального обсягу робіт. В результаті розворотів отримуємо ущільнену, деформовану земельну площу. Фактично це втрати родючості ґрунту. Тому питання економічної ефективності оптимізації криволінійного руху тракторного агрегату має все більш практичного значення.

Залишається ще мало вивченим питання економії енерговитрат – непродуктивних витрат енергії – розвороти тракторних агрегатів під час роботи на полях. Дорога завдовжки багато десятків кілометрів проходить ПА під час роботи. Шлях складається з робочих циклів, які мають часто криволінійний характер, та холостих поворотів. Дуже важливо, щоб якнайменше був холостий шлях агрегату. Вибір способу руху ПА і є основним завданням кінематики та динаміки руху агрегату. З виконанням вимог: максимальна продуктивність при найменших витратах палива та мінімальний вплив на ґрунт.

У сучасній науковій літературі робляться спроби описати криволінійний рух машини аналітичними рівняннями. Науковці присвячують багато світових наукових праць планування розворотів та поворотів ПА під час проведення технологічних операцій для управління агрегатами та машинами за допомогою систем автоматизації. Це дає можливість вибрати найбільш раціональний спосіб руху машини.

Завдання моделювання повороту є складання аналітичних рівнянь руху по криволінійних траєкторіях. Здійснюються роботи з автоматизації управління навісним та причіпним обладнанням, механізмами самого трактора, настав час комплексної автоматизації ПА, яка забезпечить: покращення умов роботи, якість роботи, підвищення продуктивності, скорочення витрат насіння та засобів механізації. Автоматизація управління – це база для роботизації тракторів (*Shipilevskij, 2005*).

Існує потреба у дослідженні криволінійного руху трактора, пов'язана з розворотами агрегатів під час виконання робіт. Щоб скоротити непродуктивні витрати потужності та мінімізувати пошкодження ділянок поля на розворотних смугах, маневри необхідно зробити найбільш раціональними. Підвищується негативний вплив рушіїв на ґрунт. Вирішення цих завдань забезпечується

завдяки детальному аналізу кінематики та динаміки криволінійного руху ПА. Для цього необхідно отримати результат у вигляді рівнянь траєкторій руху криволінійного характеру.

**Матеріали і методи досліджень.** При проведенні теоретичного аналізу застосовувалися методи системного підходу до досліджень кінематики руху; методи систематизації з визначенням характеристик кінематики, зв'язок та взаємовплив між ними; методи оцінки, перевірки, статистичного послідовного аналізу даних, що базуються на математичному моделюванні нелінійного руху польових агрегатів з використанням теорії диференціальних рівнянь вищої математики; абстрагування – обґрунтування основних параметрів у результаті теоретичного аналізу параметричних рівнянь координат центру тяжкості трактора з усіма керованими колесами криволінійного руху.

**Результати.** Дослідженню та вивченню траєкторії повороту чи розвороту будь-якого транспортного засобу чи ПА під час польових робіт присвячено багато наукових статей світових дослідників. Зокрема у статті (*Song, 2013*) розглянуто спробу оптимізувати дорожні точки та продемонструвати створення запланованого шляху для автономних тракторів-косарок. На підставі схем роботи було заплановано алгоритм планування шляху для автономної косарки-трактора. В результаті польових досліджень було отримано деякий збіг даних, особливо в точках повороту. У статті (*Al-khayyat, 2018*) для отримання траєкторії криволінійного руху пропонується використовувати змінену траєкторію лінійного відрізка з траєкторією параболічної ділянки LSPB з оптимізацією рою частинок (PSO), щоб змусити траєкторію LSPB проходити через зазначені точки шляху. Результати моделювання показали хорошу роботу взаємодії зміненої траєкторії LSPB з PSO лише у перевірених випадках. Цей метод дуже простий і можна використовувати для оперативного планування шляху.

В науковій праці (*Beljaev, 2016*) запропоновані аналітичні вирази для визначення кінематичних параметрів криволінійного руху колісної машини, які можуть бути використані для більшості кінематичних способів повороту, якщо приймати при розрахунках рівними нулю кути поворотів відповідних коліс, що дозволить і на стадії проектування, і в процесі експлуатації колісної машини з високим ступенем точності оцінити кінематику її повороту.

У статті (*Kambarov, 2016*) наведено результати експериментальних досліджень визначення параметрів траєкторії руху чотириколісного бавовняного трактора на базі трактора Кейс 4240Х із шестирядним культиватором на розворотній смузі бавовняного поля. За допомогою пристрою встановлених маркерів у кожному колесі та по осі трактора визначали на поверхні поля траєкторію руху. В результаті були отримані експериментальні польові траєкторії, які потім перетворили на форму таблиці з координатами X і Y для відтворення теоретичної траєкторії руху.

В роботі (*Fomin, 2017*) представлена динамічна математична модель сталого криволінійного руху для навантажувально-транспортного агрегату. За основу для

моделювання взята просторова схема агрегату, яка дає можливість врахувати перерозподіл нормальних реакцій при криволінійному русі. В результаті експериментально були отримані траєкторії руху з урахуванням уводу при максимальному положенні керованих коліс.

Час повороту займає значну частину операцій виконуваних тракторними та навісними агрегатами, особливо на полях з короткими пробігами. Нераціонально зроблені повороти значно збільшують ширину поворотних смуг, суттєво збільшуючи холостий хід агрегату навісного обладнання та трактора, що негативно впливає на ефективність роботи. У науковій статті (Bulgakov, 2019, 2020) теоретично проаналізовано поворотну здатність асиметричного агрегатно-тракторного агрегату з урахуванням його швидкості руху та конструктивних параметрів. Отримані аналітичні рівняння дозволили здійснити чисельне моделювання для оцінки маневреності повороту агрегатно-тракторного агрегату на розворотній смузі з огляду на причіпну асиметричну валкову жатку з тракторним агрегатом. Трактори повинні бути обладнані відповідними пристроями, які можуть автоматично регулювати швидкість руху трактора на поворотній смузі або середню кутову швидкість повороту провідних коліс, щоб забезпечити необхідний показник маневреності.

В статті (Bachman, 2012) представлений новий вид навігаційної системи для сільськогосподарських машин. Основна увага приділяється управлінню траєкторією, де представлено відстеження шляху з прогнозуванням нелінійної моделі для трактора та системи причепа. Сільськогосподарська мета полягає в русі таким чином, щоб валки розташовувалися рівно пліч-о-пліч, без перекриттів і зазорів. Отже, метою цього дослідження було контролювати поперечне положення знаряддя, що буксирується, і утримувати його близько до прилеглої лінії руху. Суміжну лінію руху було локально виявлено за допомогою лазерного 2D-сканера. Вимірювання курсу за допомогою GPS було покращено за рахунок використання інерційного вимірювального блоку та окремого фільтру Калмана ЕКФ. Для вирішення навігаційної задачі використовувалось нелінійне моделювання з прогнозуванням (NMPC). Метою було створення системи, яка могла б мати принаймні ту саму точність, що й людина-водій. Достатньою вимогою до точності було не більше 10 см бічної помилки при швидкості 12 км/год. Результати, представлені у статті, показують, що мету було досягнуто, і NMPC є можливим методом точного відстеження шляху.

В статті (Bouzar, 2020) для створення найкращих траєкторій за критерієм ефективності для автономного колісного мобільного робота з причепом (AWMRT) між початковою та кінцевою ситуаціями була використана методологія, яка враховує кінематичні та динамічні можливості коліс мобільного робота. В результаті було проведено кілька досліджень для пошуку розв'язків проблеми планування траєкторії, оптимальних за часом виконання. Підхід, що використовується, є розширенням підходу випадкового профілю (RPA) для планування траєкторії тракторів з причепами. Цей підхід заснований

на перетворенні вихідного завдання на задачу параметричної оптимізації з обмеженнями, в якій одним із параметрів є час виконання завдання.

В статті (Moussa, 2010) запропоновано схему планування траєкторії для одноколісного мобільного робота з обмеженнями швидкості, крутних моментів та кривизною траєкторії за мінімальний час. Метод планування траєкторії заснований на ділення шляху на ділянки безперервної кривизни, що складаються з кривих і прямих ліній. Вздовж кожної частини забезпечується трапецієподібний профіль як для лінійної, так і для кутової швидкості. Наведено формули та алгоритм планування траєкторій руху робота з виходом на задані координати траєкторії руху.

В статті (Yue, 2018) представлений скоординований підхід до керування тракторно-причепним транспортним засобом, завдяки якому можна відстежувати траєкторії. Координований контроль складається з багаторівневих контролерів, кожен з яких побудований за різними алгоритмами. У зв'язку з цим на рівні кінематики для окремого проектування регулятора постави використовуються лінійний квадратичний регулятор і модельний прогнозний контроль (MPC); щоб розробити динамічний контролер для відстеження бажаних швидкостей, створених он-лайн.

У роботі (Zhou, 2019) представлено метод проектування керування для реалізації планарного поворотного руху двоколісного перевернутого маятника із затримкою введення. Особливістю даної роботи є застосування теорії планарної кривої при проектуванні контролера. З запропонованого дизайну контролю можна вивести два основні моменти. Одна – для того, щоб рухається по кривій цільової траєкторії, важливо добре відстежувати кривизну кривої цільової траєкторії. Запропонована конструкція забезпечує похибку відстеження позиції значно зменшену в порівнянні з використанням нединамічної цілі стеження. Використання прямої швидкості як цільової дає змогу значно зменшити накопичену помилку, викликану початковою помилкою швидкості, а оптимальний контролер траєкторії легко визначити, просто розв'язавши алгебраїчні рівняння Ріккати. Чисельне моделювання показує, що за допомогою розробленого контролера не тільки добре відстежується задана крива траєкторії, а й добре стабілізується перевернутий маятник.

В статті (Latif, 2020) розглянута проблема спрямованої нестабільності комбінації вантажівки та причепа при прямому русі була досліджена шляхом розробки динамічної моделі плоскої динаміки твердого тіла системи. Дві стратегії керування були розроблені на основі еталонної моделі після конфігурації контролера. Різні сценарії водіння та дорожні умови, були розглянуті такі, як маневр гальмування та прискорення зі спущеною шиною на сухій дорозі та маневр з подвійною зміною смуги на слизькій дорозі. Загалом, результати моделювання продемонстрували перевагу контролера ковзного режиму над контролером зворотного зв'язку з інтегральним плюсом у забезпеченні кращого відстеження комбінації вантажівки та причепа до цільового шляху при різних маневрах водіння.



В статті (Binh, 2019) розглянутий тракторний причіпний колісний мобільний робот (TTWMR), який рухається вздовж трактора для відстеження заданої бажаної траєкторії. Основні труднощі стабілізації та контролю відстеження TTWMR пов'язані з нелінійними та недопущеними системами, на яких діють неголономні обмеження. Розроблено модель TTWMR і перетворено модель помилки відстеження в трикутну форму, щоб запропонувати закон керування та адаптивний закон. Запропонований адаптивний закон продовжується для вирішення проблеми з невідомими параметрами. Моделювання реалізовано для демонстрації ефективних характеристик запропонованого адаптивного закону та запропонованого закону керування.

У статті (Yue, 2020) викладено про ефективний підхід до планування траєкторії на основі квінтичного полінома та надійний метод прогнозного керування на основі трубочастої моделі (RTMPC) для системи тракторно-причепного транспортного засобу. Для реалізації планування траєкторії вводиться квінтична поліноміальна функція на основі часу, яка враховує безпеку, комфорт та ефективність руху транспортної системи. Після цього пропонується схема RTMPC, що складається з номінального системно-орієнтованого модельного контролера з прогнозуванням і закону керування допоміжним зворотним зв'язком, щоб побудувати регулятор положення, щоб можна було досягти сприятливих перехідних характеристик для процесу відстеження траєкторії.

У науковій праці (Zhou, 2020) наведено загальну структуру для системи тракторних причепів у середовищі, де заборонено глобальну систему позиціонування (GPS). У порівнянні з існуючими методами, цей підхід надає перевагу надійному, оптимізованому за вартістю та легкому у реалізації рішення. По-перше, для досягнення точного руху по траєкторії тонко введено датчик сили. На основі нещодавно отриманої динамічної моделі трактора розробляється надійний контролер. Розроблено новий візуально-інерціальний оцінювач, який дозволяє в реальному часі оцінювати швидкість трансляції та положення для динамічного керування зворотним зв'язком. Теорію Ляпунова доведено стабільність запропонованої системи оцінювання та контролю. Для демонстрації доцільності підходу проводяться повномасштабні експерименти.

Коли частка рухається по плавній кривій, має виконуватися умова нульової бічної швидкості. Таким же чином різні колісні конструкції стримуються таким неголономним обмеженням, коли вони рухаються вздовж гладких кривих на площині. У роботі (Zhou 2020) розроблений відповідний надійний контролер для відстеження відносно кривизни кривої траєкторії цілі на основі динамічного відстеження цілі, так що колісна мобільна конструкція може точно слідувати кривій траєкторії цілі. Теоретичний аналіз і результати моделювання показують, що метод динамічного відстеження цілі може по суті вирішити проблему, що початкова похибка швидкості є достатньо великою, а похибка положення постійно накопичується.

У роботі (Kassaeiyan, 2020) вперше детально описані різноманітні конфігурації TTWR, які є результатом контр-

олерів відстеження траєкторії, орієнтованих на вихід. Потім розробляється контролер відстеження траєкторії повного стану, що не тільки гарантує асимптотичну стабілізацію вихідних помилок, але також дозволяє TTWR слідувати заданим шляхам як у прямому, так і в зворотному русі. Відповідь запропонованого кінематичного регулятора порівнюється з одним із найвідоміших попередніх досліджень для підтвердження переваг запропонованого регулятора. Нарешті, результати експерименту підтверджують роботу запропонованого контролера на практиці. Проблема відстеження траєкторії TTWR є складною, оскільки вони є дуже нелінійними, недостатньо спрацьованими та системами з багатьма входами та багатьма виходами.

Для підвищення характеристик маневреності, а також керованості та стійкості колісного трактора способи його криволінійного руху на поворотній смузі вибираються з врахуванням конкретних умов роботи. Існують різні варіанти вирішення цього завдання. Одним з варіантів вирішення цієї задачі є виведення параметричних рівнянь для визначення поточних координат теоретичної кривої траєкторії для руху трактора «Крабом» на несталому етапі повороту (Beljaev, 2020).

У статті (Fashutdinov, 2020) для машинно-тракторних агрегатів з колісно-гусеничним рушієм з напівзчпним ходом отримані теоретичні формули визначення фактичного радіуса повороту, моменту опору повороту і моменту обертання. Теоретичні передумови підтверджуються експериментальними дослідженнями маневреності машинно-тракторного агрегату з трактором на напівзчпним ходом, виконаним в якості експериментального зразка.

В науковій праці (Zhou, 2021) представлено підхід відстеження кривизни для колісної мобільної конструкції трактор-причеп (TTWMS), так що причіп може точно відстежувати потрібну криву траєкторії. Ключовий закон руху, пов'язаний з функціями кривизни траєкторних кривих, виявлено вперше в термінах тягача та причепа з неголономними обмеженнями. Потім, на основі цього ключового закону руху, крива траєкторії цілі причепа перетворюється на динамічну мету стеження, що відповідає рівнянню динаміки TTWMS, щоб перетворити початкову задачу руху в загальну задачу керування стеженням. Результати моделювання показують, що запропонований метод може змусити TTWMS точно слідувати заданій кривій траєкторії цілі.

Щоб забезпечити точне відстеження траєкторії та задовільне навантаження та розвантаження ґрунту для системи вирівнювання землі на основі трактор-скребок на основі глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS), в статті (Jing, 2021) був розроблений новий метод керування. На основі кінематичної моделі розраховано закон регулювання кута повороту. Метод був підтверджений за допомогою польових експериментів, під час яких систему вирівнювання землі на основі трактор-скребок керували для відстеження заданих шляхів на вологому полі для завершення автономної операції вирівнювання землі. Результати експерименту показали, що порівняно з продуктивністю відстеження шляху

методу чистого контролю переслідування середньоквадратична помилка сумарних бічних відхилень трактора та скрепера за запропонованим способом зменшено на 0,433 та 0,169 м відповідно при повороті на розвороті. Результати показали, що запропонований метод може забезпечити точне відстеження траєкторії.

У роботі (Murillo, 2022) представлено нову нелінійну математичну модель зчленованої системи тягач-причіп, яку можна використовувати в поєднанні з методами віддалення горизонту для покращення виконання завдань зчленованих систем відстеження шляху. Завдяки своїм подвійним механізмам керування цей тип транспортних засобів може бути дуже корисним у точному сільському господарстві, зокрема для посіву, обприскування та збирання врожаю на невеликих полях. Модель зчленованої системи тягач-причіп була вбудована в контролер нелінійної моделі з прогнозуванням, а положення причепа відстежувалося. При розгляді кінематики причепа відхилення положення причепа було суттєво зменшено не тільки на прямій дорозі, але й на поворотах на повороті. Використовуючи запроповану математичну модель, ми змогли контролювати положення самого причепа, а не положення трактора.

**Обговорення.** При проведенні критичного порівняльного аналізу математичних моделей криволінійного руху в наукових статтях учених слід зауважити, що:

1. У статті (Kambarov, 2016) були отримані експериментальні польові траєкторії, які потім перетворили на форму таблиці з координатами X і Y для відтворення теоретичної траєкторії руху, але метод отримання траєкторії складний, так як с початку вимагає проведення експерименту, а тільки потім дає можливість отримання траєкторії руху розвороту чотириколісного бавовняного трактора, тим саме ускладнює моделювання криволінійної траєкторії будь якого енергетичного засобу;

2. у науковій праці (Penjushkin, 2011) наведено рівняння закону управління автомобіля, з параметрами, що входять до нього, такими як кривизна, бічне переміщення, поздовжнє переміщення, але формули визначення цих параметрів відсутні. Рівняння закону керування автомобіля застосовується тільки для автомобіля з передніми керованими колесами, для енергетичного засобу зі всіма керованими колесами рівняння не придатні;

3. у науковій статті (Zavrzhnov, 2019) описаний досвід отримання траєкторії руху автономного трактора-косарки з передніми керованими колесами на полях із травою з отриманням експериментальних точок руху. За даними експериментальних кривих руху косарки було запропоновано алгоритм планування шляху, але з самих рівнянь руху трактора-косарки з їхньої висновки і параметри не наведено;

3. у науковій статті (Bulgakov, 2019) теоретично проаналізовано поворотну здатність асиметричного агрегатно-тракторного агрегату з урахуванням його швидкості руху та конструктивних параметрів. Отримані аналітичні рівняння з чисельним моделювання для оцінки маневреності повороту агрегатно-тракторного агрегату на розворотній смузі. Описаний експери-

мент отримання кінематичних параметрів та траєкторії на розворотній смузі розглянутий для трактора з передніми керованими колесами. Придатність застосування рівнянь для енергетичного засобу зі всіма керованими колесами не наведено;

4. в статті (Song, 2013) розглянуто спробу створення запланованого шляху для автономних тракторів-косарок. На підставі схем роботи було заплановано алгоритм планування шляху для автономної косарки-трактора, але самих рівнянь траєкторії шляху автономних тракторів-косарок і придатність алгоритму планування шляху для інших енергетичних засобів не наведено;

5. в роботі (Fomin, 2017) представлена динамічна математична модель сталого криволінійного руху для навантажувально-транспортного агрегату. В результаті експериментально були отримані траєкторії руху з урахуванням вводу при максимальному положенні керованих коліс. В статті наведена велика кількість математичних рівнянь, але вони надто складні для застосування на практиці;

6. в статті (Backman, 2012) представлений новий вид навігаційної системи для сільськогосподарських машин, де представлено відстеження шляху з прогнозуванням нелінійної моделі для трактора та системи причепа. Результати, представлені у статті, показують, що мету було досягнуто, і даний метод є можливим для точного відстеження шляху. Однак необхідні подальші дослідження, щоб адаптувати метод до інших видів сільськогосподарських машин та не наведено рівнянь відстеження шляху для трактора та системи причепа;

7. в статті (Bouzar, 2020) було проведено кілька досліджень для пошуку розв'язків проблеми планування траєкторії, оптимальних за часом виконання. В результаті були отримані рівняння для траєкторії руху, але вони складні для використання на практиці та експериментально не перевірені на адекватність у реальних умовах;

8. в статті (Moussa, 2010) запропоновано схему планування траєкторії для одноколісного мобільного робота з обмеженнями швидкості, крутних моментів та кривизною траєкторії за мінімальний час. Це складне завдання, особливо якщо враховується динаміка, що потребує значного періоду виконання. Наведено формули та алгоритм планування траєкторій руху робота з виходом на задані координати траєкторії руху, проте не отримано кінцевих рівнянь руху;

9. багато робіт світових науковців (Zhou, 2019, 2020, 2021; Latif, 2020; Yue, 2020) присвячені розробці різних видів контролерів, на основі теорії планарної кривої для відстеження потрібної кривої траєкторії колісних мобільних роботів, та порівнянні контролерів на практиці. Наведено формули та алгоритм планування траєкторій руху робота з виходом на задані координати траєкторії руху, проте не отримано кінцевих рівнянь руху.

**Висновки.** У багатьох статтях зроблено спроби отримати рівняння траєкторії криволінійного руху польових агрегатів. При цьому були використані як наближені методи, так і точні математичні моделі, але вони надто складні для використання їх на практиці.

Відповідно до мети даного дослідження було отримано результати:

1. проведений літературний аналіз наукових статей досліджень з питань кінематики криволінійного руху машинно-тракторних агрегатів та автомобіля, внаслідок якого було встановлено, що відомі розрахункові формули для дослідження кінематики повороту трактора та автомобіля мають суттєві недоліки при їх виведенні, та у деяких не встановлений взаємозв'язок між початково-вихідними даними і відсутні

прості аналітичні рівняння криволінійного руху агрегату з усіма керованими колесами функції повороту остова трактора в параметричній формі для використання на практиці. Тому виникає необхідність створення математичних рівнянь, які описують криволінійний рух польових агрегатів зі всіма керованими колесами, які більш прості і придані для використання на практиці та для моделювання будь-яких видів розворотів при виконанні робіт сільськогосподарського призначення.

#### Бібліографічні посилання:

1. Al-khayyt, SZS. (2018). Creating Through Points in Linear Function with Parabolic Blends Path by Optimization Method. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 14(1): 77-89. doi: 10.22153/kej.2018.10.005
2. Backman, J, Oksanen, T, Visala, A, (2012). Navigation system for agricultural machines: Nonlinear model predictive path tracking. *Computers and Electronics in Agriculture* 82: 32–43.
3. Beljaev, A. N. & Trishina, T. V. (2016). Issledovanie kinematiki povorota kolesnogo traktora. [Investigation of the kinematics of turning a wheeled tractor] *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 1(48), 115–120. (in Russia). doi: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2016.1.115>
4. Beljaev, A. N., Orobinskij, V. I., Shackij, V. P., Trishina, T. V., Sheredekin, V. V. & Vysockaja, I. A. (2020) Opredelenie teoreticheskoj traektorii dvizhenija traktora pri povorote «krabom». [Determination of the theoretical trajectory of the tractor when turning "crab"]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 1(64), 42–49 (in Russia). doi: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2020.1.42>
5. Bulgakov, V., Pascuzzi, S. & Beloev, H. (2019). Theoretical Investigations of the Headland Turning Agility of a Trailed Asymmetric Implement-and-Tractor Aggregate. *Agriculture, MDPI, Open Access Journal*, 9(10), 1-11. doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture9100224>
6. Binh, N.T., Tung, N.A., Nam, D.P. et al. (2019). An Adaptive Backstepping Trajectory Tracking Control of a Tractor Trailer Wheeled Mobile Robot. *Int. J. Control Autom. Syst.* 17, 465–473 <https://doi.org/10.1007/s12555-017-0711-0>
7. Bouzar, A, Essaidi, O, Lakhal, V, Coelen, A, Belarouci, M, Haddad, R, Merzouki (2020). Trajectory Planning For Autonomous Wheeled Mobile Robots With Trailer, *IFAC-PapersOnLine*, 53(2):9766-9771. doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.2657
8. Bulgakov, V., Pascuzzi, S., Beloev, H. & Ivanovs, S. (2019). Theoretical Investigations of the Headland Turning Agility of a Trailed Asymmetric Implement-and-Tractor Aggregate. *Agriculture, MDPI, Open Access Journal*, 9(10): 1-11. doi: 10.3390/agriculture9100224
9. Fashutdinov, M., Khafizov, M., Galiev, I., Gabdrifikov, F. & Khaliullin, F. (2020). Research of dynamics of turning of machine-tractor aggregate with tractor on wheeled-crawler mover. [BIO Web Conf. International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources" (FIES 2019) (2019, November 13-14)], 17, Kazan. (in Russia). doi: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700056>
10. Fomin, C.D. (2017) Matematicheskaja model' dlja issledovanija neustanovivshegosja krivolinejnogo dvizhenija pogruzочно-transportnogo agregata [Mathematical model for investigation of uninstalled curvilinear movement of a load-transport unit (LTU)] *Izvestija Nizhnevolszhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. Napravlenie. Tehnicheskie nauki*, 1(45). – P. 226–234 (in Russia).
11. Jing, Y., Liu, G., Luo, C. (2021). Path tracking control with slip compensation of a global navigation satellite system based tractor-scraper land levelling system, *Biosystems Engineering*, Volume 212, Pages 360-377, ISSN 1537-5110, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.11.010>
12. Kambarov, B. (2016, July 28-29). Jeksperimental'noe opredelenie parametrov traektorii dvizhenija kul'tivatornogo mashinno-traktornogo agregata na povorotnoj polose hlopkovogo polja [Experimental determination of the parameters of the movement trajectory tiller machine and tractor units on the headland cotton field] *European Research: Innovation in Science, Education and Technology: Sb. st. po mat.: XVIII mezhd. nauch.-prakt. konf., №7(18)*, (pp.21-24). London (in United Kingdom).
13. Kassaeiyan, P., Alipour, K., Tarvirdizadeh, B. (2020). A full-state trajectory tracking controller for tractor-trailer wheeled mobile robots, *Mechanism and Machine Theory*, Volume 150, 103872, ISSN 0094-114X, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.103872>
14. Latif, A., Chalhoub, N. & Pilipchuk, V. (2020). Control of the nonlinear dynamics of a truck and trailer combination. *Nonlinear Dyn* 99, 2505–2526. <https://doi.org/10.1007/s11071-019-05452-1>
15. Melnik, V., Dovzhyk, M., Tatyanchenko, B., Solarov, O., Sirenko, Yu. (2017). Analytical method of examining the curvilinear motion of a four-wheeled vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 3/7(87): 59-65. doi: 10.15587/1729-4061.2017.101335
16. Moussa, H., Wisama, K., Lehtihet, H.E. (2010). Trajectory Planning of Unicycle Mobile Robots With a Trapezoidal-Velocity Constraint. *Robotics, IEEE Transactions on*. 26: 954 - 962. doi: 10.1109/TRO.2010.2062090
17. Murillo, M. & Sanchez, Guido & Deniz, Nahuel & Genzelis, Lucas & Giovanini, Leonardo. (2022). Improving path-tracking performance of an articulated tractor-trailer system using a non-linear kinematic model. *Computers and Electronics in Agriculture*. 196. 106826. 10.1016/j.compag.2022.106826
18. Penjushkin, A.S., Poddubnyj, V.I. (2011). Traffic control of a wheeled tractor using satellite radio navigation systems. *Polzunovskij al'manah*. 4/2: 292-295. (in Russia). [http://elib.altstu.ru/journals/Files/pa2011\\_4\\_2/pdf/292penushkin.pdf](http://elib.altstu.ru/journals/Files/pa2011_4_2/pdf/292penushkin.pdf)

19. Shipilevskij, G. B. (2005). Traktornaja avtomatika. Konspekt lekcij po discipline "Avtomaticheskie sistemy koljosnyh i gusenichnyh traktorno-tjagovyh mashin". [Automatic systems of wheeled and tracked tractor-traction machines] Moskva: MGTU "MAMI" (in Russia).
20. Song, M.Z., Kang, S.W., Chung, S.O., Kim, K.D., Chae, Y.S., Lee, D.H., Kim, Y.J., Yu, S.H. & Lee, K.H. (2013). Development of Path Planning Algorithm for an Autonomous Mower Tractor. 4th IFAC Conference on Modelling and Control in Agriculture, Espoo, August 2013. Horticulture and Post Harvest Industry. Finland, p 154. doi: 10.7744/cnijas.2015.42.1.063
21. Yue, M., Hou, X., Gao, R. et al. (2018). Trajectory tracking control for tractor-trailer vehicles: a coordinated control approach. *Nonlinear Dyn* 91, 1061–1074. <https://doi.org/10.1007/s11071-017-3928-9>
22. Yue, M., Hou, X., Zhao, X. and Wu, X. (2020). "Robust Tube-Based Model Predictive Control for Lane Change Maneuver of Tractor-Trailer Vehicles Based on a Polynomial Trajectory," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 50, no. 12, pp. 5180-5188, Dec. 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/TSMC.2018.2867807>
23. Zavrazhnov, A. I., Miheev, N. V. & Beljaev A. N. (2019). Povyshaem ustojchivost' dvizhenija kolesnogo traktora [We increase the driving stability of a wheeled tractor] *Vserossijskij fermer*. Internet-zhurnal. (in Russia).
24. Zhou, Y., Wang, Z. & Chung, Kw. (2019). Turning Motion Control Design of a Two-Wheeled Inverted Pendulum Using Curvature Tracking and Optimal Control Theory. *J Optim Theory Appl* 181, 634–652 <https://doi.org/10.1007/s10957-019-01472-4>
25. Zhou, S. et al., (2020). "Robust Path Following of the Tractor-Trailers System in GPS-Denied Environments," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 500-507, April 2020, doi: 10.1109/LRA.2019.2956380
26. Zhou, Y., Wen, X., Wang, Z. (2020). On the nonholonomic constraints and motion control of wheeled mobile structures1) [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 52(4): 1143-1156. doi: 10.6052/0459-1879-19-257
27. Zhou, Y. & Wen, X. & Xu, Qi. (2021). Precise motion control of tractor-trailer wheeled mobile structures via a newly observed key motion law. *Nonlinear Dynamics*. 103. <https://doi.org/10.1007/s11071-020-06162-9>

**Dovzhyk M. Ya.**, Ph.D., Candidate of Technical Sciences, Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine  
**Sirenko Yu. V.**, PhD, Doctor of Philosophy, Senior Lecturer, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine  
**Kalnahuz A. M.**, Senior Lecturer, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

**Analysis of kinematics of movement of field units with all controlled wheels**

*The movement of units along curves is the most difficult element of movement in the field.*

*The main part of the time of work of field units is devoted to curvilinear movement, when the trajectory changes at the request of the driver or due to external disturbances, or due to changes in some parameters during movement. The trajectory of a wheeled machine is the trajectory of its kinematic centre. There is no fundamental difference between a tractor and a car, as the functional qualities during curvilinear movement are the same. Currently, theoretical and experimental methods for the study of curvilinear motion are not sufficiently developed for wheeled and tractor trains during work.*

*The aim of the research is to analyse the kinematics of curvilinear motion of power vehicles with all steered wheels in the field units on reversible lanes. Methods of theoretical analysis of mathematical models of kinematics of unsteady motion of field aggregates, systematization of parameters, sequential analysis of characteristics were used in the analysis of literature sources. Many articles by world scientists have attempted to obtain equations of the trajectory of curvilinear motion of field aggregates to obtain mathematical models of curvilinear motion, but they are too complex to use in practice.*

*A wheeled machine with steered front and rear axles, at the same angles of rotation of the respective wheels, can provide twice the radius than a wheeled machine with one steered axle. This leads to a reduction in the required width of the turning lane, increasing the length of the tracks, increasing the productivity of the unit, significantly reducing the number of damaged plants on sown turning lanes, reducing the mechanical and technological properties of the soil.*

*The conclusions of the research indicate the need to create mathematical equations that describe the curvilinear motion of field units with all steered wheels, which are simpler and suitable for use in practice and for modelling any kind of reversals in agricultural work.*

**Key words:** movement along curvilinear trajectories, machine unit, kinematics of movement, turn, trajectory.

## ЗАКОНОМІРНОСТІ РУХУ СТЕРЖНЕПОДІБНИХ МАТЕРІАЛІВ У ПРОЦЕСІ ЇХ ВИСИПАННЯ З БУНКЕРІВ

**Єрмаков Сергій Володимирович**

завідувач навчально-наукової лабораторії «DAK GPS»

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна

ORCID: 0000-0002-6840-5309

dakgps@pdatu.edu.ua

**Гуцол Тарас Дмитрович**

доктор технічних наук, доцент

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна

ORCID: 0000-0002-9086-3672

pro-gp@pdatu.edu.ua

**Гарасимчук Ігор Дмитрович**

кандидат технічних наук, доцент

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна

ORCID: 0000-0002-4304-4447

igorgarasymchuk@gmail.com

**Вусатий Микола Вікторович**

асистент

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна

ORCID: 0000-0003-3070-9283

0611142015vys@gmail.com

У роботі розглянуто проблеми вивантаження стержнеподібних тіл (на прикладі живців енергетичної верби) у вільному потоці під дією сил гравітації. Потреба вивчення цього питання продиктована зростаючою популярністю палив з біоенергетичних культур, для нарощування обсягів яких потрібні швидкі та продуктивні машини для створення так званих енергетичних плантацій. Основною перешкодою здійснення вільного вивантажування матеріалів є явище склепоутворення, яке, перериваючи природне висипання матеріалів, негативно впливає на їх витратні характеристики. Метою статті є пошук і виділення закономірностей руху стержнеподібних тіл у процесі їх висипання з бункерів. Для пошуку можливих розв'язків проблеми безперервного вивантаження здерев'янілих живців важливо проаналізувати можливі форми склепінь, що утворюються при вивантаженні з створюють перешкоди руху. В якості моделі бункера, для вивантаження живців, розглядається щільний бункер у вигляді двох стінок, розташованих під кутами до горизонтальної площини. Ці стінки утворюють вивантажувальну воронку з налаштовуванню шириною вивантажувального вікна та кутом розчину.

Дослідним шляхом при висипанні матеріалу зафіксовано склепіння, які утворюються при різних параметрах бункера в процесі вільного вивантаження і виділено особливості формування склепінь утворених живцями. В результаті дослідження встановлено, що для забезпечення безперебійного вивантаження живців можна підібрати таку ширину вивантажувального вікна бункера, при якій буде забезпечено рівномірне висипання живців без склепоутворень та зупинок пов'язаних з цим процесом. Також проведено аналіз безперервного вивантаження стержнеподібного матеріалу та виділено особливості його протікання. Встановлено, що для живців енергетичної верби ширина вікна, що забезпечує безперервне висипання складає 8–12 см.

Результати роботи можуть бути використані при подальшому вивченні питань вивантаження подібних матеріалів, а також при проектуванні бункерів-накопичувачів у системах автоматичної подачі живців енергетичної верби в саджалках.

**Ключові слова:** склепоутворення, вивантаження, живець, енергетична верба, бункер, склепіння, автоматизація садіння.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.4>

Вступ. Багато машин, що використовуються у виробничих технологічних лініях, використовують у своєму принципі роботи такі процеси, як завантаження, вивантаження, відбір, транспортування різних матеріалів, які найчастіше складаються з однотипних частинок. Високопродуктивна та якісна робота таких машин значною мірою залежить від швидкості вивантаження

продукту, використовуюваного обладнання та параметрів та режимів роботи розвантажувальних пристроїв (Adamchuk 2004; Hutsol et al., 2021). Проблема ще більше ускладнюється при необхідності забезпечення рівномірного і безперервного вивантаження матеріалу, у якого один розмір (довжина) значно перевищує два інших розміри. Прикладом такого стержнеподібного

матеріалу є живці рослин. Потреба вивчення цього питання продиктована зростаючою популярністю палив з біоенергетичних культур, для нарощування обсягів яких потрібні швидкі та продуктивні машини для створення так званих енергетичних плантацій. Однією з найбільш поширених таких культур є енергетична верба, садіння якої здійснюється вегетативним способом живцями довжиною 20–25 см та діаметром 8–20 мм (Baran et al., 2007; Frączek et al., 2005; Roik et al., 2015). Садіння насаджень енергетичної верби здійснюється машинами, в яких посадковий матеріал подається вручну, що суттєво обмежує можливості підвищення ефективності агрегатів. При створенні автомата садіння такого матеріалу виникло завдання швидкісної та точної подачі живців, що призвело до пошуку шляхів обґрунтування руху живців при вивантаженні з накопичувальної ємності (Yermakov & Borys, 2015; Yermakov, 2017; Yermakov et al., 2019; Yermakov & Hutsol, 2021).

З практики функціонування бункерів відомо, що основною перешкодою здійснення вивантажування шматкових матеріалів є явище склепоутворення, яке, перериваючи природне висипання матеріалів, негативно впливає на їх витратні характеристики. Вичерпне теоретичне вирішення цієї проблеми у науковій літературі відсутнє. У галузі досліджень динаміки висипання сипких середовищ з ємностей, боротьби зі склепоутворенням та у сфері розробки склепоруйнівального обладнання відзначимо значний внесок наступних учених Алфьорова К., Білоусова А., Богом'яких В., Горюшинського В., Горюшинського І., Гячева Л., Дженіке Е., Желткова С., Зенкова Р., Квапіла Р., Кеглина Б., Кунакова В., Соколовського В., Третьякова Г., Яцуна С. та ін. У їхніх роботах розглянуто основні характеристики та фізико-механічні властивості сипких матеріалів, що так чи інакше впливають на процес склепоутворення, відображені загальні напрями досліджень у галузі безперебійного функціонування бункерних пристроїв та вдосконалення склепозрушувального обладнання для сипких вантажів з широким спектром фізико-механічних властивостей (Kucher & Prokopchuk, 2017; Dzedzic et al., 2017; Mao et al., 2014; Mitkov et al., 2021; Kucher & Prokopchuk, 2019; Ivanyshyn & Hutsol, 2017; Bogomjagkih & Pechuk, 1985; Savage & Cowin, 1999; Geniev, 1972; Gjachev, 1992; Miwa, 1991). Численні дослідження процесу склепоутворення дозволили встановити лише деякі залежності, що пояснюють суть цього процесу. Ступінь впливу величезної кількості різних взаємозалежних чинників на склепоутворення важко оцінити практично і передбачити теоретично: це і геометрія бункера і випускного отвору, і фізико-механічні властивості матеріалів, і умови завантаження, зберігання та випуску. Саме у зв'язку зі складністю забезпечення рівномірного безперервного руху, якому перешкоджає процес склепоутворення, до теперішнього часу не існує універсального пристрою-живильника, що ефективно працював би з будь-яким сипким матеріалом, а різноманітність матеріалу, що вимагає вивантаження сприяє подальшим пошукам обґрунтувань руху того чи іншого матеріалу.

Також важко переоцінити наукове та практичне значення досліджень механізму руху сипких матеріалів під дією власної ваги, так як фізико-механічні властивості даних матеріалів та закономірності їх висипання чинять вирішальний вплив на конструкцію бункерів, а також випускних пристроїв та пристроїв, що стимулюють висипання.

Науковці виділяють два основних напрями для забезпечення безперебійного вивантаження сипких вантажів із ємностей:

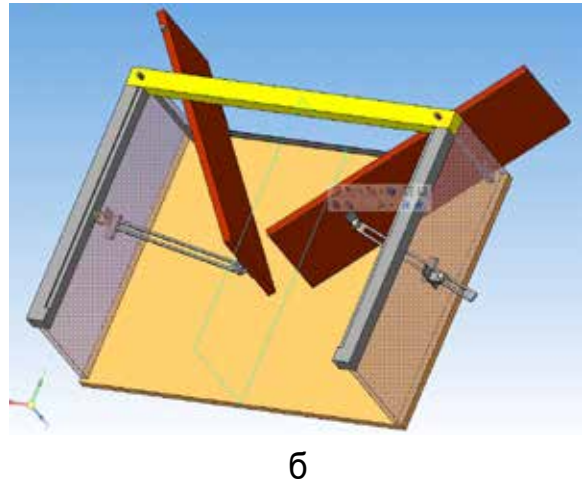
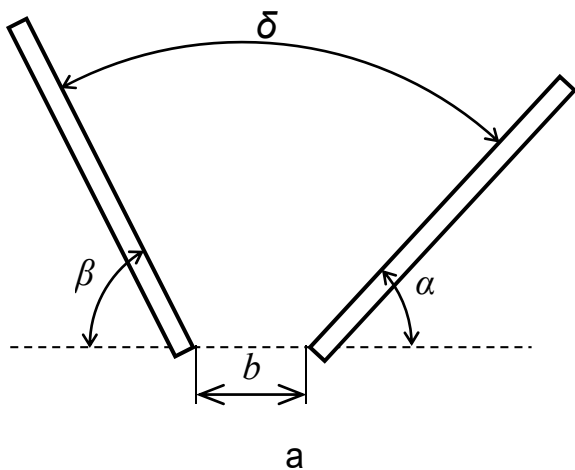
1. запобігання виникненню склепін, що може бути досягнуто правильним вибором параметрів ємності;
2. руйнування склепін, що утворилися, із застосуванням різних зводообрушувальних пристроїв.

Обидва напрями актуальні, проте більш прогресивним вважатимемо перший, оскільки краще запобігти склепоутворенню, ніж боротися з ним (Мупко, 2013). Моделювання руху частинок сипкого матеріалу під час вивантаження, як і вибір засобів для руйнування утворених в ємності склепін залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу і параметрів самої ємності. У цій роботі нас цікавить поведінка стержнеподібних неоднорідних матеріалів (якими є, зокрема, живці енергетичної верби чи тополі) в процесі вивантажування з бункера під дією гравітаційних сил, тому метою статті є пошук і виділення закономірностей руху стержнеподібних тіл у процесі їх висипання з бункерів. Для досягнення цієї мети слід вирішити такі завдання:

- обґрунтувати модель бункера для вивантаження живців енергетичної верби;
- створити дослідну модель бункера, яка б задовольняла умовам вивантажування стержнеподібних матеріалів;
- проаналізувати процес склепоутворення для стержнеподібних матеріалів та виявити характерні особливості утворення склепін для живців верби;
- виявити можливість безперервного висипання живців енергетичної верби та характер протікання цього процесу;
- створити рекомендації для бункерів-живильників для сажалок енергетичної верби та визначити напрямки для подальшого вивчення даного процесу.

Матеріали і методи досліджень. Вивантажування стержнеподібних матеріалів зручно здійснювати з бункерів із похилими стінками та цілним вивантажним вікном (рис.1). Характер заповнення бункера такими матеріалами буде здійснюватись шарами один над іншим, тому в першому наближенні досліджуючи рух у цій системі можна обмежитися вивченням процесів у площині перпендикулярній тілам та стінкам бункера, нехтуючи можливістю їх руху у поперечному напрямку. Тому при виготовленні діючої лабораторної установки, обмежимо простір бункера двома паралельними стінками на відстані трохи перевищує довжину використовуваного для вивантажування матеріалу (рис. 3).

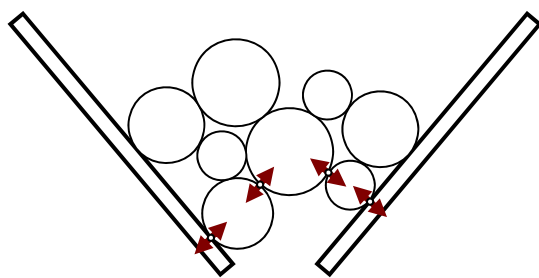
Лабораторна установка дозволяє в широких діапазонах регулювати кути двох стінок  $\alpha$  і  $\beta$ , а також змінювати ширину вивантажувального вікна, що потрібно для дослідження Використання даної моделі бункера дозволить дослідити характер витікання матеріалу з бункера,



**Рис. 1. Дослідна установка: а – модель бункера для вивантажування живців енергетичної верби.  $\alpha$  та  $\beta$  кути до горизонтальної площини двох стінок,  $\delta$  кут розхилу вивантажувальної воронки, утвореної двома стінками; б. – ширина вивантажувального вікна; б – вигляд лабораторної установки**

а також визначити крайові параметри для можливості такого вивантаження без утворення склепінь і, відповідно, без затримок.

Результати. У процесі проведення дослідів з вивчення характеристик висипання стержнеподібного матеріалу через щільне вивантажувальне вікно живці енергетичної верби завантажувалися рівномірним шаром в бункер при закритому вивантажувальному вікні. При встановленні малих параметрів ширини вікна неминуче будуть утворюватися склепіння. Зафіксувавши положення живців при зупинці руху можна виявити чинники які впливають процес склепоутворення даного матеріалу. А розширивши вивантажне вікно можна досягти умов, за яких висипання буде проходити безупинно. Використовуючи швидкісну зйомку, можна виявити закономірності такого висипання для використання при подальшому вивченні даного процесу. У роботі І.В. Горюшинського, І.І. Кононова, В.В. Денисова дано таке визначення процесу утворення склепінь: склепоутворення – це утворення склепінь у ємностях у процесі випуску сипкого вантажу (Horiushynskiy, 2003). Живці рослин мають стержнеподібну форму, тому відкидаючи інші фактори, склепоутворення тут можна розглядати як процес в одній площині, де матеріал, що вивантажується, утворює арочну конструкцію. При цьому живці у склепінні (кожен з них) утримуються від падіння нормальними реакціями та відповідними силами тертя сусідніх живців. А живці, які



**Рис. 2. Схема склепоутворення при висипанні живців**

займають крайні положення (дотичні до стінок) утримуються нормальними реакціями і силами тертя не тільки сусідніх живців, а й силами їх взаємодії з матеріалом стінок бункера (рис. 2).

Для пошуку можливих рішень проблеми безперервного висипання живців енергетичної верби важливо проаналізувати можливі форми утворюваних склепінь. Як було сказано вище, при використанні стержнеподібних матеріалів в обмеженому за їх довжиною середовищі склепоутворення можна розглядати тільки в одній площині. Враховуючи це спробуємо порівняти утворення склепінь в контрольованих умовах і безпосередньо для масиву живців.

Для першого випадку візьмемо циліндричні тіла різних діаметрів. У нашому випадку цілком підійдуть монети різного номіналу. Деякі варіанти склепінь утворені під час руху таких тіл показано на рис. 3.

Аналізуючи рис. 3 можна зробити висновок, що формування склепінь в системі однієї площини цілком може бути описано закономірностями взаємодії між частинками відповідно до зайнятих ними положень. Причому самі форми склепінь хоч і носять випадковий характер, але загалом формуються за одним і тим самим закономірностям і у загальних рисах цілком можуть бути спрогнозовані. Зважаючи на розмірні характеристики живців рослин, не важко спрогнозувати, що на процес склепоутворення може впливати ще й довжина живців. На рис. 6 показано деякі варіанти зафіксованих склепінь при вивантаженні живців через вивантажувальний отвір при кутах  $\alpha=90^\circ$  і  $\beta=40^\circ$ , а на рис. 7 – те саме при кутах  $\alpha=60^\circ$  та  $\beta=40^\circ$ .

Таким чином, бачимо, що форми склепінь суттєво відрізняється від попередніх склепінь в одній площині. Відмінність хоча б у тому, що не завжди крайні живці у площині бічної стінки стикаються з стінкою бункера, а деякі живці у цій площині взагалі не контактують із сусідніми живцями, переплітаючись з ними десь у глибині шару. Часто зависання живців провокує неоднорідне защемлення їх за довжиною, коли один з кінців звільняється раніше іншого і таким чином намагаючись



а



б



в



г



д



е

**Рис. 3. Приклади утворених склепінь при вивантаженні циліндричних тіл на площині**

зайняти вертикальне положення, що можна побачити на рис. 6 – б, г, е.

Зазначимо, що у багатьох випадках причиною таких відмінностей є перекося по довжині живців щодо один одного. Також причиною іноді були дефекти форми матеріалу – викривлення, зазубрини, конусність тощо. При збігу багатьох цих причин в одному шарі, можна спо-

стерігати навіть картину як на рис. 8, що робить процес рівномірного вивантаження проблематичним, а контрольований вихід матеріалу в потрібній орієнтації практично неможливим.

Такі проблеми виникають при малих величинах ширини вивантажувального вікна, коли превалюють статичні склепіння над динамічними. Коли ж ширину вікна



а

б

в



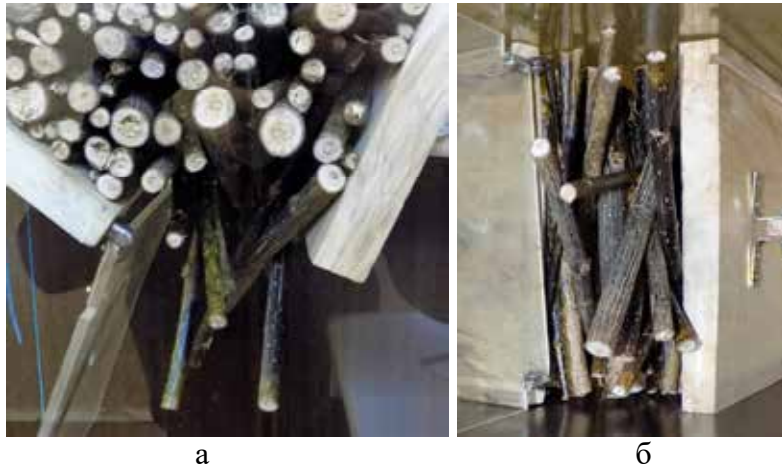
г

д

е

**Рис. 6. Приклади утворених склепінь при вивантаженні живців енергетичної верби**





**Рис. 7. Проблеми вивантаження живців енергетичної верби у зоні вивантажувального вікна**

збільшити, процес вивантаження відбувається більш рівномірно і в цьому випадку можна спостерігати та аналізувати закономірності висипання матеріалу. Встановлено, що для живців енергетичної верби ширина вікна, що забезпечує безперервне висипання складає 8–12 см.

**Висновки.** Для вирішення питань звільнення процесу садіння енергетичної верби від ручної праці при подачі посадкового матеріалу від накопичувальних емностей до місця садіння виникає необхідність створення автоматизованої системи подачі. Відбір та транспортування живців у такій системі можна організувати за допомогою гравітаційного вивантаження з бункера. Модель бункера для вивантаження стержнеподібних матеріалів складається з двох стінок розташованих під кутом до горизонту, внизу яких утворюється вивантажувальне вікно з регульованою шириною. Аналіз процесу вивантажування і форми склепінь свідчить про те, що у випадку з таким стержнеподібним матеріалом, як живці енергетичної верби, крім загальних причин

утворення склепінь і закономірностей формування їх форми виникають ще й інші фактори впливу. Особливістю живців рослина є їхня форма, що ускладнює склепоутворення, і викликає такі додаткові умови та фактори, як перекося живців у шарі, неправильна форма живців, нерівномірність їх заземлення тощо. При створенні умов, за яких відсутнє виникнення статичних склепінь, можна було проаналізувати закономірності вивантажування живців з бункера. В результаті дослідження встановлено, що для забезпечення безперебійного вивантаження живців можна підібрати таку ширину вивантажувального вікна бункера, при якій буде забезпечено рівномірне висипання живців без склепоутворень та зупинок пов'язаних з цим процесом. Використання отриманих даних у подальших дослідженнях уможливить більш повно враховувати всі фактори, що виникають у процесі вивантажування та склепоутворення, що важливо при вивченні та вдосконаленні даного процесу.

#### **Бібліографічні посилання:**

1. Adamchuk, V.V., Baranov, H.L., Baranovskyi O.S. (2004). Suchasni tendentsii rozvytku konstruksii silskohospodarskoj tekhniki [Modern trends in the development of constructions of agricultural machinery]. Kyiv: Ahrarna nauka (in Ukrainian).
2. Hutsol, T., Glowacki, S., Mudryk, K. (2021). Agrobiomass of Ukraine – Energy Potential of Central and Eastern Europe (Engineering, Technology, Innovation, Economics). Monograph. Warsaw.
3. Baran, D., Kwaśniewski, D., Mudryk K (2007). Wybrane właściwości fizyczne trzyletniej wierzby energetycznej [Selected physical properties of a three-year-old energy willow]. Inżynieria Rolnicza. V.11. pp. 7–12 (in Polish).
4. Frączek, J., Mudryk, K. (2005). Jakości sadzonek wierzby energetycznej w aspekcie sadzenia mechanicznego [The quality of energy willow seedlings in terms of mechanical planting]. Inżynieria Rolnicza, 6 (66), 159–167 (in Polish).
5. Roik, M.V., Sinchenko, V.M., Fuchylo, Y.D. (2015). Energetychna verba: tekhnologiya vy'roshhuvannya ta vy'kory'stannya [Energy willow: cultivation technology and usage]., Vinnitsa: LLC "Nilan-LTD" (in Ukrainian).
6. Mynko, R. N. (2013). Problema svodoobrazovanyia v emkostiakh bunkernoho tipa v uslovyiakh dlitelnoho khraneniya [The problem of arch formation in bunker-type tanks under long-term storage conditions]. Yaroslavskiy pedahohycheskyy vestnyk, 3(1).
7. Yermakov, S, Tulej, M., Tulej, W., Shevchuk, I. (2018). Analiz konstruksiy avtomativ sadinnia [Construction analysis means of planting automation]. Tendentsii ta perspektyvy rozvytku nauky i osvity v umovakh hlobalizatsii. V. 34. Pereiaslav-Khmelnyskiy (in Ukrainian).
8. Yermakov, S.V. (2017). Prospects for improvement of constructions for planting energy crops cuttings. Podilskyy visnyk: silske gospodarstvo, tekhnika, ekonomika. V. 2. pp. 37–45.
9. Yermakov, S. (2019). Application of the laplace transform to calculate the velocity of a two-phase fluid modulated by the movement of cuttings of an energy willow (Salix Viminalis). Teka. Quarterly journal of agri-food industry.
10. Yermakov S.V., Hutsol T.D. (2021) Investigation of the process of gravitational unloading of energy willow cuttings in the conditions of static and dynamic arches. Engineering of nature management. V. 3.
11. Yermakov, S., Borys, M. (2015). Efficiency analysis of the energy willow planting devices. Materialy XI Mezinarodni vedecko-prakticka konferencie "Veda a vznik – 2015", v. 14

12. Yermakov, S.V., Hutsol, T.D. (2018). Features of the heterogeneous rod-like materials outflow (by example of energy willow cutting). Technological and methodological aspects of agri-food engineering in young scientist research.
13. Kucher, O., Prokopchuk, L. (2019). Economic aspects of biomass market development in Ukraine. Renewable Energy Sources engineering, technology, innovation. Krynica.
14. Bogomjagkih, V.A., Pepchuk, A. P. (1985). Intensifikacija razgruzki bunkernyh ustrojstv v uslovijah svodoobrazovanija zernistykh materialov [Intensification of unloading of hopper devices in the conditions of arch formation of granular materials]. Zernograd. (in Russian).
15. Dziedzic, K., Łapczyńska-Kordon, B., Mudryk, K. (2017). Decision support systems to establish plantations of energy crops on the example of willow (*Salix Viminalis* L.). Scientific achievements in agricultural engineering, agronomy and veterinary medicine polish ukrainian cooperation. V. 1.
16. Kucher, O., Prokopchuk, L. (2017). The development of the market of the renewable energy in Ukraine. Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation. Springer International Publishing AG.
17. Mao, H., Han, L., Hu, J., Kumi, F. (2014). Development of a pincette-type pick-up device for automatic transplanting of greenhouse seedlings. Applied engineering in agriculture, 30(4).
18. Mitkov, V., Kiurchev, S., Nurek, T., Chorna, T., Ihnatiev, Ye. (2021) Scientific bases of aggregation of combined units on the basis of an integrated tractor. Monograph. Warsaw.
19. Ivanyshyn, V., Hutsol, T. (2017). The Ukrainian Agricultural Groups State and Agromachinery Revision. Scientific achievements in agricultural engineering, agronomy and veterinary medicine polish ukrainian cooperation, V. 1.
20. Savage, S.B., Cowin, S.C. (1999). Theories for Flow Granular Materials. American Society of Mechanical Engineers, Buffalo, N.Y.
21. Geniev, G.A. (1972). Dinamika plasticheskoj i sypuchej sred. [Dynamics of plastic and granular media]. Moskva. (in Russian)
22. Gjachev, L.V. (1992). Osnovy teorii bunkerov [Fundamentals of hopper theory]. Novosibirsk: Izd-vo Novosibirskogo universiteta. (in Russian)
23. Miwa, Y. (1991). Automation of plant tissue culture process. In Automation in biotechnology: a collection of contributions presented at the Fourth Toyota Conference, Aichi, Japan, Amsterdam: Elsevier.
24. Yermakov, S.V., Hutsol, T.D. (2021). Issledovanie processa gravitacionnogo vygruzhenija cherenkov energeticheskoi ivy v uslovijah staticheskikh i dinamicheskikh svodoobrazovanij [Study of the process of gravitational unloading of energy willow cuttings]. Engineering of nature management. V. 3. (in Russian)
25. Yermakov, S. (2017) Kierunki optymizacji maszyn dla sadzenia wierzby energetycznej [Directions of optimization of energy willow planting machines]. Inżynieria produkcji rolniczej i leśnej. Warszawa. (in Polish)
26. Horiushynskiy, Y.V. (2003). Emkosty dlia sypuchikh gruzov v transportno-hruzovykh sistemakh [Tanks for bulk cargo in transport and cargo systems]. Samara: SamHAPS (in Russian).
27. Yermakov, S.V., Hutsol, T.D. (2021). Strukturuvannia protsesu avtomatyzatsii sadinnia zhyvtsiv enerhetychnoi verby [Structuring the process of automation of planting plants of energy willow]. Bulletin of Sumy National Agrarian University. V.3 (45) (in Ukrainian).
28. Yermakov, S.V., Hutsol, T.D., Mykhailova, L.M. (2021). Rozrakhunkovi formuly vyznachennia shvydkosti vyvantazhennia zhyvtsiv enerhetychnoi verby z tochky zoru hidrodinamichnykh bahatofaznykh system [Calculation formulas for determining the rate of discharge of energy willow cuttings from the point of view of hydrodynamic multiphase systems]. Podilian Bulletin: Agriculture, Engineering, Economics, V. 34 (in Ukrainian).
29. Mudryk K, Hutsol T., Ovcharuk O. (2021) Określenie rozłożenia pędów wierzby energetycznej [Determination of the distribution of energy willow sprouts.]. Trends and challenges of modern agricultural science: theory and practice. Kyiv (in Polish).
30. Wrobel, M., Mudryk, K., Jewiarz, M. (2018). Impact of raw material properties and agglomeration pressure on selected parameters of granulates obtained from willow and black locust biomass. Engineering for Rural Development. Jelgava.

**Yermakov S. V.**, Head of the educational and scientific laboratory "DAK GPS", State Agrarian and Engineering University in Podilia, Kamianets-Podilskyi, Ukraine

**Hutsol T. D.**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Polissia National University, Kamianets-Podilskyi, Ukraine

**Garasymchuk I. D.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, State Agrarian and Engineering University in Podilia, Kamianets-Podilskyi, Ukraine

**Vusatyi M. V.**, Assistant, State Agrarian and Engineering University in Podilia, Kamianets-Podilskyi, Ukraine

#### **Patterns of the movement of rod-form materials in the process of their pumping out of hopper**

The paper considers the problems of unloading rod-like bodies (on the example of energy willow cuttings) in a free flow under the influence of gravity. The need to study this issue is dictated by the growing popularity of fuels from bioenergy crops, to increase the volume of which fast and productive machines are needed to create the so-called energy plantations. The main obstacle to the free discharge of materials is the phenomenon of crypt formation, which, interrupting the natural discharge of materials, negatively affects their consumption characteristics. The purpose of the article is to find and highlight the patterns of movement of rod-like bodies in the process of their discharge from hoppers. In order to find possible solutions to the problem of continuous unloading of lignified cuttings, it is important to analyze the possible forms of vaults that are formed during unloading and create obstacles to movement. As a hopper model, for unloading cuttings, a slotted hopper

*in the form of two walls located at angles to the horizontal plane is considered. These walls form a discharge funnel with adjustment of the width of the discharge window and the angle of the solution.*

*The vaults that are formed at different parameters of the bunker in the process of free unloading were recorded experimentally during the pouring of the material and the features of the formation of the vaults formed by cuttings were highlighted. As a result of the study, it was established that to ensure the uninterrupted unloading of cuttings, it is possible to choose such a width of the unloading window of the bunker, which will ensure uniform pouring of cuttings without clog formations and stops associated with this process. An analysis of the continuous discharge of rod-like material was also carried out and the peculiarities of its flow were highlighted. It has been established that for energy willow cuttings, the width of the window, which ensures continuous shedding, is 8–12 cm.*

*The results of the work can be used in the further study of the unloading of similar materials, as well as in the design of hoppers-accumulators in systems of automatic supply of cuttings of energy willow in planters.*

**Key words:** *vault formation, unloading, cuttings, energy willow, hopper, vault, automation of planting.*

## ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОПОДІБНИХ СЕРЕДОВИЩ В ПРОТОЧНІЙ ЧАСТИНІ ВЕНТИЛЯТОРА

**Мельник Віктор Іванович**

доктор технічних наук, професор,  
Харківський державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна  
ORCID: 0000-0002-1176-2831  
victor\_melnic@ukr.net

**Зеленський Олексій Петрович**

аспірант  
Харківський державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна  
ORCID: 0000-0001-9819-9086  
alexey2009mkh@gmail.com

**Зеленський Андрій Петрович**

аспірант  
Харківський державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна  
ORCID: 0000-0002-0364-5571  
alexey2009mkh@gmail.com

*Точний висів сільськогосподарських культур є важливим кроком для досягнення збільшення урожайності у рослинництві. Одним з напрямків забезпечення ефективності роботи сіялки точного висіву є стабільна робота всієї пневматичної системи. Одним з основних елементів такої системи є вентилятор. Важливим завданням при проектуванні вентилятора є його гармонізація параметрів з параметрами сіялки точного висіву. Це можна досягти за допомогою натурних експериментів, що потребує проведення великої кількості випробувань та перевірок, а також великі ресурсні та часові затрати. З розвитком обчислювальної техніки та використанні при проектуванні сучасних методів, дає можливість швидше знаходити оптимальну конструкцію вентилятора. Тому ця стаття присвячена чисельному моделюванню робочого процесу газоподібних середовищ, що протікає в проточній частині відцентрового радіального вентилятора. Аналіз обчислювальних технологій виконується з використанням Computational fluid dynamics (CFD) пакетів, які дають можливість передбачити основні закономірності течій повітря, підтвердити чи розширити результати натурального чи лабораторного експерименту. За результатами виникає можливість побудови віртуальних моделей процесів та явищ, що відбуваються в галузі дослідження. Перспективні методи чисельного моделювання та створення математичної моделі прискорюють досягнення заданого рівня параметрів проектування елементів відцентрового радіального вентилятора, що наближає до скорочення витрат за традиційних експериментальних та теоретичних методів проектування. Основну увагу приділено застосуванню обчислювальних методів газової динаміки в областях газогенератора, що досліджуються. В свою чергу це дасть нам можливість створити нову конструкцію відцентрового радіального вентилятора та досягти підвищення швидкості та якості висіву, що дасть можливість проведення польових робіт на новому рівні. Тому, дуже важливо застосовувати нові технології численого моделювання та використанні сучасних CFD пакетів при проектуванні нових конструкцій.*

**Ключові слова:** відцентровий радіальний вентилятор, аеродинамічний розрахунок, потік повітря, робоче колесо, вихідний пристрій, аеродинамічні характеристики.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.5>

**Вступ.** Відцентровий радіальний вентилятор (ВРВ) це найважливіша частина пневматичної системи сіялки точного висіву, де ступінь аеродинамічної та конструктивної досконалості значною мірою визначатиме якість усієї системи, якість висіву, економічність, габаритні розміри, масу, надійність та ресурс. Тому пошук оптимального проектного рішення на основі методів обчислювальної газодинаміки є актуальним сучасним завданням. Питання розрахунку відцентрових радіальних вентиляторів (ВРВ) присвячено безліч робіт (Anderson D., 1990). У роботах розглядається робочий процес, що протікає у проточній частині вентилятора. Весь процес безпосередньо пов'язаний з робочими елементами вентилятора: вхідним патрубком (ВП), робочим колесом (РК) ВРВ, вихідним пристроєм (ВП) (Back O., 1955). Вра-

ховуючи основні закони збереження газової динаміки, рівняння нерозривності та рівняння енергії (закони термодинаміки) проводиться проектувальний розрахунок ВРВ та основних параметрів робочого процесу на основі оптимізаційних алгоритмів (Babu V., 2021).

**Матеріали та методи.** Розглядаючи ВРВ як складову частину сіялки точного висіву, а саме пневматичної системи, показує, що з якісною конструкцією відбувається збільшення врожайності сільськогосподарських культур та зменшення технологічних і експлуатаційних витрат, тому дуже важливо ґрунтовно підходити до процесу проектування пневматичної системи. Тому основним завданням розробки пневматичної системи є якісне проектування ВРВ. Цим питанням цікавилася багато дослідників сучасності (Bruck A. D., 1975, Ronald, H. 2000, Djachek P. I. 2013).

Розглянемо методику розрахунку ВРВ для подальшого проектування та аналізу поведінки потоку повітря в проточній частині вентилятора з подальшим використанням різних Computer-aided engineering (CAE) та CFD програм (Bruk A. D., 1975). Аеродинамічний розрахунок ВРВ проводиться, задавши попередньо такі параметри: продуктивність вентилятора (витрата повітря в ВРВ) –  $G_B$ , м<sup>3</sup>/с; тиск, створюваний вентилятором –  $\Delta P_v$ , Па; число оборотів ротора (РК) вентилятора –  $n_v$ , об/мин. Схема проєктованого ВРВ наведено (рис. 1).

Аналізуючи закономірність течії потоку повітря каналах ВРВ, утворених лопатками РК, виведемо рівняння до розрахунку теоретичного тиску вентилятора (Chichkin V. P., 1984).

Характер взаємодії потоку повітря з лопатками РК складний. Частина енергії, що передається РК потоку повітря, витрачається на утворення вихорів, на тертя повітря стінки в міжлопаткових каналах і т.д. (Chung, T. J., 2002). Якщо зважати на всі ці фактори, то завдання визначення тиску, що розвивається РК, практично нерозв'язне. Тому для вирішення цього завдання вводимо такі спрощення: потік повітря, що переміщується РК вважаємо ідеальною рідиною (немає тертя); перебіг повітря – встановлений, безвідливний; щільність повітря, що переміщується – постійна; число лопаток РК прагне нескінченності, товщина лопаток – нескінченно мала. Враховуючи всі ці припущення рух повітря в міжлопаткових каналах розглядаємо як плоский, одновимірний перебіг елементарного струменя газу (Fletcher, A. J., 1988).

**Розрахунок відцентрового радіального вентилятора.** Для проведення подальших розрахунків вводимо: приймаємо значення  $G_B$  змінюється – 0,01...0,41 м<sup>3</sup>/с; число оборотів ротора (РК) вентилятора набуває значення  $n_v = 3000$  об/мин.

$$\omega_v = \frac{2\pi n_v}{60}, \quad (1)$$

тоді  $\omega_v = 314,159$ .

Діаметр входу у вентилятор позначаємо –  $D_0$ , а внутрішній діаметр РК через –  $D_1$ , зовнішній діаметр РК позначимо –  $D_2$  (Djacek P. I., 2013),  $D_0 = 0,140$  м;  $D_1 = 0,176$  м;  $D_2 = 0,500$  м.

Емпіричне рівняння дозволяє визначити коефіцієнт швидкості ВРВ  $n_y$ :

$$n_y = \frac{D_1 60}{D_2}, \quad (2)$$

тоді  $n_y = 21,12$ .

Розрахувати ширину лопатей ротора РК  $b_1$  та  $b_2$ , м:

$$b_1 = k \frac{D_0}{4}, \quad (3)$$

тоді  $b_1 = 0,037$ , де  $k$  – коефіцієнт для РК з лопатками, загнутими назад, за даними М.П. Калінушкіна приймають рівним 1,05 ... 1,08. З метою спрощення технології виготовлення лопаток приймаємо:

$$b_2 = b_1.$$

Далі визначаємо число лопаток РК (Holshhevnikov K. V., 1970):

$$z = \pi \frac{D_2 + D_1}{D_2 - D_1} > 6,555 \text{ шт.}$$

Приймаємо значення числа лопаток (непарне зниження шуму і стійкої роботи РК):

$$z = 15 \text{ шт.}$$

Визначаємо окружну швидкість на внутрішньому діаметрі РК  $u_1$ , м/с:

$$u_1 = \frac{\pi D_1 n_v}{60}, \quad (4)$$

тоді  $u_1 = 27,646$ .

Далі задаємо розрахункову область витрати повітря:  $n = 14, i = 1 \dots n$ .

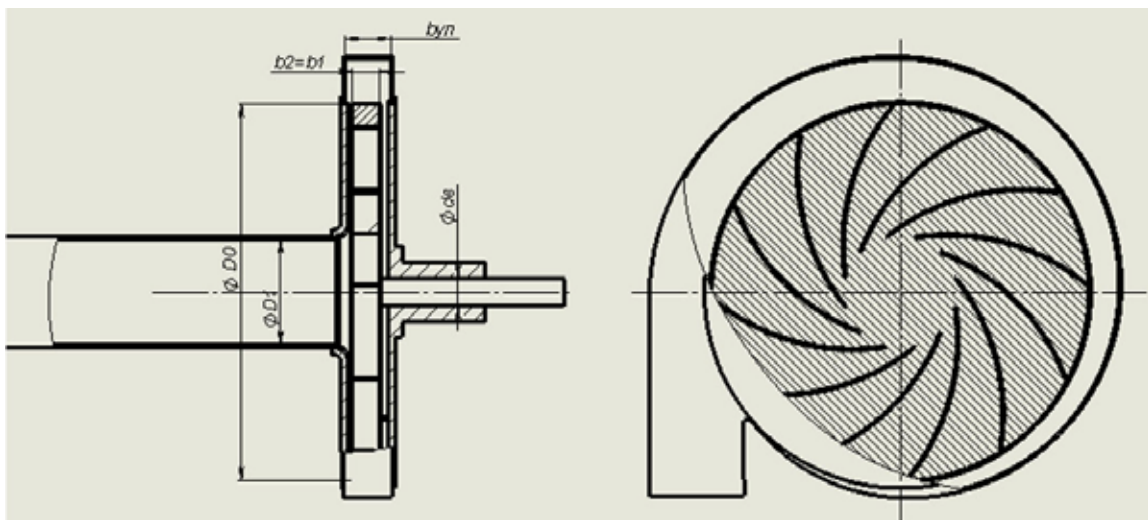


Рис. 1. Схема відцентрового радіального вентилятора

$G_i$	0.01	0.04	0.07	0.1	0.13	0.16	0.19	0.22	0.25	0.29	0.32	0.35	0.38	0.41
-------	------	------	------	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Виходячи із заданої області розрахунку визначаємо оптимальний кут входу потоку  $\beta_{1i}$ :

$$\beta_{1i} = \arctg\left(\frac{G_i}{\pi D_1 b_1 u_1}\right), \quad (5)$$

тоді  $\beta_{1sr} = 19,598$ . Приймаємо значення вхідного кута потоку повітря рівним:  $\beta_1 = 20^\circ$ .

Визначимо оптимальне значення  $D_{1opt}$ , м; и  $G_{opt}$ , м<sup>3</sup>/с:

$$G_{opt} = 2.06 \times 10^{-2} D_1^3 n_V \sin 2\beta_1, \quad (6)$$

$$G_{opt} = 0,217 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$D_{1opt} = 3.653 \sqrt[3]{\frac{G_{opt}}{n_V \sin 2\beta_1}}, \quad (7)$$

тоді  $D_{1opt} = 0,176$  м. Значення  $D_1 = 0,176$  м та  $D_{1opt} = 0,176$  м збігаються, розрахунок йде правильно (Ronald H., 2000).

Перебіг потоку у вхідному патрубку ВРВ осесиметрично (робимо припущення, що потік входить уздовж осі) (Solomahova T. S., 1970), позначаємо його через  $c_{0r_i}$  визначаємо за наступним рівнянням, м/с:

$$c_{0r_i} = \frac{4G_i}{\pi D_0^2}. \quad (8)$$

З рівняння нерозривності потоку визначаємо значення абсолютної швидкості  $c_{1r_i}$  на вході в міжлопатковий канал робочого колеса, м/с (Schlichting, H., 2017).

$$c_{1r_i} = \frac{G_i}{\pi D_1 b_1}. \quad (9)$$

Тоді визначаємо відносну швидкість потоку повітря  $w_1$  в міжлопатковий канал робочого колеса, м/с:

$$w_1 = \frac{c_{1r_i}}{\cos(90 - \beta_1)}. \quad (10)$$

Абсолютна швидкість потоку повітря  $c_1$  на вході до РК, м/с:

$$c_1 = \sqrt{u_1^2 + w_1^2 - 2u_1 w_1 \cos \beta_1}, \quad (11)$$

Визначаємо кут  $\alpha_1$  із співвідношення, а також середнє значення кута  $\alpha_{1sr}$ :

$$\alpha_{1i} = \arcsin\left(\frac{w_1 \sin \beta_1}{c_{1i}}\right), \quad (12)$$

$$\alpha_{1sr} = \frac{\sum_i \alpha_{1i}}{n}, \quad (13)$$

тоді  $\alpha_{1sr} = 39,527^\circ$ .

Тоді тангенційна складова абсолютної швидкості  $c_{1u_i}$  на вході в міжлопатковий канал, м/с (Pak V. S., 1970):

$$c_{1u_i} = c_{1i} \cos \alpha_{1sr}. \quad (14)$$

Розрахуємо окружну швидкість  $u_2$  на зовнішньому діаметрі РК ВРВ, м/с:

$$u_2 = \frac{\pi D_2 n_V}{60}, \quad (15)$$

тоді  $u_2 = 78,54$  м/с.

Приймаємо конструктивний кут  $\beta_2 = 75^\circ$ . Робимо припущення, що швидкості  $w_2 = w_1$ , тоді:

$$c_{2u_i} = u_2 + w_{2i} \cos(180 - \beta_2). \quad (16)$$

Радіальна складова абсолютної швидкості  $c_{2r_i}$  на виході з міжлопаткових каналів визначається з трикутників швидкостей, м/с (Dzhefris G., 1970):

$$c_{2r_i} = w_{2i} \sin(180 - \beta_2). \quad (17)$$

Тоді абсолютна швидкість  $c_2$  на виході з РК визначаємо, м/с:

$$c_{2i} = \sqrt{(c_{2u_i})^2 + (c_{2r_i})^2}. \quad (18)$$

З урахуванням поправки на кінцеву кількість лопаток  $z$  визначаємо поправний кут  $\beta_2'$ :

$$\beta_{2i}' = \arccos\left(\cos \beta_2 + k_2 \frac{c_{2u_i}}{z_1 u_2}\right), \quad (19)$$

де  $k_2 = 3$ ,

$$\beta_{2sr}' = \frac{\sum_i \beta_{2i}'}{n}, \quad (20)$$

цтоді  $\beta_{2sr}' = 60,957^\circ$ .

Далі визначаємо тангенціальну складову  $c_{2u_i}'$  абсолютної швидкості для РК з кінцевим числом лопаток  $z = 15$  шт:

$$c_{2u_i}' = u_2 + \frac{c_{2r_i}}{\tan(180 - \beta_{2sr}')}. \quad (21)$$

Визначаємо кут  $\alpha_2'$ :

$$\alpha_{2i}' = \arccos\left(\frac{c_{2u_i}'}{c_{2i}'}\right), \quad (22)$$

тоді  $\alpha_{2sr}'$ :

$$\alpha'_{2sr} = \frac{\sum_i \alpha'_{2i}}{n}, \quad (23)$$

$$\alpha'_{2sr} = 24,79^\circ.$$

Можна визначити гідравлічний ККД ЦРВ  $\eta_{r.k.}$ :  $\xi = 0,4$ ,

$$\eta_{r.k.} = 1 - \frac{\xi}{2} \times \frac{\cos(\beta_1)^2}{\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \cos \alpha'_{2sr} \frac{\sin \beta'_{2sr}}{\sin[180 - (\alpha'_{2sr} + \beta'_{2sr})]} - \sin(\beta_1)^2}, \quad (24)$$

$$\eta_{r.k.} = 0,972.$$

Теоретичний тиск  $P_{T.r.k.}$ , РК ВРВ, що розвивається, при кінцевій кількості лопаток  $z$ , визначається за рівнянням Ейлера (за відсутності втрат), Па: враховуємо, що щільність повітря  $\rho_{air} = 1,205 \text{ кг/м}^3$ ,

$$P_{T.r.k.} = \rho_{air} (u_2 c'_{2u_i} - u_1 c'_{1u_i}), \quad (25)$$

тоді дійсний тиск  $p_d$  розвивається РК визначаємо, Па:

$$p_d = P_{T.r.k.} \eta_{r.k.} \quad (26)$$

Оптимальна швидкість повітря в равлику  $c_{aui}$ , м/с:

$$c_{aui} = 0,74 c'_{2i}. \quad (27)$$

Площа вихідного перерізу кожуха  $F_{k'}$ , м<sup>2</sup>:

$$F_{k_i} = \frac{G_i}{c_{aui}}. \quad (28)$$

Визначаємо середнє значення  $F_{k_{sr}}$ , м<sup>2</sup>:

$$F_{k_{sr}} = \frac{\sum_i F_{k_i}}{n}, \quad (29)$$

тоді  $F_{k_{sr}} = 3,987 \times 10^{-3} \text{ м}^2$ . Величина розкриття спірального кожуха  $A$  визначаємо із співвідношення, м (Bask O., 1955):

$$A = \frac{D_2 n_y}{90}, \quad (30)$$

тоді  $A = 0,117 \text{ м}$ : Приймаємо значення  $A'$ , м:

$$A' = 0,08 \text{ м}$$

Відповідно визначимо значення  $B$ , м:

$$B = \frac{F_{k_{sr}}}{A'}, \quad (31)$$

тоді  $B = 0,05 \text{ м}$ .

Визначимо неминучі втрати  $\Delta p_n$ , обумовлені радіальною складовою абсолютної швидкості (Hirsch C., 2007), Па:

$$\Delta p_n = \frac{\rho_{air}}{2} c_{2r_i}^2. \quad (32)$$

Втрати на удар  $\Delta p_u$  при змішуванні потоку, що рухаються з різними швидкостями, Па:

$$\Delta p_{u_i} = \frac{\rho_{air}}{2} (c'_{2u_i} - c_{aui})^2. \quad (33)$$

Втрати на тертя  $\Delta p_{tr}$  у спіральному кожусі, Па:

$$p_{tr_i} = k' \frac{\rho_{air}}{2} (c_{aui})^2, \quad (34)$$

де  $k'=0,3$ .

Сумарні втрати тиску  $\Sigma \Delta p_k$  у кожусі, Па:

$$\Sigma \Delta p_{k_i} = \Delta p_{n_i} + \Delta p_{u_i} + \Delta p_{tr_i}. \quad (35)$$

Втрати тиску в роторі РК  $\Delta p_{rk}$  (Ivanov O. P., 1986) Па:

$$\Delta p_{rk_i} = p_{t.r.k_i} - p_{d_i}. \quad (36)$$

Втрати тиску в роторі РК та кожусі вентилятора  $\Sigma \Delta p_v$ , Па:

$$\Sigma \Delta p_{v_i} = \Delta p_{rk_i} + \Sigma \Delta p_{k_i}. \quad (37)$$

Тиск, що розвивається ЦРВ  $p_v$ , Па:

$$p_{v_i} = p_{t.r.k_i} - \Sigma \Delta p_{v_i}. \quad (38)$$

**Результати та обговорення.** Аеродинамічна якість ВРВ оцінюється за аеродинамічними характеристиками, вираженими у вигляді графіків залежності динамічного тиску  $p_{dv}$ , статичного тиску  $p_{sv}$  та повного тиску  $p_v$ , ВРВ, що розвиваються, споживаної потужності  $N_p$ , ККД  $\eta_{r.k.}$  від продуктивності  $G_i$  при певній щільності потоку та постійній частоті обертання  $n$  РК. (ГОСТ 10616-90)

$$p_{sv_i} = \frac{\rho_{air}}{2} \left[ (c'_{2i})^2 - (c_{1i})^2 \right], \quad (39)$$

$$p_{dv_i} = p_{v_i} - p_{sv_i}. \quad (40)$$

Графік залежності повного тиску  $p_{v_i}$  від продуктивності ВРВ  $G_i$  (рис. 2) побудований виходячи з отриманих розрахунків.

Показує, що зі зниженням повного тиску збільшується продуктивність ВРВ. Для оцінки показників ВРВ вводять поняття безрозмірних аеродинамічних показників (Kalinushkin, M.P., 1979). Це графіки залежностей коефіцієнта динамічного тиску  $\Psi_{dv}$ , статичного тиску  $\Psi_{sv}$  та повного тиску  $\Psi_v$  від коефіцієнта продуктивності  $\varphi_i$ :

$$\Psi_{sv_i} = \frac{2}{\rho_{air}} \frac{p_{sv_i}}{u_2^2}, \quad (41)$$

$$\Psi_{v_i} = \frac{2}{\rho_{air}} \frac{p_{v_i}}{u_2^2}, \quad (42)$$

$$\Psi_{dv_i} = \frac{2}{\rho_{air}} \frac{p_{dv_i}}{u_2^2}, \quad (43)$$

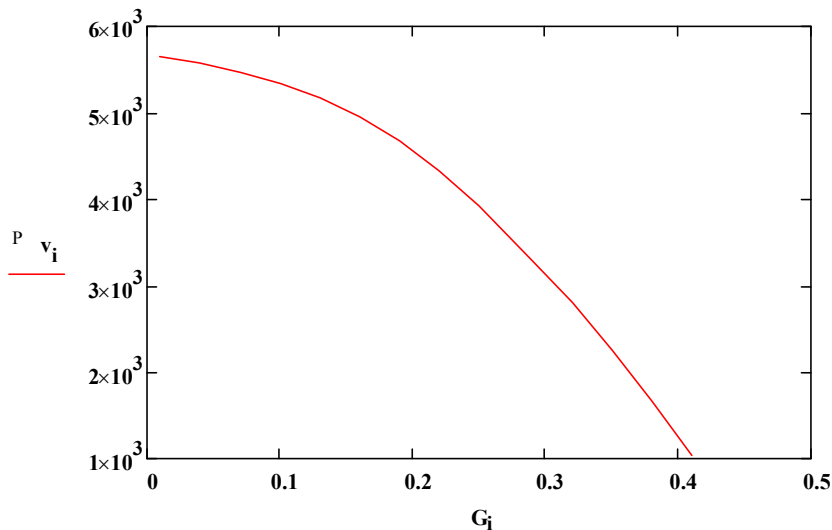


Рис. 2. Залежність повного тиску  $p_{vi}$  від продуктивності ВРВ  $G_i$ .

$$\varphi_i = \frac{c_{2r_i}}{u_2}. \quad (44)$$

Графік залежності коефіцієнта повного тиску  $\psi_{vi}$  від коефіцієнта продуктивності  $\varphi_i$  побудований виходячи з отриманих розрахунків (рис. 3) (Solomahova T. S., 1980).

Показує, що зі зніженням повного тиску  $\psi_{vi}$  то коефіцієнта продуктивності  $\varphi_i$  буде збільшуватися.

Корисна потужність  $N_{pi}$  витрачається на збільшення енергії повітряного потоку в ВРВ (Ronald H., 2000):

$$N_{pi} = p_{vi} G_{Br} \quad (45)$$

Графік залежності корисної потужності  $N_{pi}$  від продуктивності ВРВ  $G_i$  побудованою на підставі отриманих розрахунків (рис. 4).

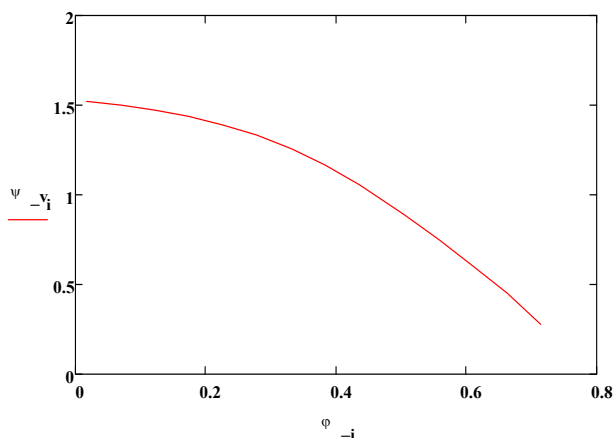


Рис. 3. Залежності коефіцієнта повного тиску  $\psi_{vi}$  від коефіцієнта продуктивності  $\varphi_i$ .

Показує, що при продуктивність ВРВ  $G_i$  близько 0,25 корисна потужність буде максимальною.

**Висновки.** Таким чином, дана методика розрахунку ВРВ дозволяє зробити моделювання вентилятора з різними вхідними параметрами на основі оптимізаційних алгоритмів і методів обчислювальної газодинаміки та експериментальних дослідженнях. Такі методи дозволяють у стислий термін проводити пошук найбільш оптимальних геометричних розмірів елементів проточної частини, що може бути використане як для модернізації як старих конструкцій так і моделювання нових. Було перевірено правильність методики розрахунку за допомогою програм Computer-aided engineering CAE-пакетів програм на основі CFD-методів при моделюванні газодинамічних характеристик перебігу повітря у проточній частині ВРВ.

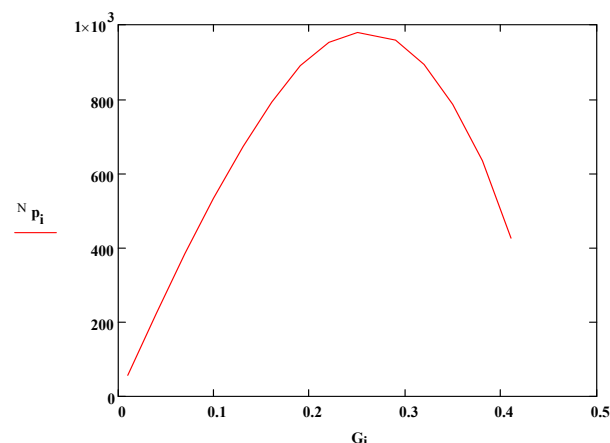


Рис. 4. Залежності корисної потужності  $N_{pi}$  від продуктивності ВРВ  $G_i$ .



### **Бібліографічні посилання:**

1. Anderson D., Tannehill Dzh., Pletcher R., Vychislitel'naja gidromehanika i teploobmen. [Computational fluid mechanics and heat transfer. ]// M.: Mir, 1990, t.1,2.
2. Anderson, J. D. Jr. (1995). Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. New York : McGraw-Hill.
3. Babu, V. (2021). *Fundamentals of gas dynamics* (2nd ed.). Berlin: Springer.
4. Ing. Dr. techn. Back O. Ventilatoren entwurf und berechnung. Halle (Saale) 1955–362 p.
5. Borisenko A. I. Gazovaja dinamika dvigatelej. [Gas dynamics of engines.] M. : Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo, 1962. – 794 s.
6. Bruk A. D. Solomahova T. S. I dr. Centrobezhnye ventiljatory. [Centrifugal fans.] M. : Mashinostroenie, 1975. – 416 s.
7. Chichkin V. P. Ovoshhnye sejalki i kombinirovannye agregaty: Teorija, konstrukcija, raschet. – Kishenev : Shtiinca, 1984. – 392 s.
8. Chichkin V.P. Ovoshhnye sejalki i kombinirovannye agregaty: teorija, konstrukcija i raschjot. [Vegetable seeders and combined units: theory, design and calculation.] / V.P. Chichkin. – Kishinev : Shtinica, 1984. 392 s.
9. Chung, T. J. (2002). Computational fluid dynamics. Cambridge : Cambridge University Press.
10. Djachek P. I. Nasosy, Ventiljatory, Kompresory. [Pumps, Fans, Compressors.] Uchebn. posobie. Izdatel'stvo ASV M. 2013–432 s.
11. Dzhefris G., Svirls B., Metody matematicheskoj fiziki. [Methods of mathematical physics.] M. : Mir, 1969.
12. Fletcher, A. J. (1988). Computational techniques for Fluid Dynamics. New York: Springer-Verlag: Berlin.
13. Frank, M. (2016). White fluid mechanics (8th ed.). New York : McGraw-Hill Education.
14. Hirsch, C. (2007). Numerical computation of internal and external flows (2nd ed.). Oxford : Published by John Wiley & Sons, Ltd.
15. Holshhevnikov K. V., Teorija i raschet aviacionnyh lopatochnyh mashin: Uchebn.dlja aviac. vuzov i fakul'tetov. [Theory and calculation of aircraft blade machines: Textbook for aviation. universities and faculties.] M. : Mashinostroenie, 1970–610 s.
16. Ivanov O. P., Mamchenko V. O. Ajerodinamika i ventiljatory. [Aerodynamics and fans.] Uchebn.dlja stud.vuzov, Leningrad «Mashinostroenie» Leningradskoe otdelenie 1986–280 s.
17. John J. E. Introduction to fluid machanics. N.Y., 1980. p. 587.
18. Kalinkevich, N. V., & Gusak, A.G. (2011). *Theory of turbochargers*. Sumy : SSU.
19. Kalinushkin, M.P. Ventiljatornye ustanovki. [Fan installations.] / M.P. Kalinushkin. – M. : Vysshaja shkola, 1979. – 223 s.
20. Lokshin, I. L. (1959). Investigation of the flow behind the wheels of centrifugal fans in relative motion. Industrial Aerodynamics, 12, 2–153.
21. Martynenko S. A., Meshchysheva L. V., Pohorilyi L. V. ta in. Pnevmatychni siialky: konstruiuvannia i rozrakhunok. [Pneumatic seeders: design and development.] K. : Tekhnika, 1992. – 224 s.
22. Pak V. S. Vysokoeconomichnye centrobezhnye ventiljatory s profilirovannymi lopatkami. [Highly economical centrifugal fans with profiled blades.] Ugol' Ukrainy. – 1960. – №3.
23. Rathakrishnan, E. (2010). Applied gas dynamics. Hoboken : Wiley.
24. Reddy, J. N. (2006). An introduction to the finite element method. New York : McGraw-Hill.
25. Ronald, H. (2000). Aungier Centrifugal compressors a strategy for aerodynamic design and analysis. New York : Asme press, 311 p.
26. Schlichting, H., & Gersten, K. (2017). Boundary-Layer theory (9th ed.). Berlin : Springer-Verlag, 805 p.
27. Solomahova T. S., Chebysheva K. V. Centrobezhnye ventiljatory. Ajerodinamicheskie shemy i harakteristiki. [Centrifugal fans. Aerodynamic schemes and characteristics.] Spravochnik-M. : Mashinostroenie, 1980–176 s.
28. Sysolin P.V. Teoriia, proektuvannia ta rozrakhunky posivnykh mashyn: navch. Posibnyk. [Theory, design and development of agricultural machines: Navch. helper.] / P.V. Sysolin. – K.:ISDO, 1994. – 148 s.
29. Turbin, B.G. Ventiljatory sel'skohozjajstvennyh mashin. [Agricultural machinery fans.] / B.G. Turbin. – Leningrad: Mashinostroenie, 1968. – 159 s.
30. Zaika P. M. Teoriia silskohospodarskykh mashyn. T.1, Ch.2. Mashyny dlia sivby ta sadinnia. [Theory of agricultural machines. T.1, Part 2. Cars for sivbi ta sadinnia.] Zaika P. M. – Kharkiv: Oko, 2002.-452 s.

**Melnik V. I.**, Doctor of Technology, State Biotechnological University, Kharkov, Ukraine

**Zelensky A. P.**, graduate student, State Biotechnological University, Kharkov, Ukraine

**Zelensky A. P.**, graduate student, State Biotechnological University, Kharkov, Ukraine

#### **Numerical modeling of gas-like mediums in the flow part of a fan**

*The exact view of agricultural crops is an important crop for achieving an increase in productivity in the growing crops. One of the main reasons for ensuring the efficiency of the robotic planter of a precise suspension is the stable operation of the entire pneumatic system. One of the main elements of such a system is a fan. An important factor in the design of the fan is the harmonization of the parameters with the parameters of the exact winder. It is possible to reach for the help of field experiments, which will require a large number of trials and revisions, as well as a large resource and hours spent. With the development of numerical technology and variation in the design of modern methods, it is possible to better know the optimal design of the fan. This article is devoted to the numerical simulation of the working process of gas-like media, which flows in the flow part of a central radial fan. The analysis of enumeration technologies is based on the use of Computational fluid dynamics (CFD) packages, as it gives the opportunity to transfer the main regularities of the flow, confirm and expand the results of natural chi laboratory experiment. Behind the results, one can blame the possibility of inducing virtual models of processes and phenomena that are seen in the follow-up gallery. Perspective methods*

*of numerical modeling and the creation of a mathematical model will speed up the achievement of a given level of parameters in the design of the elements of a central radial fan, which is close to the speed of wind speed for traditional experimental and theoretical design methods. The main attention is given to the calculation of the calculation methods of gas dynamics in the areas of the gas generator, which are being studied. To our advantage, give us the opportunity to create a new design of a central radial fan and to reach an increase in speed and density, which will give us the opportunity to carry out floor robots on a new level. Therefore, it is important to develop new technologies for numerical simulation of and alternative modern CFD packages in the design of new designs.*

**Key words:** centrifugal fan, aerodynamic fan, air flow, working wheel, external attachment, aerodynamic characteristics.

## ІНЖЕНЕРНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНІВ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ КОМБАЙНІВ

**Можарівський Денис Миколайович**

аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0002-8288-4924

mozolka208@gmail.com

**Тітова Людмила Леонідівна**

кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0001-7313-1253

l\_titova@nubip.edu.ua

*В статті сформульовані методичні підходи інженерного менеджменту щодо діагностичних параметрів двигунів зернозбиральних комбайнів. Відзначено, що чисельне значення кута випередження подачі палива є одним з основних параметрів комбайнового дизельного двигуна. Від точності установки кута випередження подачі палива залежать основні техніко-економічні показники двигуна – потужність і економічність. Через 900-1000 мото-год роботи двигуна точно встановлене чисельне значення кута випередження подачі палива зменшується. В зв'язку з цим перевірку кута випередження подачі палива рекомендується проводити при третьому технічному обслуговуванні, при встановленні нового або відремонтованого паливного насоса високого тиску на двигун. Зміна кута випередження подачі палива у бік збільшення або зменшення впливає головним чином на тривалість затримки запалювання палива. Це приводить до зміни потужності і економічності двигуна, середньої температури циклу, температури відпрацьованих газів і температури зовнішньої поверхні випускної труби.*

*Авторами розроблена позиційність приладу діагностики, освоєваний фахівцями групи діагностики, який повинен відповідати наступним вимогам: багатфункціональність і реєстрація декількох параметрів; простота використання і портативність; накопичення даних – результатів вимірювань; інформативність індикаторного екрану; програми експертно-інформаційного характеру: вбудовані і зовнішні (комп'ютерні); спеціалізовані вбудовані програми.*

*В статті отримано підходи щодо поганого технічного стану паливної апаратури в процесі експлуатації, які можуть бути наступні основні неполадки в роботі дизеля: дизель не запускається, не розвиває нормальної потужності, нестійкий працює, спостерігається димний випуск. Слід мати на увазі, що ці неполадки можуть бути викликані несправністю і інших агрегатів дизеля. Тому при відшуванні причини незадовільної роботи дизеля разом з паливною апаратурою мають бути перевірені і інші агрегати трактора, що можуть викликати подібні неполадки.*

**Ключові слова:** параметр, діагностування, комбайн, двигун, інженерний менеджмент.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.6>

**Постановка проблеми.** Близько 30% всіх відмов комбайнового дизельного двигуна складають відмови паливного насоса високого тиску (далі – ПНВТ) і форсунок (Нгунків et al., 2020). Із цього зв'язку виникає необхідність розробки методів і засобів діагностики технічного стану ПНВТ і форсунок двигуна при експлуатації зернозбирального комбайна (Rogovskii et al., 2019). Чисельне значення кута випередження подачі палива щодо ВМТ поршня визначається по значенню кута повороту колінчастого валу двигуна у момент початку підйому рівня палива (по меніску) в трубці моментоскопа при повільному прокручуванні колінчастого валу (Wang et al., 2018). Основним недоліком існуючого методу перевірки чисельного значення кута випередження подачі палива є відносно велика (0,36 люд.-год.) трудомісткість (Rogovskii et al., 2021), викликана додатковими розбірно-складальними роботами (Najafi et al., 2015), які не виключають

попадання пилу та бруду в порожнину нагнітального клапана після вигвинчування штуцера з головки ПНВТ (Kuzmich et al., 2021), низька точність ( $\pm 3^\circ$  кута повороту колінчастого валу двигуна) (Ding et al., 2020). Тиск початку впорскування палива визначається за допомогою максиметра безпосередньо на комбайні або приладом при знятті форсунок з двигуна на пунктах технічного обслуговування, в пересувних діагностичних установках, мобільних майстернях (Nadtochiy & Titova, 2018).

Як видно, існуючі методи діагностики ПНВТ і форсунок комбайнових двигунів трудомісткі, оскільки вимагають додаткових розбірно-складальних робіт (Novotny, 2016). Тому виникає необхідність розробки нових методів діагностики технічного стану ПНВТ і форсунок двигуна, які не мали б вказаних недоліків (Voinalovych et al., 2019). Одним з таких методів може стати діагностика ПНВТ і форсунок по теплових параметрах двигуна.

Розроблено метод діагностики технічного стану ПНВТ і форсунок по теплових параметрах (Lopes et al., 2002). З цією метою виконано дослідження впливу чисельного значення кута випередження подачі палива на наступні параметри двигуна: середню температуру циклу; температуру відпрацьованих газів; температуру зовнішньої поверхні випускної труби (Dong et al., 2017).

Експериментальна установка включає: обкатувально-гальмівний стенд; двигун зернозбирального комбайна (Aldoshin & Didmanidze, 2018); прилади для контролю за роботою двигуна; спеціальні прилади для – вимірювань і запису теплових діагностичних параметрів (електронний автоматичний потенціометр) (Chaplygin & Zhalnin, 2022).

Вимірювання теплових параметрів здійснювалися за допомогою хромель-алюмелевих і хромель-копелевих термопар, під'єднаних до відповідного потенціометра. Термопара для виміру середньої температури циклу встановлювалась замість свічки розжарювання (Nazarenko et al., 2020). Термопара для вимірювань температури відпрацьованих газів угвинчувалася у випускную трубу, в 100 мм від площини роз'єму колектора, що випускається, та труби. Термопара для вимірювань зовнішньої температури поверхні випускної труби закріплювалась за допомогою магніту. Виготовлені термопари перед початком роботи були піддані таруванню спільно з потенціометрами (Pisarenko et al., 2019). Відомо, що чисельне значення кута випередження подачі палива є одним з основних параметрів комбайнового дизельного двигуна. Від точності установки кута випередження подачі палива залежать основні техніко-економічні показники двигуна – потужність і економічність (Zubko et al., 2022). Через 900–1000 мото-год роботи двигуна точно встановлене чисельне значення кута випередження подачі палива зменшується. В зв'язку з цим перевірку кута випередження подачі палива рекомендується проводити при третьому технічному обслуговуванні, при встановленні нового або відремонтованого паливного насоса високого тиску на двигун. Зміна кута

випередження подачі палива у бік збільшення або зменшення впливає головним чином на тривалість затримки запалювання палива. Це приводить до зміни потужності і економічності двигуна, середньої температури циклу, температури відпрацьованих газів і температури зовнішньої поверхні випускної труби (Yata et al., 2018).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні вимоги до служб технічного сервісу роблять неможливим ефективне проведення обслуговування без знання технічного стану (Nazarenko et al., 2021). Це приводить до створення груп, бюро технічної діагностики, навчання фахівців, придбання приладів діагностики. З даних позицій прилад діагностики, освоюваний фахівцями групи діагностики, повинен відповідати наступним вимогам:

- багатофункціональність і реєстрація декількох параметрів;
- простота використання і портативність;
- накопичення даних – результатів вимірювань;
- інформативність індикаторного екрану;
- програми експертно-інформаційного характеру: вбудовані і зовнішні (комп'ютерні);
- спеціалізовані вбудовані програми.

Багатофункціональність полягає в можливості контролю основних параметрів стану механічних систем одним приладом, наприклад, стенд віброакустичної діагностики «Дельфін-1М», дозволяє проводити аналіз коливань в тимчасовій і частотній областях, рівня ударних імпульсів і частоти обертання. Можливість реєстрації декількох параметрів дозволяє – контролювати середньоквадратичне і пікове значення параметрів вібрації. Накопичення даних, статистичної інформації для відстежування зміни стану механічних систем в часі, виконується як за допомогою вбудованих засобів, так і за допомогою зовнішніх – програмного забезпечення встановленого на комп'ютері. Формування, ведення, зберігання, обробка і аналіз діагностичної інформації повинне здійснюватися із застосуванням комп'ютерної техніки, для чого засоби діагностики повинні мати нагоду сумісної з ними роботи (рис. 1).



Рис. 1. Стенд віброакустичної діагностики «Дельфін-1М»

Використання засобів діагностики, що відповідають вище приведеним вимогам, дозволить розвинути отримані навички, отримати додаткові можливості при діагностиці, розширити перелік устаткування і виконуваних робіт, що діагностується, визначити перелік необхідних характеристик і вимог до приладів більш високого рівня. При виборі засобів діагностики, виникає друга сторона питання – пов'язана з параметрами устаткування, що діагностується. Якщо діагностується однотипне устаткування тривалого режиму роботи з невеликими відхиленнями по конструкції, частоті обертання, масі, габаритам і умовам експлуатації перевага слідує віддати системам поглибленої діагностики на основі багатоканальності і використання експертних систем – стаціонарні або стендові системи. Цій вимозі повною мірою відповідають такі аналізатори вібрації, як «Дельфін -1М», «Топаз» і «Кварц», мають нагоду роботи з кількістю каналів від 1 до 16 із застосуванням додаткових засобів.

Різноманітність конструкцій, параметрів обслуговування і експлуатації, устаткування працюючи в повторно-короткочасному режимі, вимагає більшою мірою підготовки кваліфікованого персоналу, що володіє основами: тимчасового і спектрального аналізу форм механічних коливань і електричних сигналів, взаємодоповнюючих методів діагностики. Універсальність полягає в можливості використання приладу як самостійно, так і в комплексі з ін. засобами діагностики (стаціонарними, стендовими). Модульний принцип побудови це можливість розширення області застосування приладу шляхом оновлення програмного забезпечення і підключення нових спеціалізованих датчиків.

Переходимо тепер до аналізу явищ, що відбуваються в кінематичних парах двигуна внутрішнього згорання. Паливна апаратура є найважливішою системою дизеля, стан якої визначає її потужності і економічні показники. У паливної системи по кожній секції зазвичай контролюють наступні параметри: початок подачі палива  $\varphi_0$ ; величину подачі  $q_s$ ; установочний натяг пружини форсунки  $P_0$ . Таким чином, стан однієї секції задається тривимірним вектором  $(\varphi_0, q_s, P_0)$ . Особливо важливе посеційно розглянути стан паливної апаратури, оскільки робочі процеси в різних секціях рознесені на значні інтервали часу і не представляє особливої праці за допомогою стробування виділити процес, що протікає в кожній окремо взятій секції. Це справедливо і по відношенню до більшості інших систем поршневого ДВЗ.

Процеси, що протікають в паливоподаючій апаратурі, відрізняються великою складністю. Для їх математичного опису треба використовувати систему нелінійних диференціальних рівнянь із запізнюючими аргументами не нижче сьомого порядку. Подача палива в циліндр двигуна супроводжується ударами голки форсунки об корпус розпилювача. Оскільки робота кожної секції відбувається незалежно від інших секцій апаратури і кожен робочий процес протікає на тактовому інтервалі, не пересічному з тактовими інтервалами других секцій, то можна обмежитися розглядом одного елементарного процесу.

Інтервал часу  $\varphi_0$  між відміткою в.м.т. і початком імпульсу характеризує кут  $\varphi_0$  початку подачі палива

в циліндр. Після закінчення подачі палива голка сідає на місце. Ця подія також супроводжується ударним імпульсом. Відстань  $s_q$  між імпульсами пов'язано з величиною подачі палива. Амплітуда  $s_p$  імпульса і його енергія пов'язані з третім контрольованим параметром  $P_0$  – величиною попереднього натягу пружини форсунки.

Таким чином, визначені параметри сигналу, які в першому наближенні можуть бути використані для виміру параметрів стану паливоподаючої системи. Очевидно ще декілька імпульсів, які пов'язані з роботою других систем дизеля. Їх параметри несуть інформацію про ці процеси. Але справа ускладнюється тим, що кожен параметр сигнального імпульсу залежить від декількох параметрів стану механізму. Так, момент появи імпульсу залежить не лише від початку подачі палива насосом, але і від величини  $P_0$ . Від  $P_0$  залежить і інтервал  $s_p$ . Можна вказати і інші чинники, що впливають на параметри імпульсів. Тому безпосередньо скористатися для діагностики залежностями можна тільки для грубої оцінки параметрів стану.

Цей метод діагностики полягає в тому, що кожен параметр стану механізму визначається як функція не одного, а відразу декількох параметрів сигналу. Вибираючи достатнє число відповідних параметрів сигналу, можна забезпечити в принципі будь-яку наперед задану точність діагнозу (Astashev & Krupenin, 2017).

Так зване «безкровне» вимірювання із зажимним датчиком тиску дозволяє не розбирати апаратуру впорскування, що попереджує забруднення точних деталей розпилювача і ПНВТ, яке неминує при монтажі-демонтажі. Для приведених нижче вимірювань використовувався тестер 845 фірми AVL, в якому криві тиску впорскування можуть відобразитися один над одним для восьми паливопроводів високого тиску. Димомір типу «Хартрідж» є в розпорядженні крупних майстерень для попередньої оцінки димності відпрацьованих газів (далі – ВГ) без великих витрат часу (Fu et al., 2020). Для більшості приладів по вимірюванню димності ВГ є спеціальні програми по пошуку несправності, які виключають постійні вимірювання дійсних значень димності ВГ, що проводяться при пуску двигуна і на режимі холостого ходу. Для визначення димності ВГ при повному навантаженні і максимальною (обмежуваною регулятором) частоті обертання колінчастого валу реєструються покази димоміра на режимах вільного прискорення (Savinyh et al., 2018). Прилад для вимірювання димності ВГ типу «Хартрідж» оцінює відпрацьовані гази на просвіт, тобто точно так, як і це визначає своїм зором людина, тому цей прилад іноді називають «каліброваним оком» (Masek et al., 2017). Непрозорість ВГ визначається наявністю частинок сажі, незгорілого палива, моторної оливи і водяної пари (рис. 2).

Характеристики димності дизельного двигуна. Викид сажі збільшується зі зростанням навантаження на двигун, що супроводжується збагаченням паливо-повітряної суміші (Yezekeyan et al., 2020). Межа припинення димлення відповідає складу суміші при коефіцієнті надлишку повітря  $\lambda = 1,2$  (Rogovskii, 2020). Справний дизельний двигун на холостому ходу частинок сажі (твердих

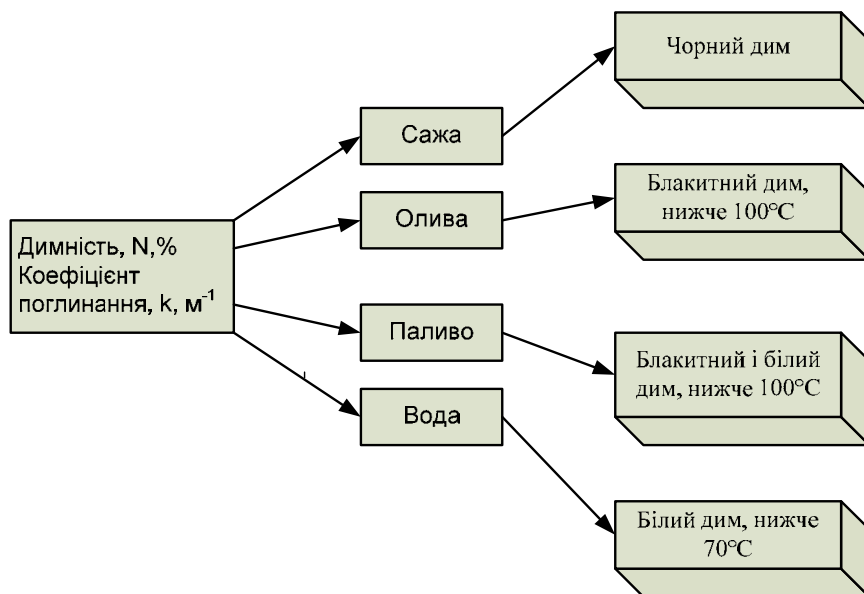


Рис. 2. Фактори димності випускних газів і склад твердих часток

частинок) майже не викидає (Миу, 2016). Посилений викид твердих частинок або незгорілого палива указує на порушення процесу згорання, викликаний поганим приготуванням паливо-повітряної суміші, наприклад, із-за несправних розпилювачів форсунок, помилково встановленого початку подачі або високої витрати оливи при зносі деталей ЦПГ (Jotautiene et al., 2019). Порушення процесу згорання можуть приводити до підвищеної димності на всіх робочих режимах (Dubbinі et al., 2017). Більшість димомірів дозволяють реєструвати зміну непрозорості ВГ залежно від частоти обертання колінчастого валу, забезпечуючи можливість пошуку несправності на режимах вільного прискорення.

**Метою досліджень** є розробка синтез діагностичних параметрів двигунів зернозбиральних комбайнів в сукупних ознаках інженерного менеджменту.

**Результати досліджень.** В умовах сільськогосподарського виробництва економічно вигідно виконувати операції по виявленню несправного вузла двигуна і оцінювати потреби в ремонті, не розбираючи двигун. Погіршення роботи двигуна може бути наслідком багатьох причин. Швидко знайти дійсну причину незадовільної роботи двигуна можливо лише при дотриманні певної послідовності у відшуванні несправності.

Унаслідок поганого технічного стану паливної апаратури в процесі експлуатації можуть бути наступні основні неполадки в роботі дизеля: дизель не запускається, не розвиває нормальної потужності, нестійкий працює, спостерігається димний випуск. Слід мати на увазі, що ці неполадки можуть бути викликані несправністю і інших агрегатів дизеля. Тому при відшуванні причини незадовільної роботи дизеля разом з паливною апаратурою мають бути перевірені і інші агрегати трактора, що можуть викликати подібні неполадки.

Дизель не запускається. Для запуску дизеля необхідно, щоб паливо було впорскуване в камеру згорання своєчасно, в потрібній кількості і тонко розпорошено, а повітря в циліндрі дизеля настільки стиснуте, щоб

до моменту впорскування палива температура була достатня для його самозаймання. Якщо вказані вище умови не виконані, то дизель важко запустити. Завдання зазвичай зводиться до відшування причин, які викликають порушення цих умов. Для полегшення відшування їх на рис. 3 приведені причини поганого запуску дизеля. Основні з них пов'язані з порушенням подачі палива і недостатнім стисненням повітря в циліндрі дизеля. Подача палива може порушитися по наступних причинах: у паливопроводах, фільтрах або головці насоса утворилися повітряні пробки; несправні агрегати системи низького тиску; несправні насосні елементи, паливопроводи, форсунки; неправильно встановлений насос на дизелі.

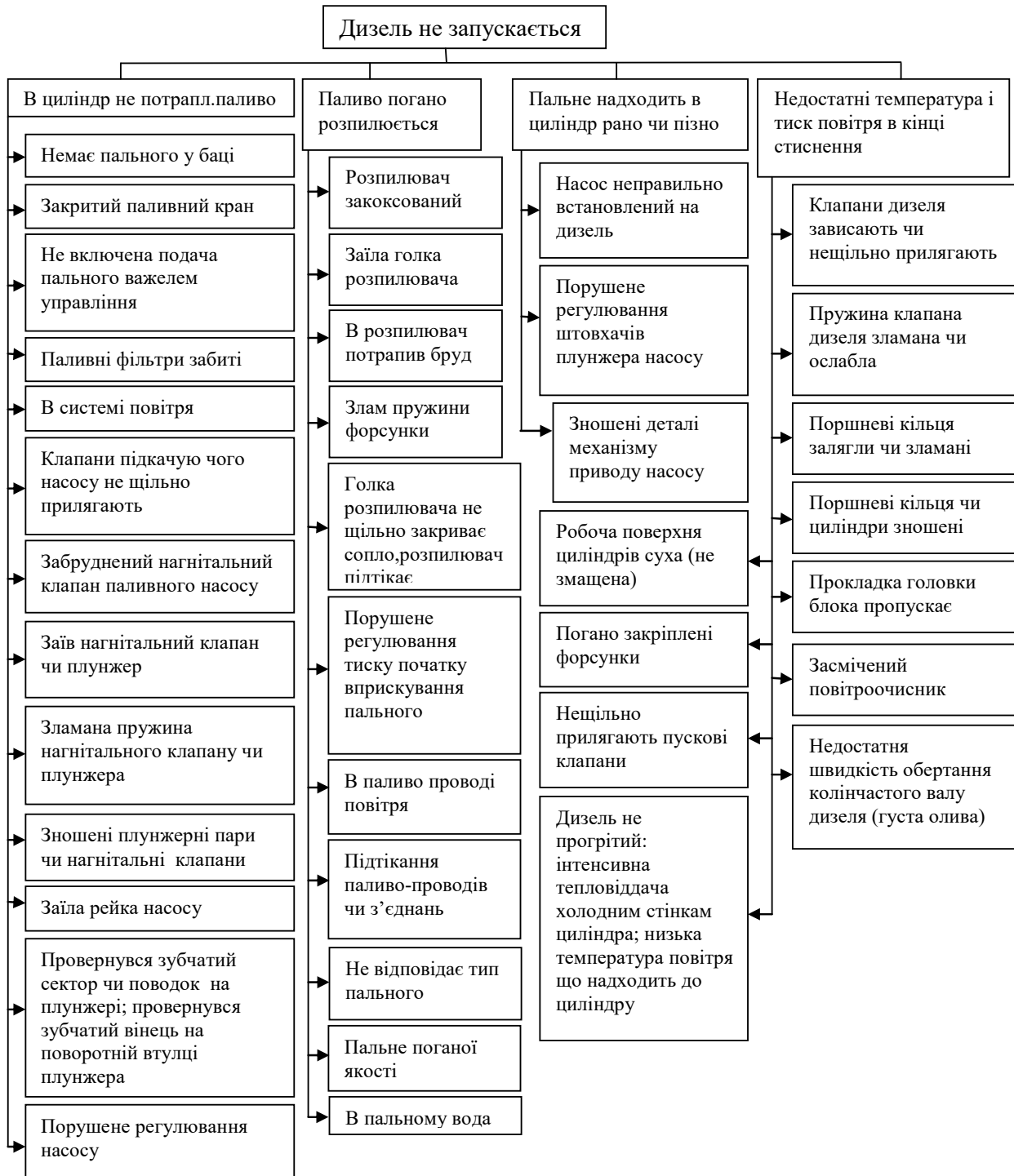
Неповне згорання може бути викликано як надмірною порцією палива, паливною апаратурою, що подається, в циліндр, так і нестачею повітря в циліндрі. У одному з циліндрів може бути надлишок палива, в іншому - нестача. В цьому випадку дизель витрачає нормальну кількість палива, але унаслідок підвищеної нерівномірності подачі палива по циліндрах спостерігатиметься димний випуск.

Нестача повітря викликається головним чином тими ж причинами, які були розглянуті для випадку зниженої температури і тиску в кінці стискування при утрудненому запуску. При нестачі повітря компресиметр покаже знижений тиск в кінці ходу стискування. Причини димного випуску приведені на рис. 4.

Для виявлення причини, що викликала димний випуск, слід звернути увагу на колір диму. Дим, що має сірувато-чорний відтінок, указує на втрату компресії. Чорний дим частіше свідчить про несправність форсунок. Переривисті клуби диму з'являються при зависанні голки розпилювача або закоксуванні форсунок.

Пропуски спалахів без чорного диму можуть бути при зависанні голки розпилювача в закритому положенні (впорскування палива немає).

Димний випуск спостерігається при поганій якості використовуваного палива або оливи.



**Рис. 3. Алгоритм пошуку причин поганого запуску дизеля**

При поганому приляганні ЦПГ або надлишку масла в картері масло може проникати в камеру згорання. Коли піддон очисника повітря переповнений, масло засмокується повітрям з очисника повітря в камеру згорання. У цих випадках випускні гази відрізнятимуться синім відтінком. Якщо паливо, що було вприскуване в циліндр дизеля, не запалало, то пари палива, що виштовхуються поршнем з циліндра, додають випускним газам білий колір.

Встановивши на око колір випускних газів у дизеля, що працює при нормальному навантаженні, необхідно

потім з схеми 2 вибрати групу найбільш вірогідних причин несправностей і послідовно перевірити на двигуні роботу відповідних вузлів.

Дизель не розвиває нормальної потужності. При відшуванні причин несправностей слід мати на увазі, що потужність двигуна визначається головним чином кількістю палива, що подається в циліндри, і ефективністю його згорання.

Недолік палива, що подається в циліндри, може бути викликаний перебоями в роботі агрегатів системи низького тиску, а також незадовільним технічним

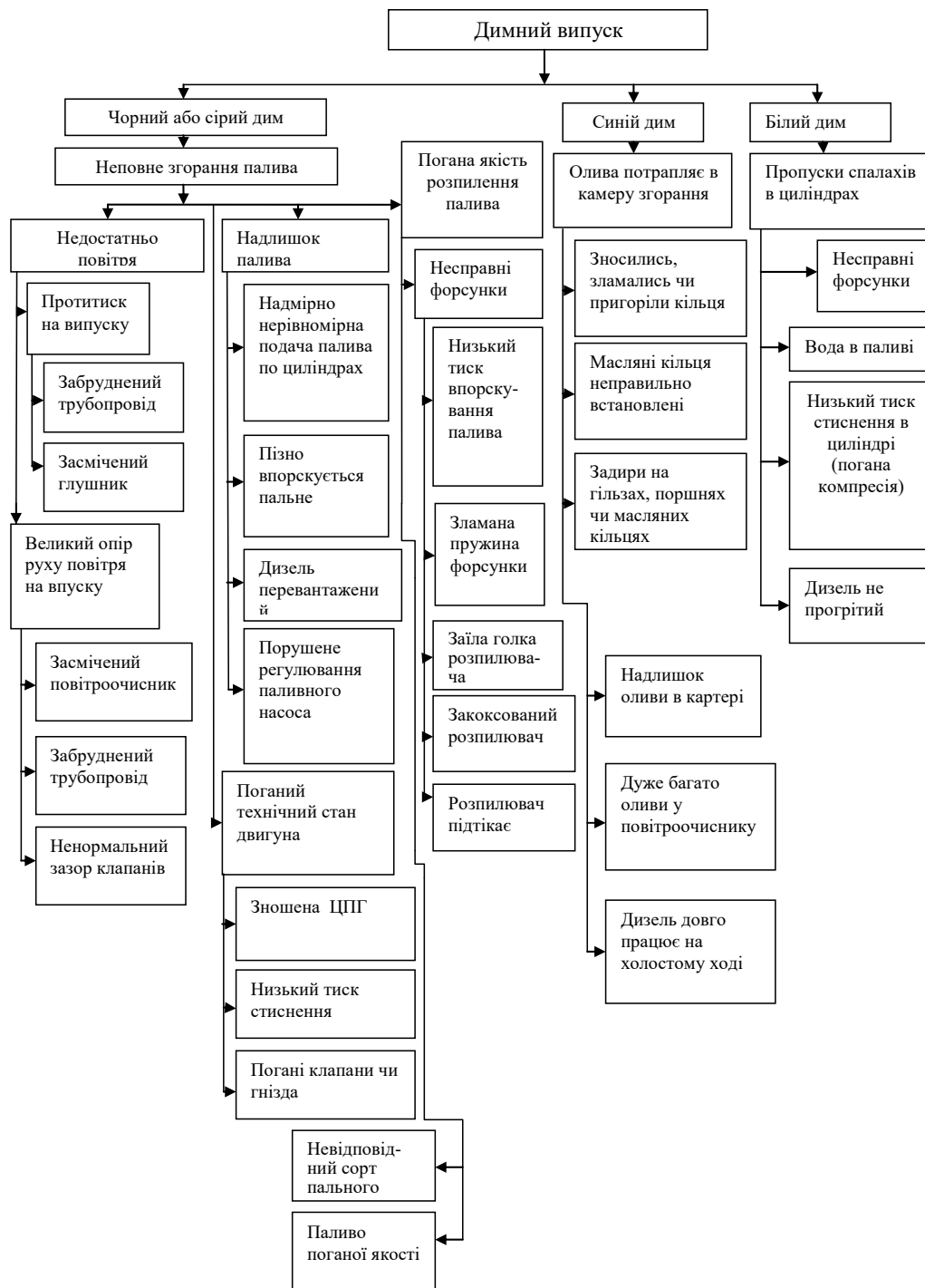


Рис. 4. Алгоритм пошуку причин димного випуску

станом паливного насоса і регулятора або неправильним їх регулюванням.

Погіршення ефективності згорання палива є головним чином наслідком неповного його згорання, дуже раннього або дуже пізнього моменту займання що до верхнього крайнього положення поршня в циліндрі, збільшеній тривалості згорання заряду палива, надмірній нерівномірності подачі палива по циліндрах дизеля.

Ці неполадки можуть бути викликані поганим технічним станом форсунок і паливного насоса, неправильною установкою і регулюванням насоса, а також поганим технічним станом ГРМ, ЦПГ, системи охолодження.

Основні причини зниження потужності приведені на рис. 5.

При відшуванні причин несправностей потрібно мати на увазі, що іноді дизель задовільно запускається, не димить та все ж не розвиває нормальної потужності. Вірогідною причиною цього є недостатня кількість палива, що подається в циліндри дизеля. У більшості інших випадків зниження потужності супроводжується димним випуском.

Таким чином, якщо знижена потужність дизеля не супроводжується димним випуском, то при відшуванні несправності спочатку необхідно за свідченнями палив-



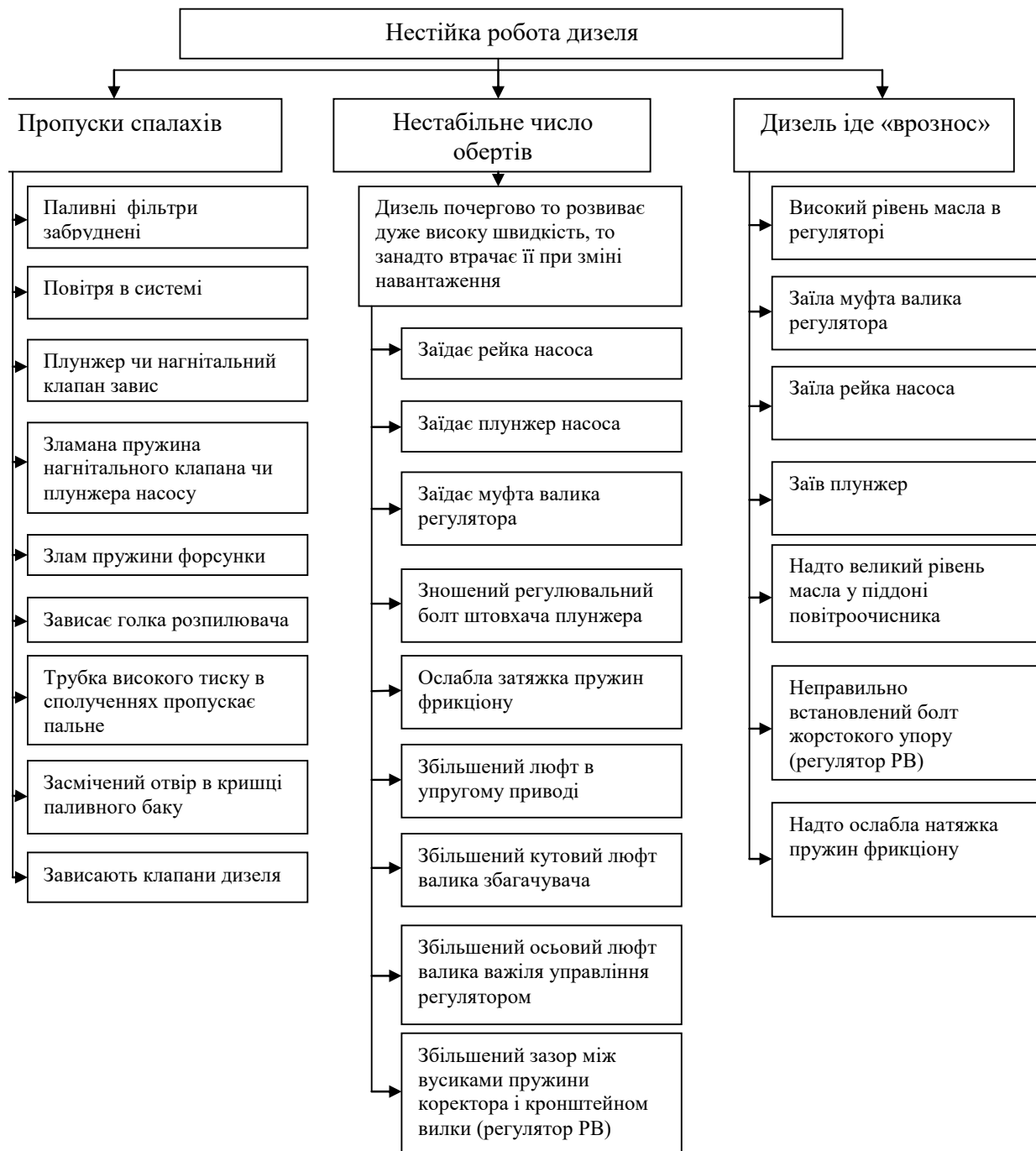


**Рис. 5. Алгоритм пошуку причини зниження потужності двигуна**

ного манометра переконатися, чи достатній тиск палива в головці насоса або насосної секції.

Якщо така перевірка дає задовільні результати, а потужність дизеля все ж таки свідомо нижче нормаль-

ною, необхідно послідовно перевірити максимальні холості оберти двигуна, правильність установки паливного насоса по куту випередження подачі палива, величину і рівномірність подачі палива по циліндрах дизеля.



**Рис. 6. Алгоритм пошуку причини нестійкої роботи дизеля**

Коли знижена потужність дизеля супроводжується димним випуском, при відшуканні причин несправностей слід враховувати колір випускних газів, як це було описано раніше.

Нестійка робота дизеля спостерігається головним чином тоді, коли кількість палива подається в циліндри не відповідно до навантаження на колінчастому валу дизеля; унаслідок «водіння» рейки регулятором. При цьому швидкість обертання валу коливається в значних межах.

В основному нестійка робота дизеля викликається несправністю регулятора і механізму управління подачею палива, перебоями в подачі палива. Причини, що викликають нестійку роботу дизеля, приведені на рис. 6.

Стукоти в двигуні виникають, коли в камері згорання передчасно з'являються паливо або масло, які, заплавши, створюють різке підвищення тиску в циліндрі.

Причинами цього можуть бути: підтікання палива в розпилювачах форсунок, неправильна установка паливного насоса по куту випередження подачі на двигуні (раннє впорскування палива), проникнення оливи в камеру згорання при заляганні поршневих кілець або їх надмірному зносі, засмоктування оливи з повітрям з очисника повітря.

Двигун 2019 року випуску з наробітком 900 мотогодин. При дослідженні використовували стандартний комплект діагностування дизельних двигунів «Дельфін-1М», а саме: датчик ультразвуку та датчик низьких частот, які

були встановлені на головці двигуна; датчик прив'язки «дизель» і датчик високих частот, які встановлювалися на кожен паливну магістраль високого тиску та форсунку відповідно. Дослід мав на меті визначити динамічні показники спрацювання плунжера ПНВТ та роботи форсунки вибраної секції. Досліди були проведені для кожного циліндра двигуна окремо, що дало можливість потім порівняти результати між ними. Загальна картина знятих показників роботи першої секції ПНВТ та форсунки першого циліндра двигуна зображено на рис. 7.

При більш детальному аналізі результатів, ми виділили і залишили на екрані лише ті показники датчиків, які потрібні для дослідження, які можна побачити на рис. 8. На даному графіку відображені показники датчиків прив'язка «дизель» та датчика ВЧ.

При детальному розгляді та аналізі проведених досліджень виявили певні закономірності та особливості роботи паливної апаратури дизеля, які необхідно враховувати при її діагностуванні. Так на холостих обертах ( $740 \text{ хв}^{-1}$ ) датчик прив'язки «відчуває» роботу всіх плунжерів ПНВТ двигуна. Визначити на якій саме ЛВТ стоїть датчик можна лише по найбільшій амплітуді графіка спрацювання плунжера (див. рис. 9).

При розгоні двигуна до номінальних обертів ( $2500 \text{ хв}^{-1}$ ) та подальшому відновленні холостого ходу картина його роботи дещо змінюється. Перехідний режим розгону практично не відрізняється від холостого ходу і відрізняється він лише тим, що збільшилась амплітуда графіка. Режим переходу двигуна з номінальних обертів на холості показав нам неможливість

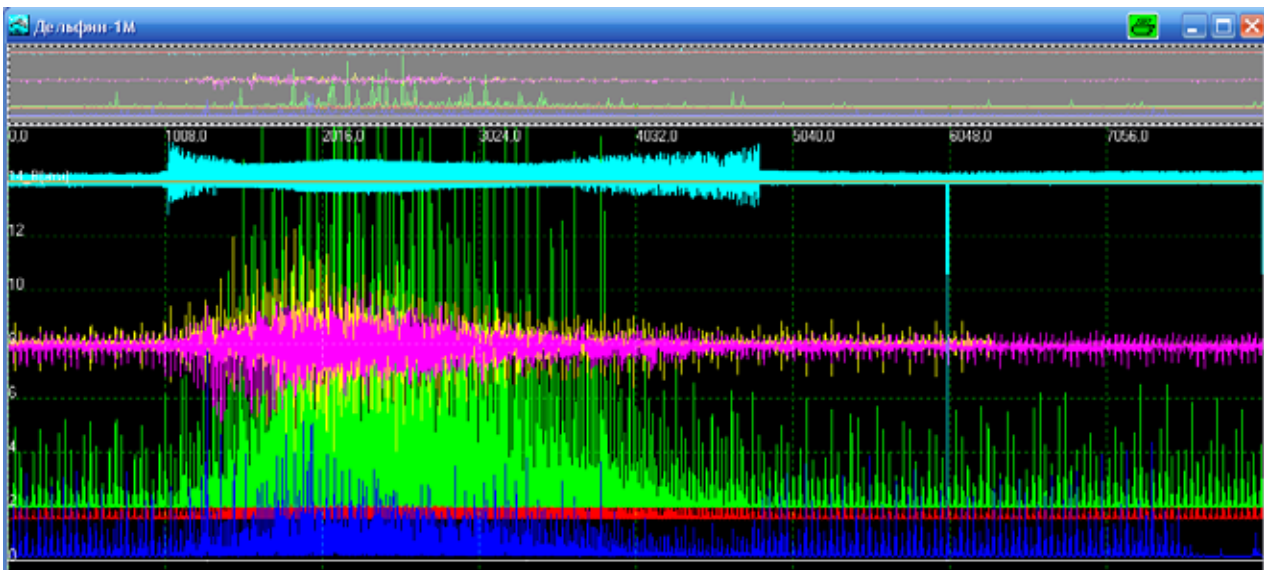


Рис. 7. Показники роботи першої секції ПНВТ та форсунки першого циліндра

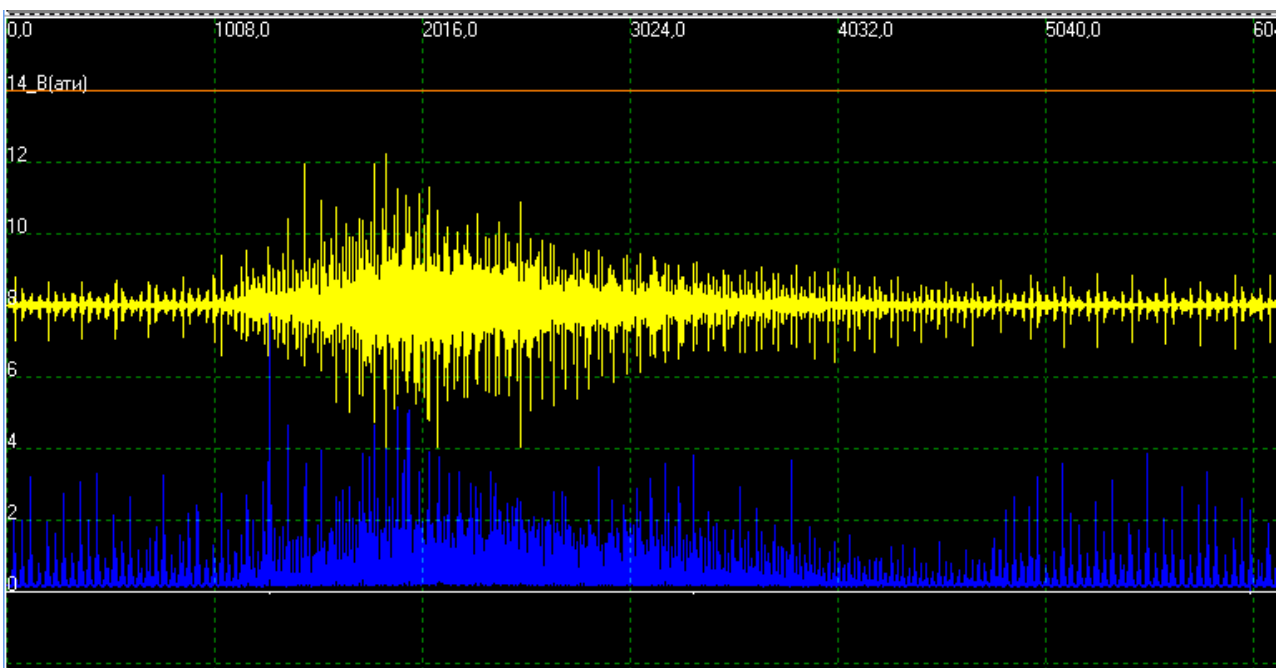


Рис. 8. Показники датчиків прив'язка «дизель» (знизу) та датчика ВЧ (зверху).

визначення на графіку ЛВТ до якої кріпиться датчик, так як графік приймає форму, яка зображена на рис. 10.

Це пов'язано з тим, що під час зниження обертів колінвалу двигуна знижуються і оберти кулачкового валу ПНВТ, відповідно знижується і поступальний рух плунжерів, що веде за собою невелике зниження тиску у ЛВТ, яке характерне для рядних ПНВТ. Це все впливає на процес зняття сприйняття інформації датчиком, який реагує на мікродеформацію трубок ЛВТ.

За результатами знятих показників оцінили орієнтовний час розпилення палива форсункою, який склав в середньому 1,5...2т мс. в залежності від режиму роботи дизеля. Час передачі тиску від плунжера до форсунки – 0,47 мс.

Знявши показники з паливної апаратури дизельного двигуна дійшли наступних висновків.

Відсічні клапани плунжерів ПНВТ знаходяться не в найкращому стані, про це кажуть нерівномірні покази датчика. Це свідчить про те, що на клапанах вже є певні відкладення.

Також можна з упевненістю сказати, що стан клапанів тісно пов'язаний з якістю сучасного дизельного палива.

Стан форсунок двигуна також далеко не новий, але знаходиться в межах норми і вони виконують своє функціональне призначення. Форсунки мають помітне закоксування посадочних місць, що на осцилограмі відображається в більш плавних характеристиках відкриття і закриття форсунок, коли у нової ці і характеристики максимально різкі.

Діагностуючи паливну апаратуру комбайна паралельно знайшли дефект в районі 3 циліндра головки двигуна. Дефект викрив себе непритаманним для цього місця сплеском УЗ. Зробивши спектральний аналіз, отримали дані дефекту на частоті 2000...4000 Гц. і підказку «оливне голодання валів». Проаналізувавши графіки і роботу двигуна в цілому дійшли висновку, що це дефект приводу клапанів 3 циліндра, але механізатори не придали цьому факту великого значення. Через 2 місяці механізатор проводив перевірку зазорів клапанів ГРМ і виявив, що на 3 циліндрі втулка одного коромисла приводу клапана розламана, а друга вилізла зі свого місця посадки. Дефект приводу ГРМ 3 циліндра зображено на рис. 11.

Найбільші сплески знаходяться в положеннях відповідно до роботи випускного та впускного клапанів

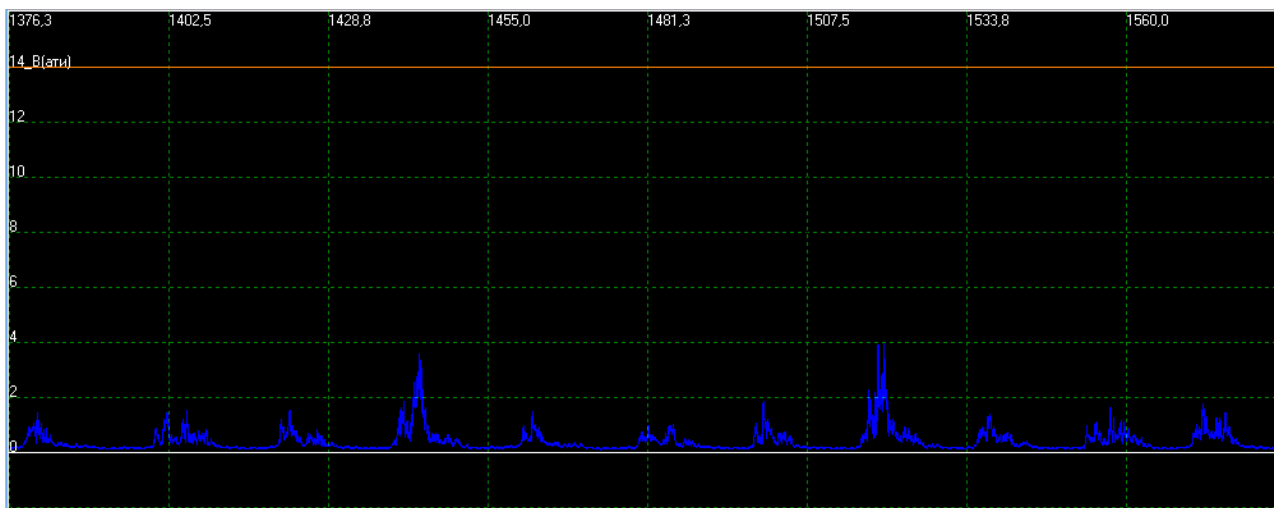


Рис. 9. Показники датчика прив'язки «дизель» на холостих обертах двигуна

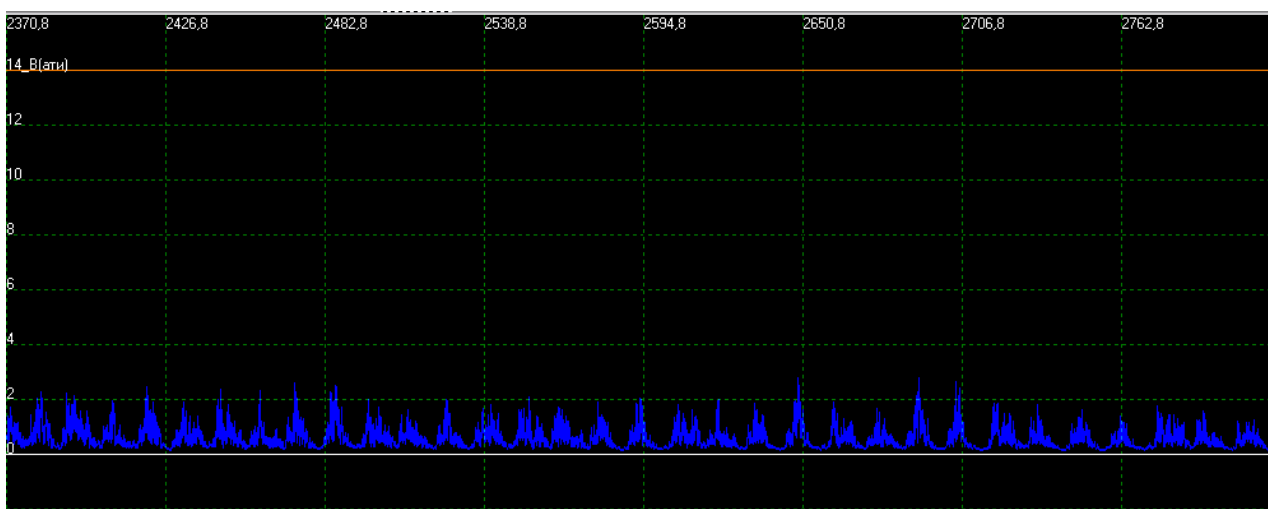


Рис. 10. Показники датчика прив'язки «дизель» при перехідному режимі розгону двигуна

(рис. 11: верхній графік – УЗ головки циліндрів, нижній – прив'язка першого циліндра). На рис. 12 датчик УЗ чітко уловлює дефект ГРМ 3 циліндра, який добре видно на фоні нормальної роботи інших циліндрів.

Більш ретельні дослідження були проведені по діагностичним параметрам форсунок двигуна. Аналізуючи роботу форсунки за даними ВЧ датчика видно, що при відкритті форсунка веде себе досить тихо,

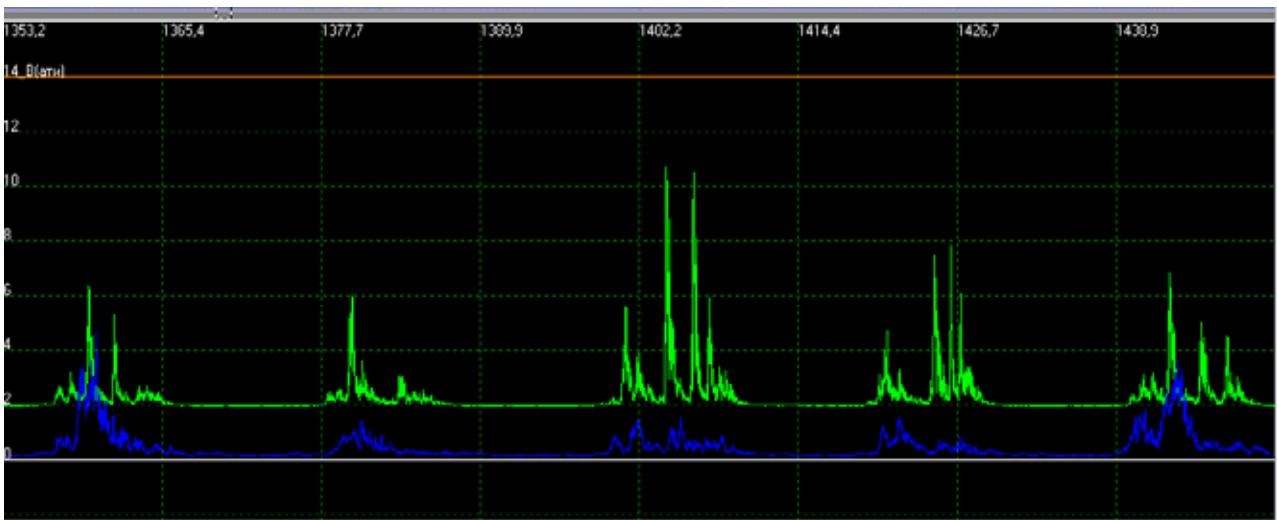


Рис. 11. Дефект приводу ГРМ 3 циліндра



Рис. 12. Дефект приводу ГРМ 3 циліндра

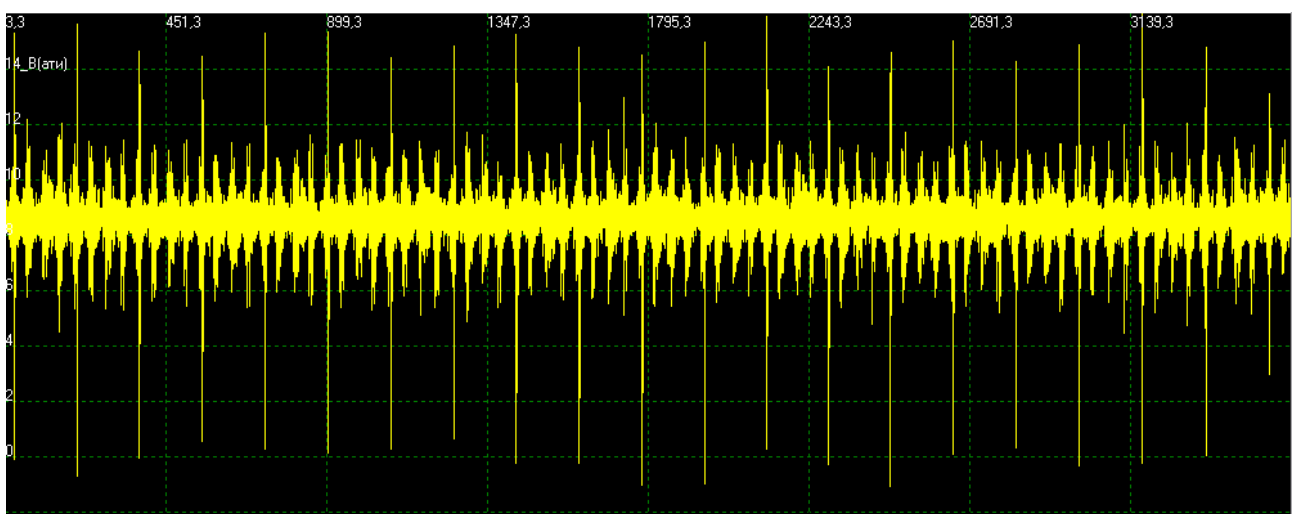


Рис. 13. Робота форсунки першого циліндра

рухомі складові (голка) не мають ударних контактів з іншими деталями конструкції. Така робота забезпечується в першу чергу протидією пружини форсунки та центруванні голки розпилювача тиском впорскуваного палива. Після характерного впорскування палива в камеру згорання, відбувається закриття форсунки, яке характеризується потужним сплеском ВЧ складової показників. Це пояснюється самою суттю впорскування в даний момент. Форсунка повинна максимально різко закінчувати процес впорскування, від цього залежить підтікання палива в розпилювачі. Якщо форсунка недостатньо швидко закриється, то залишки палива будуть підтікати в розпилювачі, що в подальшому відіб'ється закоксуванням розпилювача, яке веде за собою порушення утворення фекела розпилення та горіння палива. Як наслідок збільшиться токсичність ВГ двигуна. Ці всі фактори тягнуть за собою втрату потужнісних характеристик та підвищене споживання палива двигуном, яке в подальшому обов'язково відіб'ється недешевим ремонтом паливної апаратури.

Отже, дослідивши діагностичні параметри по форсунці першого циліндра, дефектів виявлено не було. Всі

показники відповідають нормі. На рис. 13. видно справну роботу і чітке закривання форсунки.

Дослідивши роботу форсунки другого циліндра виявили дефект, а саме: закоксування посадочного місця голки розпилювача. Це видно по осцилограмі, зображеній на рис. 14: відсутність різких сплесків закриття форсунки знаменує про утруднений рух голки розпилювача і нечітке закінчення процесу впорскування палива до камери згорання.

Характеристика роботи форсунки третього циліндра зображена на рис. 15. Форсунка має дещо завищену енергію закривання по ВЧ сигналу датчика, що вказує на спрацювання спряження голки та її посадочного місця.

Результати діагностування форсунки четвертого циліндра зображені на рис. 16. Така картина відповідає нормальній роботі форсунки. Загалом по цій форсунці дефектів не виявлено.

**Висновки.** При детальному розгляді та аналізі проведених досліджень виявили певні закономірності та особливості роботи паливної апаратури дизеля, які необхідно враховувати при її діагностуванні. Так на холостих обертах (740 хв<sup>-1</sup>) датчик прив'язки «відчуває» роботу всіх плунжерів ПНВТ двигуна. Визначити на якій



Рис. 14. Робота форсунки другого циліндра

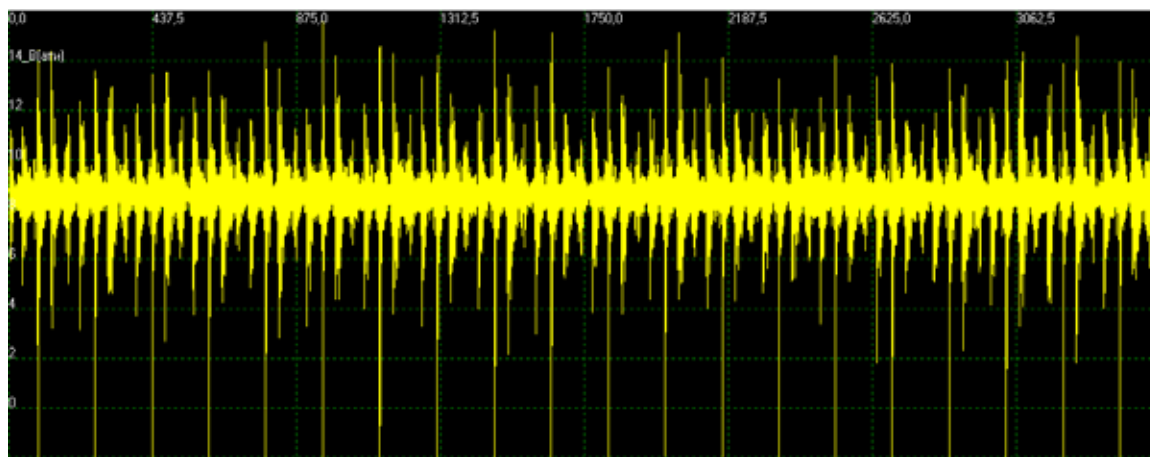


Рис. 15. Робота форсунки третього циліндра

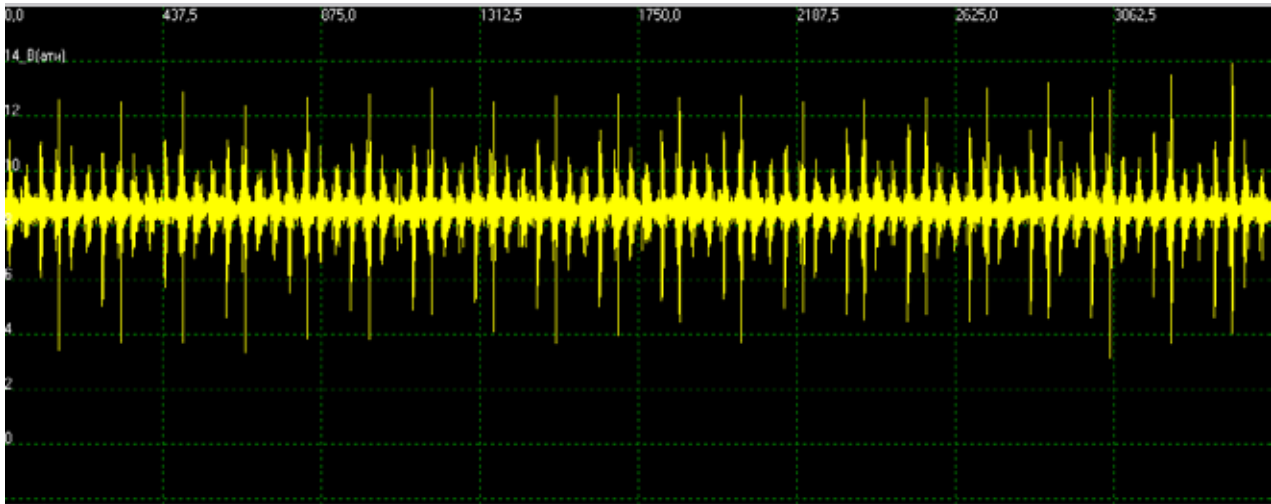


Рис. 16. Робота форсунки четвертого циліндра

саме ЛВТ стоїть датчик можна лише по найбільшій амплітуді графіка спрацювання плунжера.

При розгоні двигуна до номінальних обертів ( $2500 \text{ хв}^{-1}$ ) та подальшому відновленні холостого ходу картина його роботи дещо змінюється. Перехідний режим розгону практично не відрізняється від холостого ходу і відрізняється він лише тим, що збільшилась амплітуда графіка. Режим переходу двигуна з номінальних обертів на холості показав нам неможливість визначення на графіку ЛВТ до якої кріпиться датчик, так як графік приймає форму. Це пов'язано з тим, що під час зниження обертів колінвалу двигуна знижуються і оберти кулачкового валу ПНВТ, відповідно знижується і поступальний рух плунжерів, що веде за собою невелике зниження тиску у ЛВТ, яке характерне для рядних ПНВТ. Це все впливає на процес зняття сприйняття інформації датчиком, який реагує на мікродеформацію трубок ЛВТ. За результатами знятих показників оцінили орієнтовний час розпилення палива форсункою, який склав в середньому  $1,5...2 \text{ т мс}$ . в залежності від режиму роботи дизеля. Час передачі тиску від плунжера до форсунки –  $0,47 \text{ мс}$ .

Більш ретельні дослідження були проведені по діагностичним параметрам форсунок двигуна. Аналі-

зуючи роботу форсунки за даними ВЧ датчика встановлено, що при відкритті форсунка веде себе досить тихо, рухомі складові (голка) не мають ударних контактів з іншими деталями конструкції. Така робота забезпечується в першу чергу протидією пружини форсунки та центруванні голки розпилювача тиском впорскуваного палива. Після характерного впорскування палива в камеру згорання, відбувається закриття форсунки, яке характеризується потужним сплеском ВЧ складової показників. Це пояснюється самою суттю впорскування в даний момент. Форсунка повинна максимально різко закінчувати процес впорскування, від цього залежить підтікання палива в розпилювачі. Якщо форсунка недостатньо швидко закриється, то залишки палива будуть підтікати в розпилювачі, що в подальшому відіб'ється закоксуванням розпилювача, яке веде за собою порушення утворення фекела розпилення та горіння палива. Як наслідок збільшується токсичність ВГ двигуна. Ці всі фактори тягнуть за собою втрату потужнісних характеристик та підвищене споживання палива двигуном, яке в подальшому обов'язково відіб'ється недешевим ремонтом паливної апаратури.

#### Бібліографічні посилання:

1. Aldoshin, N., & Didmanidze, O. (2018). Harvesting lupines albus axial rotory combine harvesters. *Research in Agricultural Engineering* 64(4): 209–214.
2. Astashev V., & Krupenin V. (2017). Efficiency of vibration machines. *Engineering for Rural Development* 16: 108–113.
3. Chaplygin, M.E. & Zhalnin, E.V. (2022). Determining the performance quality of combine harvesters operating. *Agricultural Machinery and Technologies* 13(4): 71–76. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2019-13-4-71-76>.
4. Ding, Y., Wang, X., Peng, J., & Xia, Z. (2020). Visual navigation system for wheel-type grain combine harvester. *Smart Agriculture* 2: 89–102.
5. Dong, H., Chen, C., Wang, W., Peng, S., Hang, J., Cui, K., & Nie, L. (2017). The growth and yield of a wet-seeded rice-ratoon rice system in central China. *Field Crops Research*. 208: 55–59.
6. Dubbini, M., Pezzuolo, A., De Giglio, M., Gattelli, M., Curzio, L., & Covi, D. (2017). Last generation instrument for agriculture multispectral data collection. *CIGR Journal* 19: 158–163.
7. Fu, J., Zhang, G., Xie, G., Wang, Y., Gao, Y., & Zhou, Y. (2020). Development of double-channel feeding harvester for ratoon rice. *CSAE* 36: 11–20.
8. Hryniv, A., Rogovskii, I., Aulin, V., Lysenko, S., Titova, L., Zagurskiy, O., & Kolosok, I. (2020). Development of a system for determining the informativeness of the diagnosing parameters of the cylinder-piston group of the diesel engines in operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 3 (5(105)): 19–29. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206073>.

9. Jotautiene, E., Juostas, A., Janulevicius, A., & Aboltins, A. (2019). Evaluation of bearing reliability of combine harvester straw chopper. *Engineering for Rural Development* 18: 625–629.
10. Kuzmich, I.M., Rogovskii, I.L., Titova, L.L., & Nadtochiy, O.V. (2021). Research of passage capacity of combine harvesters depending on agrobiological state of bread mass. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 677: 052002. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052002>.
11. Lopes, G.T., Magalhães, P.S.G., & Nóbrega, E.G.O. (2002). Ae-automation and engineering technologies: Optimal header height control system for combine harvesters. *Biosystem Engineering* 81: 261–272.
12. Masek, J., Novak, P., & Jasinskas, A. (2017). Evaluation of combine harvester operation costs in different working conditions. *Engineering for Rural Development*. 16: 1180–1185.
13. Miu, V. (2016). *Combine Harvesters: Theory, Modeling, and Design*. CRC 16: 208–224.
14. Nadtochiy, O. & Titova, L. (2018). Simulation of agricultural processes. *TEKA* 18(2): 39–49.
15. Najafi, P., Asoodar, M., Marzban, A., & Hormozi, M. (2015). Reliability analysis of agricultural machinery: A case study of sugarcane chopper harvester. *AgricEngInt: CIGR Journal* March 17(1): 158–165.
16. Nazarenko, I., Dedov, O., Beryk, I., Rogovskii, I., Bondarenko, A., Zapryvoda, A., & Titova, L. (2020). Study of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 6 (7(108)): 71–79. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217747>.
17. Nazarenko, I., Mishchuk, Y., Mishchuk, D., Ruchynskiy, M., Rogovskii, I., Mikhailova, L., Titova, L., Berezovyi, M., & Shatrov, R. (2021). Determination of energy characteristics of material destruction in the crushing chamber of the vibration crusher. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 4(7(112)): 41–49. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239292>.
18. Novotny, J. (2016). Technical and natural sciences teaching at engineering faculty of FPTM UJEP. *Engineering for Rural Development*. 15: 16–20.
19. Pisarenko, G., Voinalovych, O., Rogovskii, I., & Motrich, M. (2019). Probability of boundary exhaustion of resources as factor of operational safety for agricultural aggregates. *Engineering for rural development* 18: 291–298.
20. Rogovskii, I. (2020). Algorithmically determine the frequency of recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research* 11(1): 155–162.
21. Rogovskii, I., Titova, L., Novitskii, A., & Rebenko, V. (2019). Research of vibroacoustic diagnostics of fuel system of engines of combine harvesters. *Engineering for rural development* 18: 291–298.
22. Rogovskii, I.L., Titova, L.L., Voinash, S.A., Troyanovskaya, I.P., & Sokolova, V.A. (2021). Change of technical condition and productivity of grain harvesters depending on term of operation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 720: 012110. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/720/1/012110>.
23. Savinyh, P., Sychugov, Y., Kazakov, V., & Ivanovs, S. (2018). Development and theoretical studies of grain cleaning machine for fractional technology of flattening forage grain. *Engineering for Rural Development* 17: 124–130.
24. Voinalovych, O., Hnatiuk, O., Rogovskii, I., & Pokutnii, O. (2019). Probability of traumatic situations in mechanized processes in agriculture using mathematical apparatus of Markov chain method. *Engineering for rural development* 18: 563–569.
25. Wang, Z., Che, D., Bai, X., & Hu, H. (2018). Improvement and experiment of cleaning loss rate monitoring device for corn combine harvester. *CSAM* 49: 100–108.
26. Yata, V.K., Tiwari, B.C., & Ahmad, I. (2018). Nanoscience in food and agriculture: research, industries and patents. *Environmental Chemistry Letters* 16: 79–84.
27. Yezekyan, T., Marinello, F., Armentano, G., Trestini, S. & Sartori, L. (2020). Modelling of harvesting machines' technical parameters and prices. *Agriculture* 10(6): 194–204.
28. Zubko, V., Sirenko, V., Kuzina, T., Koszel, M., & Shchur, T. (2022). Modelling wheat grain flow during sowing based on the model of grain with shifted center of gravity. *Agricultural Engineering* this link is disabled 26(1): 25–37.

**Mozharivskii D. M.**, Postgraduate, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**Titova L. L.**, Candidate of Technical Sciences, Assistant of Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

#### **Engineering management of diagnostic parameters of grain harvester engines**

*The article formulates methodical approaches of engineering management regarding the diagnostic parameters of engines of grain harvesters. It is noted that the numerical value of the advance angle of fuel supply is one of the main parameters of a combine diesel engine. The main technical and economic indicators of the engine – power and economy – depend on the accuracy of setting the advance angle of fuel supply. After 900-1000 hours of engine operation, the precisely set numerical value of the fuel advance angle decreases. In this regard, it is recommended to check the fuel advance angle during the third maintenance, when a new or repaired high-pressure fuel pump is installed on the engine. Changing the angle of advance of the fuel supply in the direction of increase or decrease affects mainly the duration of the fuel ignition delay. This leads to a change in engine power and efficiency, the average temperature of the cycle, the temperature of the exhaust gases and the temperature of the outer surface of the exhaust pipe.*

*The authors developed the positioning of the diagnostic device, mastered by specialists of the diagnostic group, which must meet the following requirements: multi-functionality and registration of several parameters; ease of use and portability; accumulation of data - measurement results; informativeness of the indicator screen; expert-informational programs: built-in and external (computer); specialized built-in programs. The article provides approaches regarding the poor technical*



*condition of the fuel equipment during operation, which can be the following main problems in the operation of a diesel engine: the diesel engine does not start, does not develop normal power, operates unstable, smoke emission is observed. It should be borne in mind that these problems can be caused by the malfunction of other diesel units. Therefore, when finding the reason for the unsatisfactory operation of the diesel engine, together with the fuel equipment, other units of the tractor that can cause similar problems should be checked.*

**Key words:** *parameter, diagnostics, harvester, engine, engineering management.*

## ПІДГОТОВКА НАСІННЄВОГО МАТЕРІАЛУ КУКУРУДЗИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ НА РІЗНИХ РЕЖИМАХ ЯК СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ВРОЖАЙНОСТІ

**Панкова Оксана Володимирівна**

кандидат сільськогосподарських наук, доцент  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна  
ORCID: 0000-0003-2866-1858  
pankova\_oksana@ukr.net

**Сировицький Кирило Геннадійович**

старший викладач  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0000-0003-0250-8994  
gaver89@ukr.net

**Харченко Сергій Олександрович**

доктор технічних наук, професор  
Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна  
ORCID: 0000-0002-4883-2565  
kharchenko\_mtf@ukr.net

**Оничко Віктор Іванович**

кандидат сільськогосподарських наук, доцент  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0000-0003-0584-319X  
onichko@gmail.com

**Тарельник В'ячеслав Борисович**

доктор технічних наук, професор  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0000-0003-2005-5861  
viacheclav.tarelnyk@snau.edu.ua

**Думанчук Михайло Юрійович**

кандидат технічних наук, доцент  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0000-0003-3559-4729  
mykhailo.dumanchuk@snau.edu.ua

*У статті проведений аналіз впливу електромагнітного випромінювання (ЕМВ) червоного (660 нм), синього (460 нм) діапазонів, та сумісного впливу, з експозицією 10 та 30 хвилин на кожний варіант опромінення. Для дослідів були обрано кукурудзу, як одну з найпоширеніших культур на теренах України. В якості контролю використовували неопромінене насіння. Вивчалися енергія проростання та лабораторна схожість і додатково довжина корінців та проростків. Отримані результати показали, що найвагомий вплив на енергію проростання та лабораторну схожість мав варіант сумісної дії і червоного і синього діапазонів впродовж 30 хвилин. Саме такий режим обробки в лабораторних умовах показує можливості активізації біопотенціалу насіння. Таким чином, саме активація групи різних фоторецепторів, і фітохромів і кріптохрому, є найефективнішим. Обробка впродовж 10 хвилин майже не мала впливу во всіх варіантах довжини хвилі. Це може бути пов'язано з тим, що вплив ЕМВ має пролонговану дію і може проявитися пізніше.*

*В порівнянні різних варіантів дослідів ефект виявлений у кукурудзи, що можливо пояснити по-перше розміром насіння, яке у кукурудзи є крупним, а, отже, і площа поверхні найбільша. По-друге виявлений факт можливо пояснити особливостями біохімічних процесів, зокрема їх швидкості, що потребує подальшого вивчення.*

*В цілому, підвищення лабораторної схожості на енергії проростання насіння кукурудзи, що є незначним в лабораторних умовах, але може мати вагомий ефект в умовах польових досліджень, з урахуванням погодних умов та інших факторів вирощування. Не виявлено закономірності змін в показниках довжини корінців та проростків у всіх варіантах дослідів, що може говорити про нечутливість даного показника до обробки ЕМВ.*

**Ключові слова:** електромагнітне випромінювання, довжина хвилі, фітохром, кукурудза, біопотенціал, обробка насіння, врожайність, агротехнології.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.7>

**Вступ.** Фундаментом виробництва продукції рослинництва є якісний насіннєвий матеріал, який забезпечує 40-45% реалізації біопотенціалу рослин.

Останнім часом застосування фізичних методів стимуляції росту рослин стає все більш популярним, завдяки менш шкідливому впливу на навколишнє середовище. Всі живі процеси сильно залежать від обміну енергією між клітиною і середовищем. Це основна концепція «квантового сільського господарства», яке інтенсивно обговорюється в останні десятиліття ([www.btinternet.com](http://www.btinternet.com)). Енергетичний вплив – це інноваційний напрямок досліджень для підвищення врожайності сільськогосподарських культур. Така обробка ініціює фізіологічні та біохімічні зміни, які впливають на процеси росту і розвитку рослин і у підсумку підвищується врожайність і якість продукції. Обробка фізичними методами впливу призводить до зміни показників життєздатності насіння (проростання енергії, схожості та рівномірності проростання). Такими методами можуть бути: магнітне поле, гамма-опромінення, електричне поле, лазерне випромінювання, звукова енергія, світлова та теплова енергія (Govindaraj et al., 2017, Bezpal'ko et al., 2021, Pankova et al., 2021).

Рослини можна класифікувати за реакцією на світло для проростання наступним чином: ті, яким потрібне світло для проростання; ті, яким потрібна темрява для проростання; ті, які мають великий відсоток насіння, нейтрального до світла. Вважається, що дрібнонасінні рослини проростуть лише за наявності світла, щоб уникнути проростання занадто глибоко в ґрунті, де будуть виснажувати поживні речовини насіння до досягнення світла для фотосинтезу (Pons 2000).

Показано, що червоне та дальнє червоне світло впливає на фотоморфогенез, таким чином, співвідношення червоного та дальнього червоного світла також відіграє важливу роль у регуляції цвітіння (Simpson and Dean, 2002). Цвітіння рослин в основному регулюється фітохромами (групою рослинних пігментів), які зустрічаються у двох формах: Pr (реагує на червоне світло) і Pfr (реагує на дальнє червоне світло). Ці два пігменти (Pr і Pfr) перетворюються вперед і назад. Pr перетворюється в Pfr при освітленні червоним світлом, а Pfr в Pr при освітленні дальнім червоним світлом. Активною формою, яка викликає цвітіння, є Pfr. Pr – виробляється природним шляхом в рослині. Співвідношення Pr до Pfr знаходиться в рівновазі, коли рослина отримує світло (вдень), оскільки Pr перетворюється на Pfr під дією червоного світла, а Pfr перетворюється назад у Pr під дією далекого червоного світла. Однак зворотне перетворення Pfr також можливе в темряві реакція, тому саме нічний (темний) період головним чином впливає на співвідношення Pr до Pfr і контролює час цвітіння рослин (Downs and Thomas, 1982).

Окрім фоторецепторів фітохромів в рослинах містяться фоторецептори криптохромів – рецептори синього світла, які опосередковують різні реакції, викликані світлом, у рослин. Наприклад, криптохромів арабідопсису працюють разом із фітохромами рецепторами червоного/далекого червоного світла, щоб регулювати

різні світлові реакції, включаючи регуляцію подовження клітин і фотоперіодичне цвітіння, а також виявлено, що вони діють разом із фототропінами рецепторів синього світла, опосередковуючи регуляцію відкриття продихів. Останнім часом було досягнуто значного прогресу в розумінні функцій криптохрому в інших культурах, дводольних, таких як горох і помідори. (Li & Yang, 2007).

Неабиякий інтерес наукового співтовариства викликала лазерна біостимуляція з огляду на потенціал для підвищення проростання насіння, фізіологічних, біохімічних і врожайних властивостей зернових культур. Asghar et al. провели дослідження для оцінки впливу передпосівної обробки насіння, зокрема, лазером на цукор, білок, азот, перекис водню (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), аскорбінову кислоту (AsA), пролін, фенольний і малоновий діальдегід (MDA), а також вміст хлорофілу сої. Також були проаналізовані специфічну активність ферментів, таких як протеаза (PRT), амілаза (AMY), каталізатор (CAT), супероксиддисмутаза (SOD) і пероксиди (POD). Під дією як лазерної передпосівної обробки суттєво підвищувалася питома активність ферментів (під час проростання та раннього росту), біохімічний вміст і вміст хлорофілу. Результати показали, що передпосівна обробка насіння лазером має потенціал для підвищення біологічних компонентів сої, вмісту хлорофілу та метаболічно важливих ферментів. (2016).

Світлодіоди, як джерело освітлення рослин, використовувалися більше 20 років тому, коли салат вирощували під червоними (R) світлодіодами та синіми (B) люмінесцентними лампами. Літературні джерела підтверджують успішне зростання рослин під світлодіодним освітленням (Singh et al., 2015; Yanagi and Okamoto, 1997). Червоне світло (610–720 нм) необхідне для розвитку фотосинтетичного апарату та фотосинтезу, тоді як синє світло (400–500 нм) також важливе для синтезу хлорофілу, розвитку хлоропластів, відкриття продихів і фотоморфогенезу (Saebo et al., 1995). Кілька експериментів у садівництві з картоплею, редькою та салатом (Stutte et al., 2009) показали потребу в синьому (400–500 нм) світлі для більшої біомаси та площі листя. Однак різні довжини хвиль червоного (660, 670, 680 і 690 нм) і синього (430, 440, 460 і 475 нм) світла можуть мати неоднаковий вплив на рослини в залежності від виду рослин (Li et al., 2012). Було показано, що дальнє червоне світлодіодне світло (700–725 нм), яке знаходиться за межами PAR, підтримує ріст рослин і фотосинтез (Stutte et al., 2009). Гойнс та ін. (1997) показали, що пшениця (*Triticum aestivum* L., сорт «USU-Super Dwarf») може завершити свій життєвий цикл під дією лише червоних світлодіодів, але більші рослини (більше сухої речовини пагонів) і більша кількість насіння виробляється в присутності червоних світлодіодів, доповнених кількістю синього світла.

Попередні дослідження з використанням світлодіодів показали, що монохроматичне оптичне випромінювання червоного діапазону ( $\lambda=660$  нм) активізує проростання насіння ячменю і прискорює гідролітичний розпад запасних речовин внаслідок стимуляції ферментативної активності, що дає можливість говорити про те що воно приводить до підвищення продуктивності рослин.

(Pankova O.V., 2010, Lysyshenko M., Pankova O., 2016). Отримані результати підтверджують данні літературних джерел щодо активізації фітохромної системи рослин, яка в свою чергу запускає каскад біохімічних реакцій.

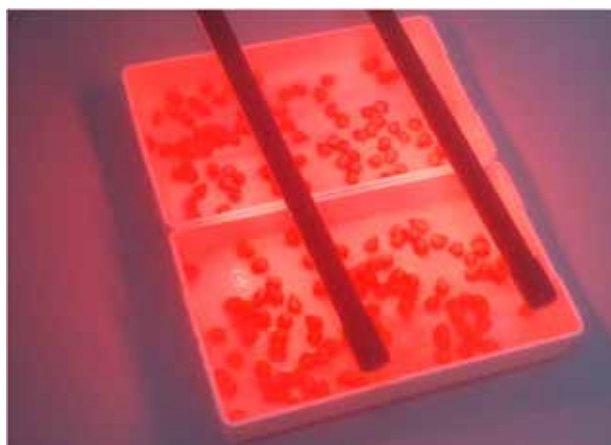
Вирішити завдання підвищення біопотенціалу можливо завдяки розробленню машин та обладнання з інноваційними робочими органами на основі високопродуктивних, екологічно-безпечних, ресурсозберігаючих технологій підготовки насіннєвого матеріалу. В основу запропонованої авторами технології, як її складової, було запропоновано покласти обробку з використанням електромагнітного випромінювання (ЕМВ) різних діапазонів та режимів. Даний метод має забезпечити збільшення виробництва продукції рослинництва, зниження енерговитрат, запобігання забрудненню навколишнього середовища. Метою даного дослідження було провести теоретичне обґрунтування параметрів обробки ЕМВ насіннєвого матеріалу.

Матеріали і методи досліджень. Дослідження були проведені на базі навчально-наукової лабораторії екологічного землеробства та природокористування Центру колективного користування Сумського національного аграрного університету. Обробка здійснювалась з використанням експериментальної лабораторної установки на основі напівпровідникових світлодіодних джерел ЕМВ

з довжиною хвилі 660 нм (червоний діапазон) та 460 нм (синій діапазон) (рис. 1). Застосовували як окремо кожний з діапазонів, так і сумісно. В якості контролю було неопромінене насіння. Експозиція 10 хвилин та 30 хвилин за кожним з варіантів опромінення. Було вивчено: посівні якості насіння (енергія проростання, схожість насіння). В якості контролю використовували неопромінене насіння.

Для проведення досліджень відбирали 4 проби по 100 насінини на кожний варіант досліду, розміщували в ростильнях на зволоженому фільтрувальному папері, пророщування проводили в термостаті відповідно до ДСТУ 4138-2002. Проросле насіння підраховувати у два строки: на 3-й день визначити енергію проростання, на 7-й – схожість. Схожість визначали як середнє арифметичне результатів пророщування чотирьох проб. Додатково вивчали довжину корінців та проростків на сьому добу експерименту. В таблицях 1–3 приведені середні значення результатів обліку. Для проведення досліджень обрали одну з найбільш популярних в Україні та перспективну сільськогосподарську культуру – кукурудзу.

Кукурудза представлена гібридом ДН Гарант, 2021 року генерації. Відповідно до свідоцтва на насіння чистота складає 99,8%, маса тисячі насінин 314,8 г, енергія проростання 97%, схожість насіння 97%, вологість 12,2%.



А)



Б)

**Рис. 1. Процес обробки насіння ЕМВ**  
**А) червоний діапазон (660 нм) Б) комбіновано червоним та синім діапазонами (460+660 нм)**

**Результати обліку показників посівної якості зерна кукурудзи (середні значення)**

**Таблиця 1**

Варіанти досліду	Енергія проростання	Схожість	Довжина проростка	Довжина корінця
1. 660нм 10 хв	84	85	9,6	13,9
2. 660нм 30 хв	96	91	7,3	13,5
3. 460 нм 10 хв	90	90	7,3	12,7
4. 460 нм 30 хв	96	94	8,4	17,0
5. 660+460 нм 10 хв	86	90	6,8	16,6
6. 660+460 нм 30 хв	97	95	7,1	14,4
7. контроль	83	85	7,3	12,4

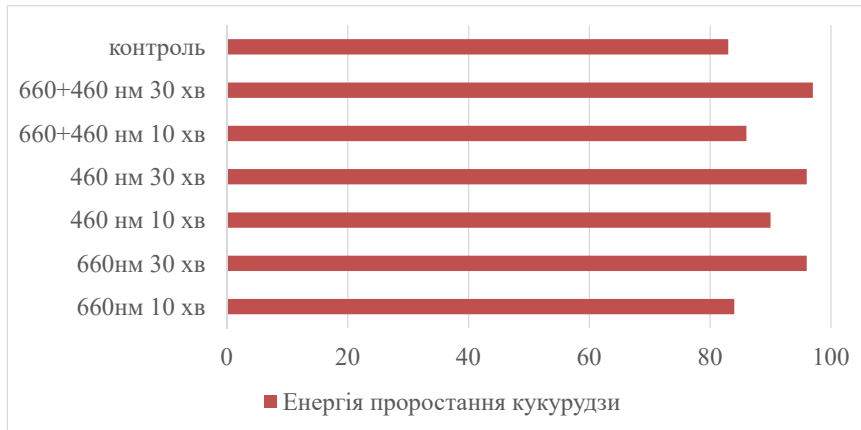


Рис. 2. Енергія проростання насіння кукурудзи в залежності від різних режимів обробки насіння ЕМВ

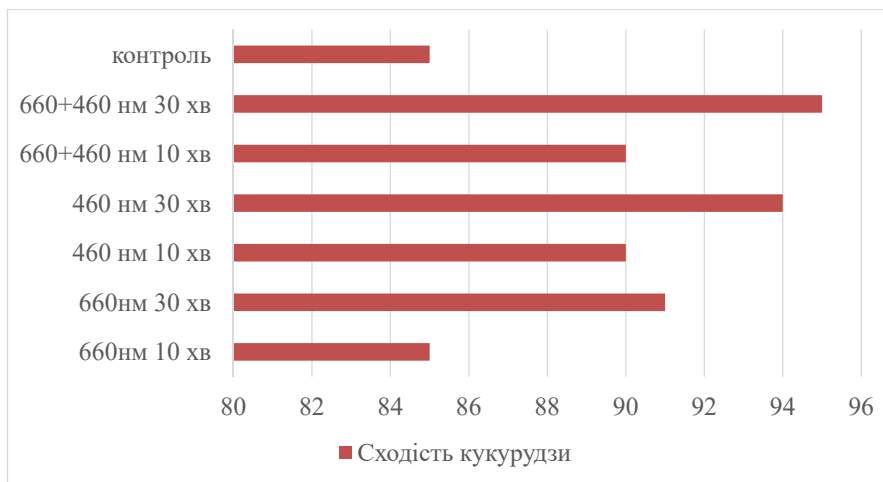


Рис. 3. Лабораторна схожість насіння кукурудзи в залежності від різних режимів обробки насіння ЕМВ

**Результати.** Отримані результати показали певний вплив обробки насіння ЕМВ різних режимів (таблиця 1). Так, найбільший показник енергії проростання спостерігали у варіанті 660+460 нм 30 хв. (97%), найнижчий у контролі та варіанті 660 нм 10 хв (84%) відносно контролю де показник становив 83%. У випадку кукурудзи високий результат показав варіант 660 нм 30 хв. і склав 98%, що говорить про значний вплив фітохрому на дану культуру.

При обробці результатів не спостерігалось достовірних змін у довжині корінців та проростків, що може бути говорити про нечутливість даних показників до фізичного впливу ЕМВ.

**Обговорення.** Відсутність ефекту від опромінення з експозицією 10 хвилин на енергію проростання та на схожість може бути пов'язаним з недостатнім часом експозиції та тим, що такі показники відносяться до пролонгованих відповідей, а не швидких. Більш істотний прояв впливу ЕМВ на кукурудзу можливо пояснити по-перше розміром насіння, яке у кукурудзи є крупним, а значить і площа поверхні велика. По-друге виявлений факт можливо пояснити особливостями біохімічних процесів, зокрема їх швидкості, що потребує подальшого вивчення.

Серед різних режимів ЕМВ увагу заслуговує обробка насіння комбінованим червоним та синім діапазоном впродовж 30 хвилин. Отримані результати пояснюється літературними даними. Так, показано, що фізичні фактори імпортують різні види енергії в клітини. Це свого роду «енергетичний вплив», який стимулює ферменти та інші біохімічні реакції, що важливі на перших етапах проростання. Імпортована енергія поглинається електронами в різних молекулах. Поглинена енергія може бути перетворена в інший вид енергії (швидше за все хімічний), а потім використана для прискорення метаболізму (Govindaraj et al., 2017). Прискорення розпаду та утилізації запасних речовин зародку може викликати в свою чергу ростових процесів.

**Висновки.** Таким чином, можна констатувати що обробка насіння сумісною дією червоного (660 нм) та синього (460 нм) діапазонів впродовж 30 хвилин оказує вплив на перші етапи проростання сільськогосподарських культур (кукурудзи), а саме показники енергії проростання та лабораторної схожості у межах декількох процентах, що може мати значний вплив у виробничих умовах.

### Бібліографічні посилання:

1. Asghar, T., Jamil, Y., Iqbal, M., Zia-ul-Haq, & Abbas, M. (2016b). Laser light and magnetic field stimulation effect on biochemical, enzymes activities and chlorophyll contents in soybean seeds and seedlings during early growth stages. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 165, 283–290. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.10.022>
2. Bezpal'ko, V., Stankevych, S., & Matsyura, A. (2021). Pre-sowing treatment of winter wheat and spring barley seeds with the extremely high frequencies electromagnetic field. *Ukrainian Journal of Ecology*, 11(1), 62–71. [https://doi.org/10.15421/2021\\_9](https://doi.org/10.15421/2021_9)
3. Downs, R. J. and Thomas J. F. (1982). Phytochrome regulation of flowering in the long-day plant, *Hyoscyamusniger*. *Plant Physiol.* 70: 898–900.
4. Goins G. D., Yorio, N. C., Sanwo, M. M. and Brown, C. S. (1997). Photomorphogenesis, photosynthesis and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting. *J Exp Bot.* 48: 1407–1413.
5. Govindaraj, M., Masilamani, P., Albert, V. A., & Bhaskaran, M. (2017). Effect of physical seed treatment on yield and quality of crops: A review. *Agricultural Reviews, OF*. <https://doi.org/10.18805/ag.v0i0f.7304>
6. Li, Q. H., & Yang, H. Q. (2007). Cryptochrome Signaling in Plants†. *Photochemistry and Photobiology*, 83(1), 94–101. <https://doi.org/10.1562/2006-02-28-ir-826>
7. Li, H., Tang, C., Xu Z., Liu, X. and Han, X. (2012). Effects of different light sources on the growth of non heading Chinese cabbage (*Brassica campestris* L.). *J Agr Sci.* 4: 262–273.
8. Lysyshenko, M., Pankova, O. (2016). Intensyfikatsiia biokhimichnykh protsesiv u nasinni silskohospodarskykh kultur. *Inzheneriia Pryrodokorystuvannia*, 44–47 (№ 2 (6)). [Method of intensification of seeds crops vital activity] <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/2975> (in Ukrainian).
9. Pankova O.V. Proteoliz riznykh sortiv yachmeniu v zalezhnosti vid obrobky nasinnia monokhromatychnym optychnym vyprominiuvanniam chervonoho diapazonu. (2010). *Fotobiologhiia Ta Fotomedytyna*, 3–4, 66–69. [Proteolysis of different sorts of barley in dependence on treatment of seeds by monochromatic optical radiation of red range of spectrum] [http://fnjournal.univer.kharkov.ua/Ua/nomera/3\\_4\\_2010.pdf](http://fnjournal.univer.kharkov.ua/Ua/nomera/3_4_2010.pdf) (in Ukrainian).
10. Pankova, O., Puzik, V., & Lysishenko, M. (2021). Vplyv elektromahnitnoho vyprominiuvannia na roslyny. *TOV «Planeta-Print»*, Kharkiv, 159. [The influence of electromagnetic radiation on plants] [https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/8096/3/Pankova\\_Effect\\_of\\_electromagnetic\\_radiation\\_monograph\\_2021.pdf](https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/8096/3/Pankova_Effect_of_electromagnetic_radiation_monograph_2021.pdf) (in Ukrainian).
11. Pons, T. L. (2000) Seed responses to light. In Fenner M (ed). *Seeds: The Ecology of Regeneration in Plant Communities*, 2nd ed. Wallingford, UK: CABI Publishing, 237–60.
12. Saebo, A., Krekling, T. and Appelgren, M. (1995). Light quality affects photosynthesis and leaf anatomy of brich plantlets in vitro. *Plant Cell Tiss Org.* 41:177–185.
13. Simpson, G. G. and Dean, C. (2002). *Arabidopsis*, the Rosetta stone of flowering time? *Science.* 296: 285–289.
14. Singh, D., Basu, C., Meinhardt-Wollweber, M. and Roth, B. (2015). LEDs for energy efficient greenhouse lighting. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 49: 139–147.
15. Stutte, G. W., Edney, S. and Skerritt, T., (2009). Photoregulation of bioprotectant content of red leaf lettuce with lightemitting diodes. *Hort Science.* 44: 79–82.
16. Yanagi, T. and Okamoto. K. (1997). Utilization of super-bright light emitting diodes as an artificial light source for plant growth. *Acta Hort.* 418: 223–228.

**Pankova O. V.**, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

**Sirovitskiy K. G.**, Senior Lecturer, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

**Kharchenko S. O.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

**Onychko V. I.**, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

**Tarelnyk V. B.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

**Dumanchuk M. Yu.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

#### **Corn seed preparation by electromagnetic radiation in different modes as a way of yield increase**

The article analyzes the impact of electromagnetic radiation (EMR) in the red (660 nm), blue (460 nm) ranges, and combined exposure, during 10 and 30 minutes for each type of exposure. The most common agricultural crops – corn, were chosen for the experiments. Unirradiated seeds were used as a control. The energy of germination and laboratory germination and additionally the length of roots and seedlings were studied. The obtained results showed that the most significant effect on the energy of germination and laboratory germination had a variant of the combined action of both the red and blue ranges for 30 minutes. This mode of treatment in laboratory conditions that shows the possibilities of activating the biopotential of seeds. Thus, it is the activation of a group of different photoreceptors, both and phytochromes and cryptochromes, that is most effective. Treatment for 10 minutes had almost no effect with all wavelengths. This may be due to the fact that the effect of EMR has a prolonged effect and may be showed later. Germination energy and germination are studied at the initial (first week) stage of growth.

*In the comparison of different agricultural crops used in the experiment, the most noticeable effect was found in the case of corn. This can be explained, first of all, by the size of the seed, which is the largest in corn, and therefore has the largest surface area. In second place are wheat and rapeseed, for which the difference with the control. Secondly, the discovered fact can be explained by the features of biochemical processes, in particular their speed, which requires further study.*

*Overall, the increase in laboratory similarity in seed germination energy, which is insignificant in laboratory conditions, but can have a significant effect in field research conditions, taking into account weather conditions and other growing factors. No pattern of changes in the indicators of the length of roots and sprouts was found in all variants of the experiment. This may indicate the insensitivity of this indicator to EMRV treatment.*

**Key words:** *electromagnetic radiation, wavelength, phytochrome, agricultural crops, corn, biopotential, seed treatment, productivity, agrotechnology.*

## УПРАВЛІННЯ ТОЧНІСТЮ ОБРОБКИ В ГНУЧКИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМАХ

**Пуховський Євген Степанович**

доктор технічних наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0001-7843-0922

puhovskije50@gmail.com

**Фролов Володимир Костянтинович**

кандидат технічних наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0002-3697-286X

v.k.frolov@gmail.com

**Приходько Василь Петрович**

кандидат технічних наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0003-1852-3777

privas0718@gmail.com

**Бецко Юрій Михайлович**

старший викладач

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0002-7283-2207

betsko.uri@gmail.com

На сучасних верстатах з ЧПК, які становлять основу технологічного обладнання гнучких виробничих систем (ГВС), вирішені проблеми автоматизації практично всіх операцій, окрім операцій первинного налаштування інструменту та коректування його рівня. Необхідність організації в складі ГВС окремих постів для налаштування інструменту, базування та закріплення деталей в значній мірі перешкоджає переходу до безлюдного виробництва. В цих умовах наймовірнішими постають проблеми створення системи автоматичного управління точністю обробки (САУТО) в ГВС (Balakshin B.S. (1973); Nevelson M.S. (1982); Solomentcev U.M., Basin A.M., (1974); *International Journal of Automation Technology*, (2014)).

В промисловості накопичено значний досвід створення САУТО при обробці на універсальних верстатах і, особливо, на верстатах для фінішних операцій. Розповсюдження цього досвіду на дрібносерійне виробництво, де використовуються верстати з ЧПК, стримується труднощами створення ефективних вимірювальних пристроїв для фіксації первинної інформації та приладів перетворення одержаних сигналів. В якійсь мірі ці труднощі долаються за рахунок використання датчиків контакту, лазерної техніки та мікропроцесорів, здатних приймати та перетворювати первинні сигнали управляючого впливу на процес обробки (Komissarov V.I., Leontiev V.P., (1985); Sveda J., (2022)).

Відомо, що процес механічної обробки зазвичай не може бути описаним детермінованими методами, тому що характеристики вхідних сигналів технологічної системи не тільки змінюються в часі, але й залишаються неконтрольованими (Dushinsky V.V., Puhovsky E.S., Radchenko S.G., (1977); Puyovsky E.S., (2021); Antony Swic, (2014)). Тому синтез САУТО для таких нестабільних процесів повинен виконуватись з урахуванням статичної нестійкості, що породжує невизначеність. В цих умовах надзвичайно актуальною є проблема створення таких адаптивних систем управління точністю обробки, які спроможні змінювати структуру управління в залежності від результатів поточної оцінки якості управління.

В статті поставлено завдання розробки структури САУТО, визначення параметрів управління, каналів зворотного зв'язку та шляхів забезпечення заданої точності обробки.

**Мета роботи:** Розробка автоматизованої системи управління точністю обробки в умовах взаємопов'язаного програмно-керованого обладнання гнучких виробничих систем.

**Ключові слова:** точність, управління, критерій, гнучка виробнича система, механічна обробка, адаптивна система.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.8>



**Викладення основного матеріалу.** Головною метою САУТО є зменшення відхилень від заданих розмірів та форми оброблюваних заготовок. Передбачення очікуваного відхилення розмірів та введення поправки на взаємне розташування деталі та інструменту згідно цього передбачення дозволяє ліквідувати відхилення та виключити брак при обробці деталі. Помилки в передбаченні похибок обробки в основному пов'язані з їх стохастичною природою. В реальних умовах практично всі фактори, які впливають на відхилення розмірів, змінюються в процесі обробки деталі випадковим чином. Основними причинами цієї зміни є знос механізмів, неоднорідність матеріалу заготовки, знос інструменту, нестационарність механізмів верстата та процесу різання. Таким чином при дослідженні динамічних властивостей верстатів та при створенні динамічної моделі обробки необхідно розглядати цю систему з урахуванням випадкового та невизначеного характеру факторів, що впливають на точність обробки. Нестационарні процеси різання найпростіше реалізуються на верстатах з ЧПК, які забезпечують обробку з режимами, які змінюються по заданим законам. Адаптивне різання забезпечує оптимізацію процесу за рахунок режимів обробки в залежності від конкретних умов формування в кожній точці оброблюваної деталі.

В залежності від типу управляючого впливу САУТО можуть бути поділені на три види: стабілізуючі системи, які підтримують постійний управляючий параметр системи різання; програмні системи, які змінюють управляючий параметр у відповідності з заданою закономірністю та слідкуючі системи, що змінюють управляючий параметр в залежності від невідомого наперед значення змінної величини на вході автоматичної системи (Balaksyin B.S., (1973); Makarov I.M., Rakhmankulov V.Z., Nazareto V.M., (1986); Qingchun, Qinghua, (2020)).

При розробці САУТО найважливішим є вибір критерію оптимальності, який забезпечує найбільш просту та ефективну схему регулювання. Автоматичне регулювання дозволяє отримати максимальну продуктивність при допустимих значеннях параметрів точності та якості поверхні. Реалізація систем управління по економічним критеріям дуже складна, тому в якості регулюючого параметра приймають один з фізичних показників процесу різання. Розповсюджені системи, які регулюють процес різання шляхом зміни подачі або швидкості різання в залежності від зміни сили різання, крутного моменту на шпинделі верстата, температури в зоні різання, ефективної потужності приводу, вібрацій в динамічній системі, рівня шуму, силових навантажень на підшипникові вузли шпинделя і т. і.

Багатофакторний характер процесів в зоні різання не дозволяє отримати один універсальний критерій для всіх операцій та видів обробки. Але для певного типу операцій, діапазону первинних параметрів один з показників може з деякою похибкою відображати сукупність дій багатьох фізичних явищ та застосовуватись як критерій автоматичного регулювання. Зазвичай використовують узагальнений критерій, який може бути представлений в наступному виді:

$$K = \min \sum d_i (G_i - G_{i \text{нк}}) / (G_{i \text{нг}} - G_{i \text{нк}})$$

де  $G_{i \text{нк}}$ ,  $G_{i \text{нг}}$  – найкраще та найгірше значення  $G_i$  якості виконання операції при наявності тільки лінійних обмежень;  $d_i$  – вагові коефіцієнти.

Такі залежності дозволяють визначити фізичні критерії по основним показникам вторинних параметрів, таких як точність обробки, якість поверхні та стійкість інструменту. Найчастіше в якості параметра регулювання вибирають одну зі складових сили різання, температуру в зоні різання або пружні деформації системи верстата. Універсальним є економічний критерій, проте представити всі умови обробки деталі через цю функцію неможливо. Тому поряд з критерієм оптимізації в адаптивну систему вводять визначені для конкретної оброблюваної деталі та обладнання технічні обмеження.

Імовірнісний характер процесу механічної обробки, отримання точності та шорсткості поверхні дає можливість вибирати в якості законів зміни управляючих критеріїв стохастичні моделі, отримані на основі експериментальних досліджень. В промисловості накопичено величезний досвід по статистичним дослідженням оброблюваності різних матеріалів, вивченню способів та засобів отримання точності і якості поверхні. Використання таких моделей, як математичного забезпечення адаптивних систем управління точністю обробки надзвичайно ефективне.

Впровадження числового управління верстатами викликало появу пошукових адаптивних систем, які забезпечують в результаті автоматичного пошуку економічно оптимальних умов різання по всій довжині обробки деталі. Пошукова система визначає швидкість зносу інструменту, виконує статистичну обробку даних, обчислює оціночну функцію оптимальності і перебирає можливі поєднання параметрів режимів різання з метою знаходження екстремальних. На основі цього виконується управління приводами верстата.

Системи автоматичного регулювання процесом різання підтримують постійними оптимальні умови виготовлення деталі (без участі оператора), чи змінюють по заданому закону один або кілька параметрів обробки. Оптимізація процесу різання забезпечує екстремум одного із вторинних параметрів при досягненні допустимих значень основних. В багатьох випадках є ефективним застосування системи адаптивного управління з одночасним регулюванням кількох параметрів. В такій системі канали регулювання впливають один на одного, а управління процесом різання полягає у виборі критерія оптимальності, найважливішого для оптимізації процесу різання.

При адаптивному управлінні з метою підвищення точності обробки регулюють розмір статичного налагодження та стабілізують розмір його динамічного компонента. Поправку на розмір динамічного налагодження вносять шляхом зміни режимів різання, а саме подачі інструмента, жорсткості пружної системи верстата, геометрії різця, що дозволяє підвищити точність і продуктивність обробки. В САУТО верстатів з ЧПК велику увагу приділяють пошуку надійних та універсальних рішень

для вимірювальних пристроїв і значно менше – алгоритмам перетворення результатів вимірювання в коригуючі сигнали. Використання мікропроцесорної техніки робить задачу алгоритмічного забезпечення автоматичного управління точністю на верстатах з ЧПК дуже актуальною, тому що мікропроцесори дають можливість використання найбільш ефективних алгоритмів САУТО без додаткового ускладнення, як пристроїв ЧПУ, так і САУТО. В цьому полягає основна особливість управління точністю на верстатах з ЧПУ (Poduraev V.N., (1977); Timiriazov V.A., (1983)).

При обробці деталей в ГВС малими партіями необхідно мати в складі САУТО універсальний вимірювальний пристрій, що здатен доставляти всю інформацію про розміри і форму заготовок та деталей на будь-якому етапі обробки. Вимірювання деталей в ГВС проводять або без зняття деталі з верстата, поза процесом різання, або зі зняттям деталі з верстата – на спеціальній вимірювальній позиції та в процесі різання. Найчастіше використовують вимірювання без зняття деталі з верстата шляхом виділення в технологічному процесі контрольної операції. У такому випадку верстат з ЧПУ перетворюється у вимірювальну машину. Датчик контакту, який використовується для вимірювання, зберігається в інструментальному магазині, має стандартний конічний хвостовик, за допомогою якого він закріплюється в шпинделі верстата по команді пристосування ЧПУ (ПЧПУ) при виконанні контрольної операції.

Основною метою вимірювання деталі або інструменту є забезпечення точності виготовлення деталі або партії деталей. Ефект від використання САУТО залежить від точності вимірювання відхилення розміру в процесі обробки. Корекція положення інструмента розраховується до початку циклу обробки по результатам вимірювання раніше оброблених деталей. Точність корекції залежить від параметрів технологічного процесу, від досконалості алгоритмів обчислення корекцій та від точності вимірювання індикатором контакту. Цикл управління точністю закінчується автоматичним внесенням перед обробкою наступної деталі розрахованої корекції в управляючу програму. Застосування мікропроцесорів та універсальних первинних датчиків в умовах малосерійного багатонаменклатурного виробництва дозволяє звести задачу побудови САУТО для верстатів з ЧПУ до розробки математичного забезпечення управління точністю. Вибір операцій, які реалізують автоматичне управління точністю обробки, та їх послідовність визначаються кількістю деталей в партії, вимогами до точності форм і розмірів деталей, способом базування та параметрами технологічної системи.

При створенні програм корекції повинна враховуватись достовірною апіорною інформація, пов'язана, наприклад, з характеристиками Жорсткості оброблюваних деталей та вузлів верстата, систематичними похибками в кінематичній системі верстата, зміною розмірного зносу інструменту та таке інше.

Розробка математичного забезпечення управління точністю вимагає побудови математичних моделей залежності точності від технологічних факторів (Dushin-

sky V.V., Puhovsky E.S., Radchenko S.G., (1977); Reshetov D.N., Portman V.T., (1986)). Моделі використовуються для розробки алгоритмів обчислення корекції по результатам вимірювань. Алгоритм функціонування системи управління точністю є формалізоване представлення процесів управління, в тому числі процедури вибору оптимальної послідовності операцій управління. Математичне забезпечення управління точністю дозволяє значно розширити можливості систем автоматичної підготовки управляючих програм та поліпшити якість самих програм.

Досягнення точності обробки деталей в ГВС залежить від різноманітних розмірних зв'язків, які визначають взаємне статичне та динамічне положення деталі і вузлів технологічного обладнання. До технологічних завдань управління точністю обробки в ГВС відносяться контроль за ходом виконання технологічного процесу і управління точністю обробки деталей на основі корекції відхилень, статичне та динамічне налаштування технологічної системи, управління процесами різання в процесі обробки з урахуванням стану верстата, інструмента, заготовки та характеру процесу різання, автоматичне визначення стану ріжучого інструменту і необхідності його заміни; діагностика ріжучого інструменту та стану металорізального і транспортного обладнання.

Точність обробки в ГВС у великій мірі визначається складною системою просторових зв'язків, які формуються на різних етапах технологічного процесу при проходженні деталі по позиціям обробного обладнання. Формування розмірних зв'язків починається на етапі установки та базування на супутник транспортної системи. Розмірне налагодження верстата полягає в досягненні необхідної точності відносного положення деталі, інструмента, супутника і пристосування в координатній системі верстата. Управління позиційними зв'язками верстатів дозволяє суттєво підвищити точність обробки шляхом компенсації просторових відхилень, зумовлених геометричною точністю обладнання та інших систематичних факторів, що виникають в процесі обробки.

На етапі статичного налагодження при створенні управляючої програми, коли відсутні теплові і динамічні деформації та навантаження, відхилення виконавчих органів верстата визначається в основному точністю їх виготовлення та позиціонування. Досягнення необхідного розміру статичного налагодження забезпечується шляхом одночасного переміщення кількох вузлів верстата по різним управляючим координатам. Проте, в будь-якій точці робочої зони верстата мають місце просторові відхилення, зумовлені похибкою геометричної точності обладнання. Ці відхилення формуються на етапі статичного налагодження в процесі позиціонування робочих органів верстата у відповідності з заданою управляючою програмою. Компенсація похибок статичного налагодження верстата здійснюється шляхом введення в управляючу програму корекції по відповідним координатам верстата. Корекції можуть також бути введені в управляючу програму для компенсації любых похибок, що виникають в процесі обробки. При цьому корекція вноситься в програму безпосередньо перед обробкою наступної деталі. Такий спосіб корек-

ції дозволяє оперативно по ходу обробки вносити зміни в текст любого кадру програми управління верстатом. При цьому корекція повинна виконуватись таким чином, щоб не порушувати неперервність процесу обробки. При розробці програми корекції враховуються функціональні коефіцієнти, які визначають вплив поточних координат на величину корекції, характеристики відхилень, породжених тепловими деформаціями та розмірним зносом інструменту, а також похибки установки деталі, супутника та інструмента. Інформацію отримують від датчиків, які визначають поточні розташування інструмента, супутника та деталі.

Управління позиційними зв'язками дозволяє підвищити точність статичного налагодження верстатів з ЧПУ, а використання мікропроцесорів дає можливість реалізувати цей спосіб управління у вигляді програмної процедури корекції.

В процесі обробки деталі на верстаті виникають похибки динамічного налагодження, які проявляються в зміщенні координатної системи верстата, що пов'язана з поверхнями ріжучого інструменту. Сили різання та сили інерції разом з силами закріплення деталі та інструменту створюють систему динамічних технологічних розмірних зв'язків. В результаті взаємодії цих сил відбувається зміна положення допоміжних баз деталей. Ці зміни визначають просторові відхилення вузлів пружної системи верстата, що в значній мірі впливає на точність обробки. Управління технологічним процесом на етапі динамічного налагодження передбачає рішення комплексу задач, пов'язаних з управлінням точністю обробки, регулюванням режимів різання, визначенням стану ріжучого інструменту та моменту його заміни. Найбільш ефективно рішення вказаних задач здійснюється шляхом адаптивного управління. Як правило, управління режимами обробки забезпечує стабілізацію зусиль в силових вузлах верстата та зменшує відхилення розміру динамічного налагодження в 1,5 – 2 рази (Timiriazev V.A., (1983)).

Обробка деталі в ГВС, обладнання якої пов'язано між собою функціонально, відрізняється додатковими складнощами в порівнянні з окремо працюючим верстатом. Для досягнення точності обробки на взаємопов'язаному обладнанні ГВС необхідні додаткові заходи, які враховують особливості гнучкого виробництва. В ГВС базування деталей виконується на спеціальних пристроях – супут-

никах, разом з якими деталь переміщується між технологічним обладнанням. Значна кількість супутників, працюючих одночасно в ГВС породжує проблеми їх точного повторного базування на столах різних верстатів. Виникаючи при цьому похибки залежать не тільки від точності позиціонування супутників, але і точності їх виготовлення. Додатковими джерелами, що розширюють поле розсіювання похибок установки супутників, є постійна зміна місця базування супутника, забруднення та знос направляючих елементів, використання нераціональних схем базування. Супутники повинні зберігати зносостійкість базуючих поверхонь на протязі довгого часу. Для усунення деяких з вказаних похибок сучасні конструкції супутників виконуються з гладкими прямолінійними поверхнями, за рахунок чого спеціальні очищувачі, розташовані на супутнику, можуть якісно очистити базові поверхні стола верстата. З цією метою використовують обдув місць базування стисненим повітрям або омивання фільтрованою змащувально-охолоджуючою рідиною. Щоб уникнути вказаних недоліків стараються обробити заготовку з одної установки при базуванні її по необробленим поверхням. При цьому заготовка закріплюється на супутнику і разом з ним переходить від верстата до верстата.

Технологічні процеси в ГВС повинні будуватися на типових технологічних схемах обробки елементів форми, які обробляються по стандартним циклам. При виборі послідовності стандартних циклів необхідно приймати до уваги досягнення необхідної точності та скорочення затрат допоміжного часу на заміну інструменту.

**Висновки.** На основі досліджень розроблена автоматизована система управління точністю обробки на верстатах з ЧПК у складі гнучких виробничих систем. Визначені параметри системи управління та канали зворотнього зв'язку для забезпечення заданої точності обробки на обладнанні ГВС. Беручи до уваги багаточисельні похибки процесу різання, похибки повторного базування супутників та ріжучого інструменту, точність його налагодження, можна стверджувати, що на взаємопов'язаному обладнанні ГВС точність обробки буде значно менше, ніж на окремо працюючих верстатах. Застосування різних заходів, які зменшують сумарні похибки обробки, а також використання адаптивних систем управління точністю дозволяє отримувати деталі високої точності в автоматичному циклі обробки

#### **Бібліографічні посилання:**

1. Adaptivnoe upravlenie stankami (1973), ( pod redaktsiyei B.S. Balakshina). [Adaptive management of machines]. М., Mashinostroenie, – 688 s., ( In Russian).
2. Dushinskiy V.V., Puhovskiy E.S., Radchenko S.G.,(1977), Optimizatsiya tehnologicheskikh protsessov v mashinostroenii. [ Optimization of technological processes in mechanical engineering]. К., Tekhnika, – 176 s. (In Russian).
3. Komissarov V.I., Leontiev V.P., (1985), Tochnost, proizvoditelnost i nadegnost v sisteme proektirovaniya tehnologicheskikh protsessov. [Accuracy, performance and reliability in the process design system ]. М., Mashinostroenie, 225 s. (In Russian).
4. Nevelson M.S., (1982), Avtomaticheskoe upravlenie tochnosti obrabotki na metalloregutzhich stankah. [Automatic control of machining accuracy on metal-cutting machines]. – L., Mashinostroenie, – 176 s. (In Russian).
5. Poduraev V.N., (1977), Avtomaticheskii reguliruemie i kombinirovannie protsessi rezaniya. [Automatic control and combined cutting processes ]. – М., Mashinostroenie, – 304 s. (In Russian).
6. Puhovskiy E.S., (2021), Proektuvannia verstatnikh system gnuchkogo virobnitstva. [ Design of machine systems of flexible production]. К., NTUU (KPI), – 222 s. (In Ukrainian).

7. Reshetov D.N., Portman V.T., (1986), *Tochnost metallovezguztih stankov.* [Precision of metal-cutting machines]. M., – Mashinostroenie, – 336 s. (In Russian).
8. Solomentzev U.M., Basin A.M., (1974), *Optimizatsiya protzessa obrabotki s pomotzu adaptivnogo upravleniya iznosom instrumenta.* [Optimization of the machining process with adaptive tool wear control]. – *Stanki i instrument* No. 8. s. 21–22. (In Russian).
9. Timiriazhev V.A., (1983), *Upravlenie tochnosti gibkikh tekhnologicheskikh system.* [Precision management of flexible manufacturing systems]. – M., NIIMASH, 63 s. (In Russian).
10. *Upravlenie robototekhnicheskimi sistemami i avtomatizirovannimi proizvodstvami.*, (1986), [Control of robotic systems and automated production]. – Makarov I.M., Rakhmankulov V.Z., Nazaretov V.M. i dr. M., *Vissaya shkola.*, 160 s. (In Russian).
11. Antoni Swic., (2014), *Accuracy Control in Machining of Low Rigidity Shafts.* *Applied Mechanics and Materials.* (Vol 613) pp. 357–367.
12. G 187 Accuracy Control (Group 00), HAAS F1 Team, (2018), *Official Machine Tool.*
13. *In-Process and On-Machine Measurement of Machining Accuracy for Process and Product Quality Management.*, (2014), A Rewier. *International Journal of Automation Technology.*
14. Qingchun X., Qinghua Z., (2020), *Development Trend of NC Machining Accuracy Control Technology for Aeronautical Structural Parts.* *World Journal of Engineering and Technology.* – vol.8 , No. 3, August.
15. Sweda J. *Increasing Machining Accuracy based on CNC.*, (2022), – MDPI.

**Pukhovskiy Ye. S.**, *Doctor of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ryiv, Ukraine*

**Frolov V. K.**, *Candidate of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ryiv, Ukraine*

**Prykhodko V. P.**, *Candidate of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ryiv, Ukraine*

**Betsko Yu. M.**, *Senior Lecturer, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ryiv, Ukraine*

#### **Management of processing accuracy in flexible production systems**

*On modern CNC machines, which form the basis of technological equipment of flexible manufacturing systems (FMS), the problems of automation of almost all operations are solved, except for the operations of the initial adjustment of the tool and adjustment of its level. The need to organize separate posts as part of the FMS to configure the tool, base and fix parts largely hinders the transition to uninhabited production. In these conditions, the problems of creating an automatic processing accuracy control system (APACS) in the FMS are incredibly important (Balakshin B.S., (1973); Nevelson M.S., (1982); Solomentsev Y.M., Basin A.M., (1974); International Journal of Automation Technology, (13)).*

*The industry has gained considerable experience in creating APACS, when processing on universal machines and, especially, on machines for finishing operations. The dissemination of this experience into small-scale production, where CNC machines are used, is hampered by the difficulty of creating effective measuring devices for fixing primary information and conversion devices for the received signals. To some extent, these difficulties are overcome through the use of contact sensors, laser technology and microprocessors capable of receiving and converting the primary signals of the control effect on the processing process (Komissarov V.I., Leontiev V.P., (1985); Sweda J., (2022)).*

*It is known that the process of machining usually cannot be described by deterministic methods, because the characteristics of the input signals of the technological system not only change over time, but also remain uncontrolled (Dushinsky V.V, Puhovsky E.S., Radchenko S.G., (1977); Puhovsky E.S., (2021); Antony Swic, (2014)). Therefore, the synthesis of APACS for such unstable processes should be carried out taking into account static instability, which generates uncertainty. In these conditions, the problem of creating such adaptive processing accuracy management systems that can change the management structure depending on the results of the current assessment of management quality is extremely relevant. The article sets the task of developing the structure of APACS, determining control parameters, feedback channels and ways to ensure a given accuracy of processing.*

**Purpose of work:** *Development of an automated processing accuracy management system in the conditions of interconnected software-controlled equipment of flexible production systems.*

**Key words:** *accuracy, control, criterion, flexible manufacturing system, machining, adaptive system.*

## ЕЛЕКТРОШЛАКОВА НАПЛАВКА ПОВЕРХОНЬ ВИРОБІВ КОМПОЗИЦІЙНИМ ЗНОСОСТІЙКИМ СПЛАВОМ

**Рибалко Іван Миколайович**

доктор технічних наук, доцент  
Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна  
ORCID: 0000-0002-3663-019X  
irybalko.ua@gmail.com

**Сайчук Олександр Васильович**

доктор технічних наук, професор  
Харківський державний професійно-педагогічний фаховий коледж імені В.І. Вернадського, м. Харків, Україна  
ORCID: 0000-0001-5118-838X  
sajchuksacha@gmail.com

**Захаров Андрій Вадимович**

аспірант  
Державний біотехнологічний університет, М. Харків, Україна  
ORCID: 0000-0001-9894-7355  
zakharovandrey1997@gmail.com

**Потоскаєв Олексій Миколайович**

аспірант  
Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна  
Alexei.Alexei@ukr.net

*Розроблено спосіб отримання зносостійких композиційних покриттів електрошлаковим наплавленням з використанням струмопідвідного кристалізатора і порошкових дротів, що містять тугоплавкі частинки дібориду титану TiB<sub>2</sub>. Вивчено термічні умови формування тонкого шару зносостійкого наплавленого металу та виявлено кінетику переходу в нього тугоплавких мікрочастинок із наповнювача порошкового дроту.*

*Ванна рідкого шлаку, маючи меншу, ніж у розплавленого металу, густину, постійно перебуває над поверхнею металевого розплаву, захищаючи його від впливу повітря. Краплі присадного металу, проходячи через шлак, піддаються металургійній обробці і очищаються від шкідливих домішок. Напрямок конвекції шлаку залежить від діаметра електрода: при наплавленні тонким електродом переважає вимушена електромагнітна конвекція, шлак опускається біля електрода і піднімається по краях шлакової ванни, при використанні товстого електрода переважає вільна теплова конвекція, шлак опускається по краях шлакової ванни і піднімається поблизу електрода.*

*Електроди можуть бути нерухомими, і їх розплавлення буде здійснюватись внаслідок постійного підняття шлакової і металеві ванн. Якщо ж електроди рухомі, то їх по мірі розплавлення безперервно подають у шлакову ванну. Можлива комбінація цих методів.*

*Способи ЕШН можна класифікувати за різними ознаками, з яких технологічні є основними. У процесі ЕШН розрізняють два способи формування наплавленого металу. Один з них передбачає вільне формування розплаву зварювальної ванни на плоскій горизонтальній поверхні, а другий полягає у використанні спеціальних формувальних пристроїв – кристалізаторів, виготовлених переважно з міді. У них розплавлений метал кристалізується в замкнутій порожнині. Для запобігання перегріванню кристалізатори охолоджують проточною водою, а їх поверхні, що контактують з розплавами шлаку і металу, покривають графітом та іншими матеріалами, оберігаючи їх від електрохімічної ерозії.*

*При ЕШН композитних покриттів в шлакову ванну сиплять зверху гранульований твердий сплав, температура плавлення якого вища за температуру плавлення металу-зв'язки, необхідність застосування якого обумовлена неприпустимістю вторинного розплавлення деяких твердих сплавів, через що наплавлення монопокрить з таких матеріалів неможлива.*

*Твердість і зносостійкість забезпечується частинками твердого сплаву, а метал-зв'язка утримує їх на поверхні деталі.*

**Ключові слова:** композиційний сплав, електрошлакове наплавлення, порошковий дріт, діборид титану.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.9>

**Вступ.** Композиційні металокерамічні сплави, в структуру яких впроваджено макро-, мікро- або наночастинки тугоплавких хімічних сполук, мають високі показники твердості та зносостійкості. Наплавлення таких сплавів на робочі поверхні деталей машин

та інструменту, що працюють в екстремальних умовах абразивного зношування, виконують з використанням покритих та трубчастих електродів, порошкових сумішей, а також керамічних флюсів, що містять у своєму складі частинки карбідів та боридів металів. Однак

застосовувані для цих матеріалів дугові та газополум'яні способи наплавлення мають низьку технологічність і продуктивність. Більш ефективні механізовані способи електрошлакового наплавлення (ЕШН) порошковими дроти (ПП), що містять в наповнювачі тугоплавкі тверді компоненти.

Цілеспрямовано керувати якістю одержуваного напавленого металу можна з використанням технології ЕШН в струмопідвідному кристалізаторі (СПК), що забезпечує регулювання тепловиділення в шлаку поблизу металевої ванни, так і в області плавлення наплавочних матеріалів. Це дає можливість при мінімальному та рівномірному проплавленні основного металу створювати умови для гарантованого переходу тугоплавких частинок напавлений метал.

Мета роботи полягає у дослідженні процесу формування тонкого шару зносостійкого металу при ЕШН у горизонтальному положенні з використанням СПК та ПП, що містять частинки дибориду титану  $TiB_2$ .

**Матеріали і методи досліджень.** Зразки сплавів напавляли з використанням ПП, порожнистих графітових електродів та водоохолоджуваного двосекційного СПК (рис. 1). Графітові електроди, струмопідвідна секція кристалізатора та виріб включені в мережу електроживлення постійним струмом за двоконтурною схемою (Saychuk O.V., et al., 2022). Дріт діаметром 3 мм виготовляли зі сталеві стрічки товщиною 0,3 мм. Як наповнювач ПП використовували порошки нікелю, ферохрому, графіту, а також дибориду титану в кількості 25 мас. % із середнім розміром частинок 35 мкм.

Вивчення структури металу проводили із використанням оптичного мікроскопа Axiovert 40 MAT. Зміст і розподіл легуючих елементів структурних складових напавленого металу визначали на електронному растровому мікроскопі Versa 3D.

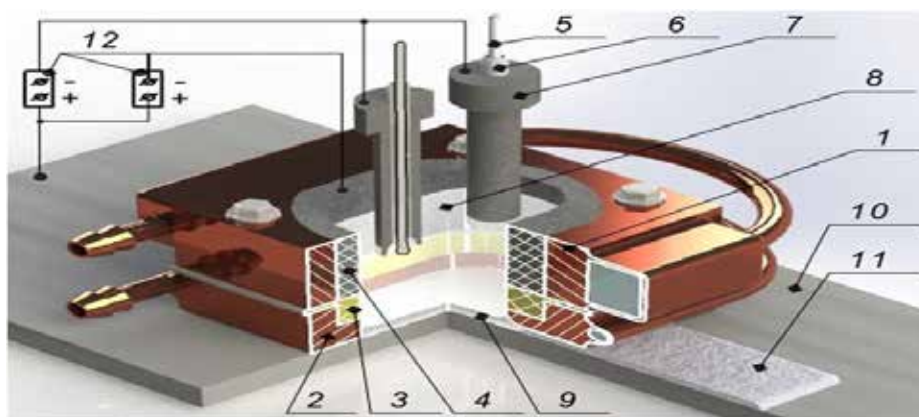
Випробування напавленого металу на абразивне зношування при терті про жорстко закріплений абразив проводили на лабораторній машині. Статичне навантаження на зразок складало 0,937 МПа. Поверхня, що стирає, являла собою шліфувальний папір із зернистістю абразиву Р100. Коефіцієнт відносної зносостійкості

металу визначали як відношення втрати маси експериментального зразка до втрати маси еталона (сталь 45 відпаленому стані).

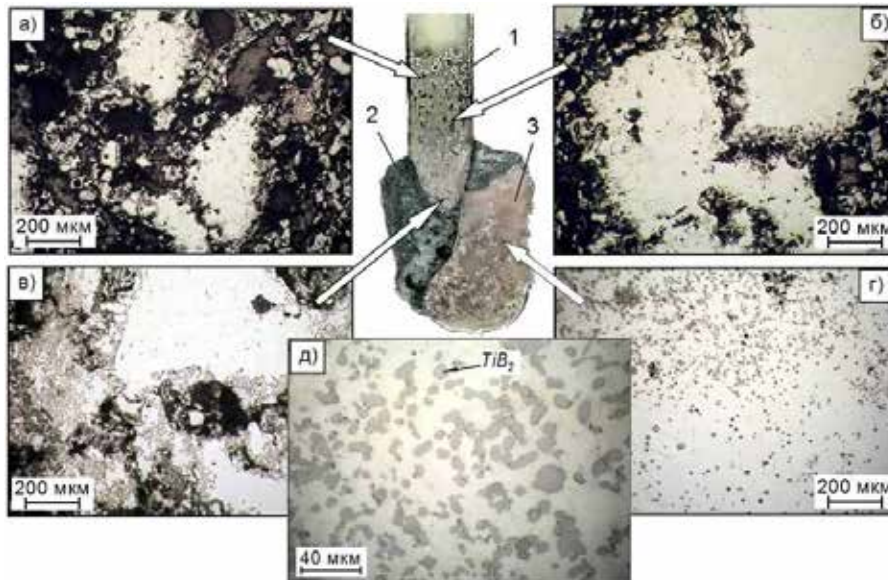
**Результати досліджень.** Експериментально встановлено, що при використанні двоконтурної схеми електроживлення кристалізатора і електродів постійним струмом теплова потужність, що виділяється в шлаку при протіканні струму через контур «струмопідвідна секція – виріб», дозволяє забезпечити стійку підтримку електрошлакового процесу, а також дає можливість підвищити однорідність температурного поля осьового перерізу шлакової ванни, що обумовлює рівномірну глибину проплавлення основного металу та сталість хімічного складу по ширині напавленого шару. Це досягається при використанні в конструкції СПК кільцеподібного керамічного елемента, розташованого в проточці формує секції, який впливає на розподіл струму, що протікає через шлак, з поверхні струмопідвідної секції кристалізатора.

Моделювання топології електричних полів у шлаку, виконане за методикою (Skoblo T.S., et al., 2021.), показало, що така конструкція СПК дає можливість збільшити тепловиділення в обсязі шлаку, що розташовується по периметру металевої ванни, за рахунок 2-3-кратного підвищення щільності струму в цій галузі порівняно з іншим обсягом шлакової ванни. Це сприяє підвищенню температури зварювальної ванни та зменшенню поверхневого натягу на міжфазних межах у найбільш важливій

– периферійній зоні зварювальної ванни, де підвищено швидкість тепловідведення в кристалізатор (Stepanov V.V. et al 1997; Lutyu I.V et al., 2005; Podgaetskiy V.V. et al., 1997; Yu.V. Latash et al., 1970; Nikitin B.M. et al., 1989; Zhmoidin G.I. 1989; Yu.M. Kuskov et al., 2018; Yu.M. Kuskov et al., 2020; Paton B. E et al., 1976) При цьому теплова потужність, що виділяється в приелектродних областях шлакової ванни, витрачається переважно на плавлення електронейтральних дротів. Утворюються при сумісному електромагнітному впливі від струмопідвідної секції кристалізатора і електродів циркуляційні потоки в шлаковій ванні сприяють її перемішування та зниження температурних градієнтів



**Рис. 1 – Схема процесу ЕШН: 1, 2 – струмопідвідна і формуюча секції кристалізатора відповідно; 3 – керамічний елемент; 4 – графітове футерування; 5 – ПП; 6 – керамічна трубка; 7 – порожнистий графітовий електрод; 8 – шлакова ванна; 9 – металева ванна; 10 – виріб; 11 – напавлений метал; 12 – джерела струму**



**Рис. 2.** Мікроструктури характерних ділянок оплавленого торця ПП (а-г), що містить 25 мас. %  $TiB_2$ , та наплавленого металу (д): 1 – ПП; 2 – шлак; 3 – металева крапля

(Paton B. E et al., 1980; Paton B. E et al., 1982; Chen Ch. S et al., 1989; Latash Yu. V et al., 1987; Mironov Yu. M et al., 2002; Paton B. E., et al., 1986; Dudko D. A et al., 1986; Ksendzyk G.V et al., 1975) Завдяки цьому забезпечується якісне формування тонких (від 2,5 мм) та широких (від 50 мм) шарів із металевих та металокерамічних сплавів при відносно невеликому (до 15–20%) проплавленні основного металу.

Встановлено, що для формування однорідного теплового поля в шлаковій ванні необхідно використовувати два порожнисті графітові електроди, які слід розташовувати на міжцентровій відстані, що дорівнює 1,7...2,5 від величини зовнішнього діаметра електрода (Paton B.E, 1974; Latash Yu.V et al., 1970; B.E. Paton, 1980; Sushchuk-Slyusarenko I.I., et al., 1989; B.E. Paton, 1974; Gusev A.I et al., 2016). Регулювання величини струму, що протікає через електроди, дозволяє в широких межах змінювати температуру шлаку в цих зонах, що дає можливість створити оптимальні теплові умови для плавлення дротів і зменшити інтенсивність розчинення тугоплавких мікрочастинок  $TiB_2$ , що містяться в наповнювачі (Gusev A.I et al., 2016; Gusev A.I et al., 2017; Gusev A.I & Kibko N.V.2017; Azzoni M, 2009).

Дослідженнями кінетики переходу частинок  $TiB_2$  з наповнювача ПП в метал крапель, що утворюються при її розплавленні, встановлено, що на початковому етапі плавлення ПП відбувається спікання наповнювача з розплавленням його обсягів, що не містять  $TiB_2$  порошок (рис. 2, а). У міру наближення до високотемпературної області в шлаку об'єм рідкої фази в наповнювачі

збільшується, вона просочує порошок  $TiB_2$ , частинки якого розташовуються переважно на межі розплавів (рис. 2, б, в). Накопичення розплаву призводить до формування на торці дроту краплі, в якій частинки  $TiB_2$  під впливом інтенсивних течій гідродинамічних досить рівномірно розподіляються за її обсягом (рис. 2, г).

Також виявлено, що за активної взаємодії з металевим розплавом електрохімічне розчинення частинок  $TiB_2$  починається вже на стадії формування краплі на торці дроту. При переході крапель у металеву ванну внаслідок зниження температури та інтенсивності конвекції у ній швидкість розчинення частинок  $TiB_2$  уповільнюється. Частици, що не розчинилися, служать центрами кристалізації, навколо яких утворюються великі первинні кристаліти інших боридів і карбобридів. Після кристалізації розплаву в металі формується структура металокераміки, армованої частинками  $TiB_2$  (рис. 2, д), з твердістю 52–54 HRC та коефіцієнтом відносної зносостійкості 9,2. Висока зносостійкість наплавленого покриття обумовлена великим (до 92 об. %) об'ємним вмістом у ньому твердих зміцнювальних фаз, що сприяють створенню гетерогенної структури штучного композиту.

**Висновки.** Використання при ЕШН двоконтурної схеми електроживлення СПК і порожнистих графітових електродів постійним струмом, а також електронейтральної ПП з порошком  $TiB_2$  у складі наповнювача забезпечує бездефектне формування на горизонтальній поверхні тонкого шару наплавленого металокерамічного сплаву, що володіє підвищеною стійкістю до абразивного зношування.

#### **Бібліографічні посилання:**

1. Saychuk, O.V., Rybalko, I.M., Zakharov, A.V. (2022). Elektroshlakove naplavlennia na postiinomu strumi v strumovomupidvidnomu krystalizatori elektrodom velykoho pererizu [Electroslag deposition on direct current in a current-driven crystallizer with a large cross-section electrode] International Scientific and Practical Conference "Modern Directions and Movements in Science": Conference proceedings, October 6-8. Luxembourg, Luxembourg. P. 229–237. (in Ukrainian).

2. Skoblo, T.S., Rybalko, I.M., Zakharov, A.V. (2021). Analiz elektroshlakovoho naplavlennia metalu z maloju tovshchynoiu vidnovliuvaino-zmitsniuiuchoho robochoho sharu detali. [Analysis of electros slag deposition of metal with a small thickness of the restoring and strengthening working layer of the part] Information-analytical international technical journal "Industry in Focus". Kharkiv, No. 10. P. 54–56. (in Ukrainian).
3. Stepanov, V.V. (1997). Plotnost rasplavlennykh flyusov dlya elektroshlakovogo pereplava i nagreva [Density of molten fluxes for electros slag remelting and heating]. Kyiv : Automatic welding. No. 2. (in Russian).
4. Lutyi, I.V. Elektroshlakovaya plavka i rafinirovaniye metallov [Electros slag smelting and refining of metals]. Kyiv : Nauk. Dumka. No. 7. V. 5. No. 2. S. 22– 24. (in Russian).
5. Podgaetskiy, V.V. (1997). Svarochnyye flyusy [Welding fluxes]. Kyiv : Technika. No. 4. No. 3. P. 52–60. (in Russian).
6. Latash, Yu.V. Ochistka metalla ot nemetallicheskiikh vklucheniy pri elektroshlakovom pereplave [Purification of metal from non-metallic inclusions during electros slag remelting]. Kyiv: Automatic welding. No. 9. No. 23. P. 34–56. (in Russian).
7. Nikitin, B.M. (1997). O fazovom sostave forsoderzhashchikh shlakov elektroshlakovogo pereplava [On the phase composition of fluorine-containing slags of electros slag remelting]. AS USSR. Metals. No. 6. No. 5. P. 54–56. (in Russian).
8. Zhmoidin, G.I. (1989). Plavkost forsoderzhashchikh shlakov [Fusibility of fluorine-containing slags]. AS USSR. Metals. No. 6. P. 123–134. (in Russian).
9. Kuskov, Yu. M., Skorokhodov, Yu. M., Ryabtsev, I.A., Sarychev, I.S. (2018). Elektroshlakove naplavlennya [Electros slag welding]. Kyiv : Science and technology. No. 14. P. 67–68. (in Ukrainian).
10. Kuskov, Yu.M., Ryabtsev, I.A., Kuzmenko, O.G., Lentugov, I.P. (2020). Elektroshlakovi tekhnolohiyi naplavlennya ta pererobky metalu ta metalovmisnykh vidkhodiv [Electros slag technologies of welding and processing of metal and metal wastes]. Kyiv : Interservice. No.11. P. 22–23. (in Ukrainian).
11. Paton, B. E., Medovar, B. I. (ed.). (1976). Elektroshlakovyie pechi [Electros slag furnaces]. Kyiv : Naukova Dumka. No. 4. (in Russian).
12. Paton, B. E. (ed.). (1980). Elektroshlakovaya svarka i naplavka [Electros slag welding and surfacing]. Moscow: Mechanical engineering. No. 2. (in Russian).
13. Paton, B. E., Medovar, B. I. (1982). Elektroshlakovaya tekhnologiya za rubezhom [Electros slag technology abroad]. Kyiv : Naukova Dumka. No. 1. (in Russian).
14. Chen, Ch. S., Gao, R. F. (1989). Issledovaniye elektroshlakovogo pereplava v sostavnoy kristallizatore s futerovannoy verkhney chast'yu [Study of electros slag remelting in a composite mold with a lined top]. Problems spec. Electrometallurgy. No. 7. (in Russian).
15. Latash, Yu. V., Matyakh, V. N. (1987). Sovremennyye metody polucheniya slitkov osobo vysokogo kachestva [Modern methods for producing high quality ingots]. Kyiv : Naukova Dumka. No. 6. (in Russian).
16. Mironov, Yu. M. (2002). Vliyaniye roda toka na protsessy v elektroshlakovykh ustanovkakh [Influence of current type on processes in electros slag installations]. Kyiv : Electrometallurgy. No. 8. (in Russian).
17. Paton, B. E., Medovar, B. I. (1986). Metallurgiya elektroshlakovogo protsessa [Metallurgy of the electros slag process]. Kyiv : Naukova Dumka. No. 8. (in Russian).
18. Dudko, D. A., Rublevsky, I. N. (1986). Vliyaniye roda i polyarnosti toka na metallurgicheskiye protsessy pri elektroshlakovoy svarke [Effect of current type and polarity on metallurgical processes in electros slag welding]. Kyiv : Naukova Dumka. No. 9. (in Russian).
19. Ksendzyk, G.V. (1975). Tokovedushchiy kristallizator, obespechivayushchiy vrashcheniye shlakovoy vanny [Current-carrying mold providing rotation of the slag pool]. Kyiv : Specialist Electrometallurgy. No.2. (in Russian).
20. Paton, B.E. (1974). Tekhnologii elektrosvarki metallov i splavov plavleniyem [Technologies for electric welding of metals and alloys by fusion]. Moscow: Mashinostroenie. №.3. (in Russian).
21. Latash, Yu. V., Medovar, B.I. (1970). Elektroshlakovyy pereplav [Electros slag remelting]. Kyiv : Naukova Dumka. №. 5. (in Russian).
22. Paton, B. E. (1980). Elektroshlakovaya svarka i naplavka [Electros slag welding and surfacing]. Kyiv : Naukova Dumka. №.11. (in Russian).
23. Sushchuk-Slyusarenko, I.I., Lychko, I.I., Kozulin, M.G. (1989). Elektroshlakovaya svarka i naplavka v remontnykh rabotakh [Electros slag welding and surfacing in repair work]. Kyiv : Naukova Dumka. № 12. (in Russian).
24. Paton, B.E. (1974). Tekhnologiya elektrosvarki metallov i splavov plavleniyem [Technology of electric welding of metals and alloys by melting]. Kyiv : Naukova Dumka. № 14. (in Russian).
25. Gusev, A.I., Kibko, N.V., Kozyrev, N.A., Popova, M.V., Osetkovsky, I.V. (2016). Issledovaniye svoystv naplavlennogo metalla poroshkovymi provolokami 40GMFR i 40KH3G2MF [Investigation of the properties of deposited metal with flux-cored wires 40GMFR and 40Kh3Zh2MF]. Moskov: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. № 1. (in Russian).
26. Gusev, A.I., Kibko, N.V., Popova, M.V., Kozyrev, N.A., Osetkovsky, I.V. (2016). Struktura i svoystva naplavlennykh sloyev, poluchennykh s ispol'zovaniyem poroshkovykh provolok 40GMFR i 40KH3G2MF [Structure and properties of deposited layers obtained using flux-cored wires 40GMFR and 40Kh3Zh2MF]. Moskov : Bulletin of the Mining and Metallurgical Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Department of Metallurgy: Sat. scientific tr. Issue. № 36. (in Russian).
27. Gusev, A.I., Kozyrev, N.A., Kibko, N.V., Popova, M.V., Kryukov, R.E. (2017). Issledovaniye struktury i svoystv metalla, naplavlennogo poroshkovoy provolokoy sistemy Fe - C - Si - Mn - Cr - Mo - Ni - V - Co [Investigation of the structure and properties of metal deposited with a flux-cored wire of the Fe - C - Si - Mn - Kr - Mo - Ni - B - Co system]. Moskov : Actual problems in mechanical engineering. V. 10. No. 2. S. 31–32. (in Russian).
28. Gusev, A.I., Kibko, N.V., Popova, M.V., Kozyrev, N.A., Osetkovsky, I.V. (2017). Naplavka poroshkovymi provolokami C - Si - Mn - Mo - V - B i C - Si - Mn - Cr - Mo - V detaley gorno-shakhtnogo oborudovaniya [Surfacing with flux-cored wires



C - Si - Mn - To - B - B and C - Si - Mn - Kr - To - V of mining equipment parts]. Moskov: Izv. universities. Ferrous metallurgy V. 60. No. 4. S. 318–323. (in Russian).

29. Azzoni, M. (2009). Napravleniya i razrabotki v oblasti tipov tverdykh faz dlya primeneniya v abrazionnykh otlozheniyakh protiv istiraniya [Trends and developments in the field of solids types for application in abrasion deposits against attrition]. Moskov: WeldInter national. V. 23. P. 706–716. (in Russian).

30. Klimpel, A., Dobrzanski, L. A., Janicki, D., Lisiecki, A. (2005). Stoykost k istiraniyu metalloporoshkovykh provolok GMA s naplavkoy [Abrasion resistance of GTA metal-cored wires with hardfacing]. Moskov: Materials Processing Technology. V. 164-165. P. 1056–1061. (in Russian).

**Rybalko I. M.**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

**Saychuk O. V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, V.I. Vernadskiy Kharkiv State Professional and Pedagogical Applied College, Kharkiv, Ukraine

**Zakharov A. V.**, Postgraduate, State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

**Potoskaev O. M.**, Postgraduate, Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

#### **Electroslag surface of product surfaces with composite wear-resistant alloy**

A method of obtaining wear-resistant composite coatings by electroslag surfacing using a current-driven crystallizer and powder wires containing refractory particles of titanium diboride  $TiB_2$  has been developed. The thermal conditions of the formation of a thin layer of wear-resistant deposited metal were studied and the kinetics of the transition into it were revealed refractory microparticles from powder-coated wire filler.

The bath of liquid slag, having a lower density than that of the molten metal, is constantly above the surface of the metal melt, protecting it from the influence of air. Drops of filler metal, passing through the slag, undergo metallurgical processing and are cleaned of harmful impurities. The direction of slag convection depends on the diameter of the electrode: when welding with a thin electrode, forced electromagnetic convection prevails, the slag sinks near the electrode and rises along the edges of the slag bath, when using a thick electrode, free thermal convection prevails, the slag sinks along the edges of the slag bath and rises near the electrode.

The electrodes can be stationary, and their melting will be carried out as a result of the constant rise of the slag and metal baths. If the electrodes are movable, they are continuously fed into the slag bath as they melt. A combination of these methods is possible.

The methods of ESN can be classified according to various features, of which technological ones are the main ones. In the process of ESN, two methods of forming the deposited metal are distinguished. One of them involves the free formation of the weld pool melt on a flat horizontal surface, and the second consists in the use of special forming devices – crystallizers made mainly of copper. In them, the molten metal crystallizes in a closed cavity. To prevent overheating, crystallizers are cooled with running water, and their surfaces in contact with slag and metal melts are covered with graphite and other materials, protecting them from electrochemical erosion.

In the case of ESN of composite coatings, a granulated hard alloy is poured from above into the slag bath, the melting temperature of which is higher than the melting temperature of the bond metal, the need for which is due to the inadmissibility of secondary melting of some hard alloys, due to which the surfacing of monocoats from such materials is impossible.

Hardness and wear resistance are provided by hard alloy particles, and the metal bond holds them on the surface of the part.

**Key words:** composite alloy, electroslag surfacing, powder wire, titanium diboride.

## ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ, ЗАДІЯНИХ В СИСТЕМАХ ЗРОШЕННЯ КОМБІНОВАНИМИ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ МЕТОДАМИ

**Тарельник В'ячеслав Борисович**

доктор технічних наук, професор  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0000-0003-2005-5861  
tarelnik@i.ua

**Пирогов Віктор Олександрович**

аспірант  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0000-0002-6335-1276  
viktor80ua@gmail.com

*В статті проведений аналіз сучасному стану меліоративного землеробства.*

*З метою підвищення надійності і довговічності насосних агрегатів (НА), задіяних в системах зрошення, удосконалена технологія виготовлення і ремонту поверхневих шарів шийок валів роторів відцентрових насосів (ВН) під підшипники ковзання (ПК), та посадкові поверхні деталей що збираються з натягом, шляхом використання екологічно та техногенно безпечних технологій електроіскрового легування (ЕІЛ), поверхневого пластичного деформування (ППД) і нанесення метало-пластичних матеріалів (МПМ). При цьому: а) розроблений і апробований новий спосіб цементації їх поверхонь методом ЕІЛ при якому покращуються параметри якості поверхневого шару; б) розроблений і апробований новий спосіб формування методом ЕІЛ сульфомолібденових покриттів, в поверхневому шарі яких знаходиться до 5% дисульфиду молібдену. Розроблений новий спосіб формування методом ЕІЛ на посадкових шийках валів роторів ВН зносостійких покриттів складу Al-C-B, при якому з підвищенням енергії розряду ( $W_p$ ) збільшується мікротвердість як «білого» шару, так і дифузійної зони: при  $W_p = 0,13$  Дж –  $H_m = 6487$  МПа, а при  $W_p = 4,9$  Дж –  $12350$  МПа. Для удосконалення технології відновлення поверхневого шару валу запропонований новий спосіб, що включає операцію цементації методом ЕІЛ, яка супроводжується подачею в зону легування азоту, що є процесом нітроцементації при якому підвищується мікротвердість з  $10500$  до  $10600$  МПа і глибина зони підвищеної твердості з  $120$  до  $150$  мкм, а такожі зменшується шорсткість поверхні  $R_a$ , з  $0,7$  до  $0,6$  мкм.*

*Запропоновано фізично обґрунтовану математичну модель процесу зносу (рівняння зносу), що дозволяє по роботі тертя визначати лінійний та ваговий знос поверхні бабітового покриття, сформованого будь яким методом, а також вирішувати зворотну задачу - дозволяє знайти величину роботи тертя, необхідну для здійснення зносу певної кількості речовини або необхідного лінійного зносу. Для різних матеріалів пар тертя (бабітовий вкладиш – шийка ПК) розроблено методу визначення констант рівняння зносу: найбільшого вагового та лінійного зносу, а також енергію активації процесу зношування, які можуть бути критеріями вибору найбільш раціональної технології підвищення довговічності ПК. Для покращення технології обслуговування і ремонту обладнання, що використовують в системах зрошення, розроблена нова технологія відновлення бабітових покриттів, яка може бути використана для упорних та опорних ПК. Удосконалена технологія захисту деталей їх пружних муфт від фреттинг-корозії. При цьому для зменшення до 50% зносу поверхонь гнучких елементів за новим способом застосовують металомасильні матеріали у вигляді парафіну з добавками з міді, дисульфиду молібдену і графіту; для захисту кріпильних деталей муфт, запропонований новий спосіб, епіламування, що дозволяє знизити коефіцієнт тертя в 2–3 рази. Розроблені і впроваджені у виробництво технологічні рекомендації виготовлення й ремонту деталей НА економічними, енергоощадними і екологічно й техногенно безпечними технологіями, захищеними 10 патентами України із загальним економічним ефектом 856 тис. грн.*

**Ключові слова:** зрошувальне землеробство, насосний агрегат, відцентровий насос, підшипник, пружна муфта, шийки валів, зношування, відновлення, реновація, модернізація.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.10>

**Вступ.** Стабілізація економіки кожної окремо взятої країни та її подальший розвиток у значною мірою визначається успішним розвитком сільськогосподарського виробництва, а збільшення виробництва продукції можливе лише за широкої комплексної механізації та автоматизації трудомістких процесів, у тому числі в зрошувальному землеробстві (Bolotskykh et al., 1988; Bilonozhko et al., 1990; Voitiuk et al., 2004).

Визначальними факторами отримання високорентабельної продукції з низькою собівартістю на сучасному

етапі розвитку землеробства мають стати ресурсозберігаючі технології та технічні засоби зрошення, що забезпечують рослини оптимальною кількістю води та елементами живлення, а також спрямованими діями на збереження екологічної обстановки в агроландшафтах.

За оцінками ООН, агроресурсний потенціал України дозволяє прогодувати 450–500 млн. осіб. Проте сьогодні його можливості використовують лише на третину. Щорічно для потреби водопостачання населення і галузей економіки забирається близько 11 куб. км води,

у тому числі близько 2 куб. км – для сільського господарства (Kovalskyi, 2019). Постійного зрошення потребують майже 19 млн. га орних земель, а водорегулювання – 4,8 млн. га. До всього цього, ми маємо застарілу систему поливу, отриману у спадок від радянського минулого. За оцінками експертів, потреба в інвестиціях на розвиток гідротехнічних меліоративних систем складає близько \$1,5–2 млрд. (Triahobchuk, 2006).

В документі 688-2019-р, від 14.08.2019 «Про схвалення Стратегії зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року» велика увага приділяється модернізації внутрішньогосподарських зрошувальних систем. Модернізація і відновлення працездатності пошкоджених зрошувальних систем, що не втратили свій ресурс включає в себе: заміну обладнання насосних станцій та влаштування вузлів обліку води на насосних станціях підкачки; влаштування протифільтраційних облицювань та регулюючих споруд на відкритій мережі внутрішньогосподарських та міжгосподарських каналах нижчого рівня; у разі необхідності будівництво акумулюючих ємностей.

Таким чином, означені вище заходи передбачають всі наявні в південному регіоні України зрошувальні системи розглядати як такі, що підлягають модернізації, проблеми, що виникають в зв'язку з цим потребують своєчасного вирішення, а роботи в цьому напрямку є актуальними.

**Постановка проблеми. Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У зрошуваному землеробстві знаходять застосування всі основні способи поливу, такі як поверхневий полив, дощування, краплинне та внутрішньоґрунтове зрошення (Dmitriev et al., 1999; Zajdel'man, 2003; Harkavyi et al., 2007; Kuzmenko et al., 2019).

Аналіз обладнання, задіяного в різних способах введення води в ґрунт, показав, що найбільш важливими і відповідальними для забезпечення якісного зрошування є насосні агрегати (НА) (Kuzmenko et al., 2019; Sad-Gorod, 2021), складовими частинами яких є електродвигуни, муфти, насоси.

Серед великої кількості насосів, що використовують переважно при зрошуванні слід відмітити відцентрові насоси (ВН), що створюють високий тиск за рахунок відцентрової сили і володіють високими експлуатаційними властивостями і довговічністю. Вони можуть перекачувати воду як з річки, так і з ємності. До найбільш відомих виробників насосів відносять

наступні фірми: Honda; Aquario; Subaru; Elpumps; AL-KO (Senchenko).

Серед вітчизняних виробників слід відмітити приватне акціонерне товариство «Епос» (ПрАТ «ЕПОС»), яке розташоване у м. Біла Церква і працює вже на протязі 30 років. Воно спеціалізується на виготовленні насосних станцій (НС) для зрошення, потужність і продуктивність яких лежить, відповідно, в межах від 10кВт до 1МВт та вище і від 50 м<sup>3</sup>/год до 3000 м<sup>3</sup>/год і вище (рис. 1) (PrAT "Eros").

Постачанням насосного обладнання для реконструкції та модернізації існуючих НС на протязі десятих років займається АТ «СМНПО – Інжиніринг» (колишнє СМНПО ім. М.В. Фрунзе) м. Суми. В 2021 році спеціалістами підприємства підготовлена поставка обладнання (рис. 2) для реконструкції та модернізації існуючих НС системи зрошення ГНС-1 та ГНС-2 в Республіці Таджикистан.

Обладнання, що постачають (табл. 1) представляє собою агрегат електронасосний відцентровий вертикальний, одноступінчастий, спірального типу, з одностороннім робочим колесом. Він призначений для перекачування води та інших рідин, аналогічних за в'язкістю та хімічною активністю, із вмістом завислих частинок не більше 3 г/л, розміром не більше 0,1 мм, з них абразивних частинок не більше 2%, з температурою не більше 45 °С.

Основні переваги агрегату ЦВН 22600-95: найменша маса порівняно з аналогами; потужність у номінальному режимі роботи 6 800 кВт (економія на електроенергії в порівнянні з аналогами складе близько 16 800 кВт на добу); середнє напручування на відмову – не менше 20 000 годин; середній ресурс між капітальними ремонтами – щонайменше 28 000 годин; приєднувальні розміри повністю збігаються із встановленими раніше насосами.

Слід відмітити що «вузьким» місцем підвищення ресурсу НС є привід відцентрового насосу. Як привід використовують, в основному, асинхронні двигуни (АД) і вони виходять з ладу або через руйнування підшипників, або пошкодження обмоток.

Надійність підшипникових вузлів залежить від форми та якості поверхневого шару деталей, від наявності мастильного матеріалу, утворення процесу мастила, відведення продуктів зносу та тепла, але насамперед від забезпечення герметичності підшипникового вузла загалом (Chermenskij et al., 2003).



а



б

**Рис. 1. Насосні станції підприємства ПрАТ «ЕПОС»: а – НС для поливу полів (зрошення великих площ); б – плаваюча НС для подачі води (PrAT "Eros")**

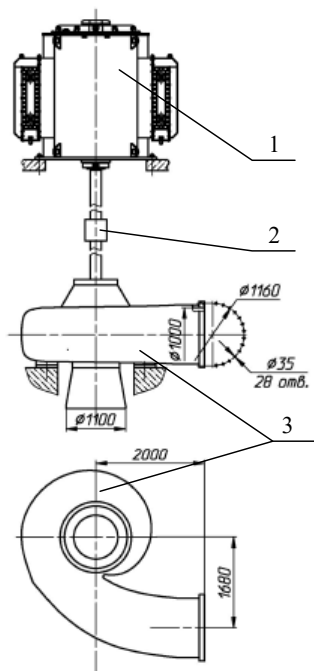


Рис. 2. Обладнання підготовлене АТ «СМНПО – Інжиніринг» для реконструкції та модернізації існуючих НС в Республіці Таджикистан: а – конструктивна схема електронасосного агрегату ЦВН 22600-9; б – типовий загальний вигляд насоса ЦВН 22600-95 (без електроприводу)

Таблиця 1

Технічна характеристика

Подача, м <sup>3</sup> /год	Натиск, м	ККД насоса, %	Споживана потужність, не більше, кВт	Частота обертання, об/хв	Маса, кг, не більше
22 680	95	80	6 800	1 000	25000

Одним із можливих шляхів вирішення даної проблеми є застосування нового типу ущільнень - магніторідинного герметизатора (МРГ), основною перевагою якого є можливість забезпечення практично повної 100% герметизації (Hasselfeld, 2017; Radionov et al., 2004).

Проблема підвищення ефективності та надійності насосного обладнання зрошувальних систем завжди була досить актуальним завданням. Останніми роками ситуація посилилася насамперед фізичним старінням устаткування, що пов'язане з недостатністю коштів, вкладених у його оновлення. У зв'язку з цим доцільне як освоєння нових технологій, а й підвищення ефективності технологічних процесів, застосовуваних в зрошувальних системах.

До деталей та їх елементів, від ступеню зносу поверхонь яких залежить подальша експлуатація насосу, слід віднести підшипникові та посадкові шийки валу, поверхні опорних і упорних підшипників ковзання, посадкові місця кулькових та роликових підшипників, робочих коліс, захисних втулок.

До основних видів зносу деталей НА слід віднести: абразивний (GOST 27674–88; Jakimov et al., 2017), корозійно-механічний (Pashechko et al., 2017; Chernets et al., 2001), втомлювальний (Kogaev et al., 1991), кавітаційний (Remont) та фретинговий (Tarelnyuk et al., 2005; Martsynkovskyy et al., 2020).

Одним з найбільш важливих вузлів НА, від якості якого залежить надійність та довговічність всього агрегату, є бабітові підшипники ковзання (ПК). Якість поверхневого шару ПК залежить від матеріалу покриття, методу його нанесення, додержання технологічного процесу та ін. Найбільш широко при виготовленні вкладишів підшипників (ВП) використовують антифрикційні сплави на олов'яній і свинцевій основі (бабіти).

Істотним недоліком бабітів є те, що з підвищенням температури знижуються всі показники механічної міцності, особливо опір втоми.

Однією із суттєвих причин виходу ПС з ладу є неякісна заливка бабіту (погане приставання бабіту до поверхні вкладиша, пористість та ін.).

Останніми роками для виготовлення та ремонту ПК набули поширення декілька нових методів: газотермічне напилення, гальванічне нарощування, штампування в температурному інтервалі кристалізації, надзвукове напилення ДИМЕТ (Galiahmetov I.G., 2009; Pometun, 2009; Lebedeva et al., 2003; Barykin et al., 2006; DIMET).

В (Luzan, 2011) якість покриття характеризується такими властивостями: міцністю зчеплення покриття з основою, когезійною міцністю напиленого шару, пористістю, рівномірною товщиною покриття, рівнем залишкових напруг, однорідністю структури та властивостей покриття.

Формування методом електроіскрового легування (ЕІЛ) проміжного шару з міді, міцно зчепленого, з одного боку, зі сталеву підкладкою, а з іншого – з шаром олова (утворення твердих розчинів заміщення) та бабіту, забезпечує більш міцне зчеплення сталеві підкладки з бабітом, а також більш інтенсивне відведення тепла із зони тертя (Tarel'nik et al., 2018). Крім цього, в (Tarel'nyk et al., 2014) був запропонований спосіб нанесення бабітового покриття на сталеві вкладиші ПК повністю методом ЕІЛ.

Інтенсивність зношування деталей машин у забрудненому повітрі в кілька разів вища, ніж при чистому повітрі. При влученні абразивних частинок у підшипники з м'яким антифрикційним шаром вони упресовуються в цей шар (шаржують його) і прискорюють зношування з'єднаного валу (рис. 3, а).

Здатність підшипникового матеріалу працювати при мастильному матеріалі, забрудненому абразивними частинками, є важливою його характеристикою. При відносно товстому шарі бабітової заливки (1,0–1,5 мм) влучення абразивних частинок у підшипник не викликає серйозних відхилень від нормальної роботи (рис. 3, б і в). Однак варто враховувати, що зі збільшенням товщини бабітового шару знижується межа його витривалості.

Іноді при роботі ВН можуть виникнути нештатні ситуації (відхилення від режиму експлуатації, неякісне мастило, попадання в зону тертя іншого тіла і таке інше), що може призвести до значного руйнування бабітових ПК (рис. 3, г і д).

Нерідко з метою більш ефективного захисту від зношення поверхню деталей піддають таким видам зміцнення, як наплавлення твердими та зносостійкими матеріалами, плазмове напилення, хіміко-термічній обробці (ХТО) та ін. Ремонтне зварювання та наплав-

лення деталей машин та механізмів на сьогоднішній день є одними з основних технологічних методів відновлення експлуатаційних властивостей деталей та зміцнення їх поверхонь. До не менш небезпечних методів відновлення деталей слід віднести і плазмове напилення призначене для нанесення покриттів різного призначення за допомогою розпилення порошкових та дротяних матеріалів (Tarel'nyk et al., 2021).

В (Tarel'nik et al., 2021) проведено аналіз впливу науково-технічного прогресу (НТП) на ремонтні технології, які використовують при виконанні поточного та капітального ремонтів сільськогосподарської техніки. Відмічається, що в ремонтних технологіях, як правило, використовують екологічно небезпечні методи наплавлення та зварювання. НТП в ремонтних технологіях значно розширив номенклатуру методів виконання ремонтних робіт новими короткотривалими, екологічно безпечними, енергозберігаючими і маловитратними технологіями, такими як електроіскрове легування (ЕІЛ), нанесення металополімерних матеріалів (МПМ) та поверхневе пластичне деформування (ППД). Крім цього впровадження та використання цих технологій дозволить перерозподілити об'єми ремонтних робіт, шляхом перенесення значної їх кількості з ремонтних баз на підприємства АПК і, таким чином, знизити вантажопотік сільськогосподарської техніки.

Велика кількість технологічних прийомів формування покриттів, широкий спектр матеріалів для цього, а також вплив застосовуваних методів на екологічну безпеку, не дозволяють однозначно вибрати той чи інший метод їх нанесення. Згідно (Tarel'nik et al., 2022) при виборі технологій формування поверхневого шару деталей необхідно враховувати усі стадії життєвого циклу виробу. При цьому враховують як вартісні, так і екологічні вимоги.

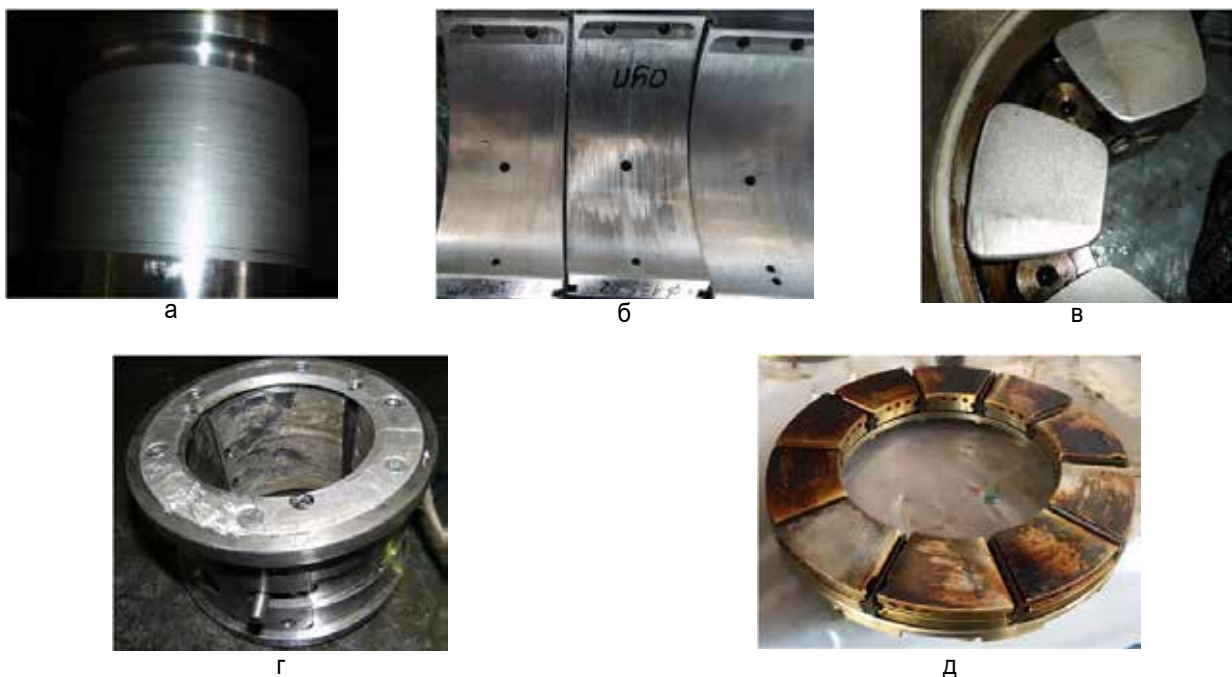


Рис. 3. Опорна шийка ротора (а), колодки опорного (б, г) і упорного (в, д) підшипників ВН після абразивного зношування

Таким чином, серед розглянутих методів відновлення деталей великої уваги заслуговують на ЕІЛ, БУФО та нанесення МПМ, які екологічно безпечні і останнім часом все частіше використовуються у ремонтному виробництві.

**Метою роботи** є підвищення надійності, довговічності і експлуатаційних властивостей насосних агрегатів систем зрошувального землеробства, за рахунок модернізації приводу і з'єднувальної муфти та спрямованого вибору найбільш ефективних, екологічно та техногенно безпечних технологій нанесення захисних покриттів при виготовленні та відновленні деталей.

Для досягнення поставленої **мети** необхідно вирішити наступні **завдання**:

1. Розробити систему спрямованого вибору найбільш ефективних, екологічно та техногенно безпечних технологій нанесення захисних покриттів, при виготовленні деталей НА.

2. Удосконалити технологію виготовлення і ремонту поверхневих шарів шийок валів роторів відцентрових компресорів під підшипники ковзання та посадкові поверхні деталей що збираються з натягом, шляхом використання екологічно та техногенно безпечних технологій ЕІЛ, ППД і нанесення МПМ.

3. Дослідити кореляційні залежності зносу бабітових покриттів вкладишів підшипників ковзання відцентрових насосів від роботи тертя і на їх підставі розробити математичну модель їх зношування.

4. Дослідити кореляційні залежності параметрів якості поверхневих шарів бабітових покриттів вкладишів підшипників ковзання відцентрових насосів при їх відновлюванні методом ЕІЛ від параметрів роботи обладнання і на їх підставі розробити математичну модель їх відновлення.

5. Удосконалити технологію захисту деталей пружних муфт від фреттинг-корозії з метою впровадження її в НА, які використовують в системах зрошувального землеробства.

6. Розробити технологічні рекомендації екологічно й техногенно безпечного виготовлення й ремонту відповідальних деталей НА, задіяних в системах зрошувального землеробства і впровадити результати досліджень у виробництво.

**Методика досліджень.** В роботі розроблені методики експериментальних досліджень впливу різних технологій на якість поверхонь деталей НА, задіяних в системі зрошувального землеробства. Розглянуті особливості технології ЕІЛ при реновації бабітових покриттів ПК відцентрових насосів НА. Розроблено гаму методів, спрямованих на удосконалення поверхневих шарів деталей НА як при виготовленні так і при реновації. При цьому, переважно використовували комбінації з екологічно безпечних та мало затратних методів: ЕІЛ, ОК, БУФО, МПМ.

Стійкість шийок валів під ПК і бабітових покриттів, нанесених за різною технологією, оцінювали по втраті ваги та зменшенні товщини зразка на машині тертя СМЦ-2 за схемою «диск-колодка, а відносну зносостійкість зразків для відновлення посадкових поверхонь валу – за схемою «диск – плоский зразок».

**Результати досліджень.** З метою підвищення надійності і довговічності НА розроблено систему спрямованого вибору екологічно безпечної та найбільш раціональної технології підвищення якості поверхонь їх деталей. При цьому враховують усі стадії їх життєвого циклу, а також економічні та екологічні вимоги.

На підставі встановленої кореляційної залежності між зносом бабітових покриттів ПК відцентрових насосів та роботою, затраченою на тертя, запропоновано фізично обґрунтовану математичну модель процесу зносу (рівняння зносу), яка дозволяє вирішувати як пряму задачу – визначати ваговий та лінійний знос за відомою роботою тертя, так і зворотну – знаходити необхідну роботу тертя для отримання того чи іншого зносу. Знаючи час досягнення певної величини зносу, з'являється можливість більш раціональної експлуатації виробів, своєчасно призначаючи час ремонту не допускаючи до катастрофічного зносу поверхню тертя. В процесі виконання досліджень розроблено методику визначення констант рівняння зносу: енергії активації (ЕА), а також максимального вагового, та лінійного зносу, які можуть бути використані, як критерії вибору найбільш раціональної технології нанесення бабітового покриття.

З метою підвищення надійності і довговічності НА, запропоновано ряд нових технологій покращення якості поверхневих шарів їх деталей. Так, удосконалений метод цементації ( $C_{EIL}$ ) – ЕІЛ графітовим електродом підшипникових шийок валів роторів відцентрових насосів, при якому в сталі 20 зменшується шорсткість поверхні з  $Ra = 9,0$  до  $3,2$  мкм; збільшуються суцільність левоганого шару з 80 до 100%, глибина дифузійної зони вуглецю з 35 до 70 мкм, мікротвердість «білого» шару і його товщина відповідно з 8492 до 10796 МПа і з 60 до 230 мкм. При заміні сталі 20 на сталь 40Х і 30Х13 мікротвердість «білого» шару і його товщина збільшується, відповідно до 11823 і 10991 МПа та 240 і 240 мкм.

Запропонований новий спосіб сульфомолібденування методом ЕІЛ шийок валів ПК, використання якого при  $Wp = 3,4$  Дж призводить до появи в поверхневому шарі сталі 40 до 30% мартенситної фази, до 6% залишкового аустеніту (ГЦК фази), а також до 5% дисульфиду молібдену.

Також запропонований новий спосіб формування методом ЕІЛ на посадочних поверхнях валів зносостійких покриттів складу Al-C-B, при нанесенні яких з підвищенням енергії розряду збільшується мікротвердість «білого» шару: при  $Wp=0,13$  Дж –  $H_{\mu} = 6487$  МПа, а при  $Wp = 4,9$  Дж –  $12350$  МПа.

Порівняльними дослідженнями на машині тертя СМЦ-2 встановлено, що для підшипникових шийок валів ваговий і лінійний знос круглих зразків з шліфованої сталі 40Х більший чим сталі 30Х13, відповідно в 1,15 і 1,09 рази. Найменший ваговий і лінійний знос у зразків зі сталі 30Х13 з покриттям складу (Mo+S) і БУФО складає, відповідно  $0,013 \cdot 10^{-3}$  кг і 0,90 мкм. Для посадкових шийок валів найкращу зносостійкість показали зразки зі сталі 30Х13, зміцнені в послідовності ЕІЛ (Al-C-B) → БУФО; ваговий і лінійний знос яких після 8 год іспитів склав, відповідно,  $0,105 \cdot 10^{-3}$  кг і 1,645 мкм.

Розроблені технологічні рекомендації по впровадженню результатів проведених досліджень у виробництво.

– для відновлення, зруйнованого після перешліфовки підшипникової шийки, шару підвищеної твердості, запропонований новий екологічно безпечний спосіб нітроцементзації, який включає  $C_{EП}$ , яка супроводжується подачею в зону легування азоту. Процес нітроцементзації характеризується підвищенням мікротвердості з 10500 до 10600 МПа, плавним зниженням її у перехідній зоні, збільшенням глибини зони підвищеної твердості з 120 до 150 мкм, а також зменшенням шорсткості поверхні Ra, з 0,7 до 0,6 мкм;

– запропоновано новий екологічно безпечний спосіб формування зносостійких товстошарових комбінованих електроіскрових покриттів на зношених поверхнях посадкових шийок валів роторів відцентрових насосів, який дозволяє формувати відновлені поверхневі шари товщиною 1,5 мм, суцільністю 100%, мікротвердістю 10100 МПа і шорсткістю Ra = 1,2 мкм. Товщину покриття можна збільшити за рахунок нанесення методом ЕП перед  $C_{EП}$  сталі 08X15H5Д2Т;

– з метою покращення ремонту ПК: виявлені залежності характеристик якості поверхневих шарів бабітових покриттів, відновлюваних методом ЕП від енергії розряду, що дозволило проводити реновацію виробів з бабітовими покриттями; запропоновані фізично обґрунтовані математичні моделі (рівняння масопереносу та прогнозування шорсткості поверхневого шару), що дозволяє за енергетичними параметрами обладнання ЕП визначати основні технологічні параметри якості сформованого шару: кількість перенесеного матеріалу, збільшення його товщини та шорсткість поверхні; розроблено методику визначення констант рівнянь масопереносу (енергії активації процесу масопереносу, привіску ваги та приросту товщини нанесеного шару, а також рівняння прогнозування шорсткості поверхні (максимальної шорсткості та енергії активації процесу її формування), які можуть служити критеріями вибору найбільш раціональної технології реновації бабітових покриттів;

– в результаті аналізу умов експлуатації технологічного обладнання, задіяного в технологічному циклі зрошення запропоновано проблеми герметичності підшипникових вузлів приводів НА, вирішити за рахунок їх модернізації шляхом впровадження нового типу ущільнень – магніторідинних герметизаторів;

– з метою заміни традиційних зубчастих і втулочно-пальцевих муфт, що використовують в НА, задіяних в технологічному циклі зрошення, на пружні муфти (ПМ) з гнучкими елементами, які у порівнянні з вище названими, мають ряд важливих переваг: можливість компенсувати радіальні неспіввісності і перекося валів приводу і агрегату, безшумні в роботі, не вимагають мастила і обслуговування в процесі експлуатації, були проведені дослідження направлені на удосконалення останніх. Дослідженнями зносостійкості гнучких елементів ПМ, сформованих в пакети за новим способом, встановлено, що при застосуванні металомасильних матеріалів у вигляді парафіну з добавками з міді,

дисульфиду молібдену і графіту, знос від фретинг-корозії, у порівнянні з прототипом, зменшується на 50%. Для захисту від фретинг-корозії кріпильних деталей ПМ запропонований спосіб епіламування після якого параметри шорсткості поверхонь (Ra, Rz і Rmax), оброблених методом епіламування, у порівнянні з необробленими, знизилась, відповідно, в 1,55; 1,53 і 1,39 рази. Запропонований спосіб не тільки значно підвищує зносостійкість сполучених деталей, а і знижує собівартість процесу;

– отриманні в дійсній роботі технологічні рішення, що використовуються екологічно і техногенно безпечними методами, впроваджені на Комунальному підприємстві «Міськводоканал» Сумської міської ради; ПАТ «Сумихімпром» та ТОВ «ТРИЗ ЛТД», м. Суми з загальним очікуваним економічним ефектом 856000 (вісімсот п'ятдесят шість тисяч) гривен.

#### **Висновки.**

1. На сучасному етапі розвитку стан меліоративного землеробства за рівнем використання наявних потужностей інженерної інфраструктури зрошення оцінюється як кризовий, з подальшою загрозою погіршення. Низка значних недоліків, таких як відсутність системного розуміння ролі та місця технічної підсистеми у технологічній системі землеробства на зрошенні; здебільшого пристосовані умови для обслуговування та ремонту обладнання; кадрові проблеми та, як наслідок, некомпетентна експлуатація, обслуговування та ремонт устаткування, перешкоджають отриманню високорентабельної продукції з низькою собівартістю, використанню ресурсозберігаючих технологій та технічних засобів зрошення, що забезпечують рослини оптимальною кількістю води та елементами живлення, а також спрямованими діями на збереження екологічної обстановки в агроландшафтах.

Розроблена в дійсній роботі система спрямованого вибору найбільш ефективних, екологічно та техногенно безпечних технологій підвищення якості поверхневих шарів деталей, при виготовленні насосних агрегатів, яка враховує усі стадії їх життєвого циклу, а також існуючі до них економічні та екологічні вимоги, в значній мірі знижує означені вище недоліки, які передбачають всі зрошувальні системи розглядати як такі, що підлягають модернізації.

2. З метою підвищення надійності і довговічності насосних агрегатів, задіяних в системах зрошення, удосконалена технологія виготовлення і ремонту поверхневих шарів шийок валів роторів відцентрових насосів під підшипники ковзання, та посадкові поверхні деталей що збираються з натягом, шляхом використання екологічно та техногенно безпечних технологій ЕП, ППД і нанесення МПМ. При цьому:

– для покращення параметрів якості поверхонь шийок ПК валів роторів відцентрових насосів:

а) розроблений і апробований новий спосіб цементзації їх поверхонь (*патент України на корисну модель № 142822*) при якому шорсткість поверхні зменшується з Ra = 8,3-9,0 до 3,2-4,8 мкм; суцільність легового шару збільшується з 80 до 100%; мікротвердість

«білого» шару і його товщина збільшуються, відповідно з 8492 до 10796 МПа і з 60 до 230 мкм;

б) розроблений і апробований новий спосіб формування методом ЕІЛ сульфомолібденових покриттів (**патент України на корисну модель №144932**), поверхневі шари яких складаються з 4-х ділянок. Зверху – пухкий шар, мікротвердість якого нижче основи –  $H_m = 1100-1600$  МПа. Нижче – «білий» шар з мікротвердістю при  $W_p = 3,4$  Дж  $H_m = 10596-10731$  МПа. Ще нижче дифузійна зона в якій мікротвердість плавно зменшується і переходить в мікротвердість основи. Рентгеноструктурним аналізом встановлено наявність в поверхневому шарі до 5% дисульфиду молібдену;

– для покращення параметрів якості поверхонь посадкових шийок валів роторів відцентрових насосів розроблений і апробований новий спосіб формування на їх поверхнях зносостійких покриттів складу Al-C-B, які наносять методом ЕІЛ (**патент України на корисну модель № 148495**). ДюрOMETричні дослідження показали, що з підвищенням енергії розряду збільшується мікротвердість як «білого» шару, так і дифузійної зони: при  $W_p=0,13$  Дж –  $H_m = 6487$  МПа, а при  $W_p = 4,9$  Дж –  $12350$  МПа. Нанесення біля торців напресованої деталі, методом ЕІЛ кільцеподібних покриттів шириною 2-5 мм з м'яких металів: срібла, міді або нікелю з подальшою БУФО, збільшує площу контактуючої поверхні до 100%, що не тільки захистить поверхні від Ф-К, а й підвищить герметичність з'єднання та його надійність і довговічність;

– для визначення кращого матеріалу валу і способу зміцнення для протистояння зношуванню, порівняльними дослідженнями встановлено, що ваговий знос зразків з сталі 40X більший чим сталі 30X13 в 1,15 рази і відповідно в 2,50 і 4,41 рази ніж сталі 40X після  $C_{EIL} \rightarrow$  БУФО і ЕІЛ (Mo+S) $\rightarrow$ БУФО. Лінійний знос круглих зразків шліфованої сталі 40X більший чим сталі 30X13 в 1,09 рази і відповідно в 2,83 і 5,85 рази ніж сталі 40X після  $C_{EIL} \rightarrow$  БУФО і ЕІЛ (Mo+S) $\rightarrow$ БУФО;

– для удосконалення технології відновлення поверхневого шару валу:

а) зруйнованого після перешліфовки шийки ПК шару підвищеної твердості, запропонований новий спосіб, який включає операцію цементації методом ЕІЛ, яка супроводжується подачею в зону легування азоту, що є по суті процесом нітроцементації. Використання нового способу супроводжується підвищенням мікротвердості з 10500 до 10600 МПа, збільшенням глибини зони підвищеної твердості з 120 до 150 мкм, і зменшенням шорсткості поверхні  $R_a$ , з 0,7 до 0,6 мкм;

б) на зношених поверхнях посадкових шийок валів роторів відцентрових насосів запропоновано новий екологічно безпечний спосіб формування зносостійких товстошарових комбінованих електроіскрових покриттів (**патент України на корисну модель № 141920**), який дозволяє формувати відновлені поверхневі шари товщиною до 1,5 мм, суцільністю 100 %, мікротвердістю 10100-9500 МПа і шорсткістю  $R_a=1,2$  мкм. Товщину покриття можна ще збільшити за рахунок нанесення методом ЕІЛ перед ЦЕІЛ сталі 08X15H5D2T (**патент України на корисну модель № 141919**).

3. На підставі встановленої кореляційної залежності між зносом бабітових покриттів ПК відцентрових насосів та роботою, затраченою на тертя, запропоновано фізично обґрунтовану математичну модель процесу зносу (рівняння зносу), що дозволяє по роботі тертя визначати лінійний та ваговий знос поверхні бабітового покриття, сформованого будь яким методом, а також вирішувати зворотну задачу, що дозволяє знайти величину роботи тертя, необхідну для здійснення зносу певної кількості речовини або для отримання необхідного лінійного зносу. Для різних матеріалів пар тертя (бабітовий вкладиш – шийка ПК) розроблено методику визначення констант рівняння зносу: найбільшого вагового та лінійного зносу, відповідно ( $\Delta m_{max}$ ) та ( $\Delta h_{max}$ ), а також енергію активації процесу зношування EA, які можуть бути критеріями вибору найбільш раціональної технології підвищення довговічності підшипника ковзання.

4. Для покращення технології обслуговування і ремонту обладнання, що використовують в системах зрошення, розроблена нова технологія відновлення бабітових покриттів, яка може бути використана для упорних та опорних ПК. При цьому: виявлено кореляційні залежності характеристик якості, відновлюваних методом ЕІЛ бабітових покриттів (ваги перенесеного бабіту на відновлюваний виріб, товщини і шорсткості сформованого шару), від енергії розряду, що дозволяє значною мірою реалізувати методику керування якістю поверхневих шарів, та проводити реновацію виробів з бабітовими покриттями; на підставі експериментальних досліджень запропоновано математичні моделі (рівняння масопереносу та прогнозування шорсткості поверхневого шару), що дозволяють за енергетичними параметрами установки ЕІЛ визначати основні технологічні параметри якості сформованого шару: кількість перенесеного матеріалу ( $\Delta P_k$ ), збільшення його товщини ( $\Delta h_c$ ) та шорсткість поверхні ( $\Delta R_z$ ); розроблено методику визначення констант: рівнянь масопереносу (енергії активації процесу масопереносу E, максимальному збільшенню ваги та товщини шару, відповідно  $\Delta P_{kn}$  та  $\Delta h_{cn}$ ), а також рівняння прогнозування шорсткості поверхні (шорсткості насичення  $\Delta R_{an}$  та енергії активації  $E_{\Delta R_z}$ ).

5. З метою підвищення надійності і довговічності насосних агрегатів, що використовують в системах зрошувального землеробства, удосконалена технологія захисту деталей їх пружних муфт від фреттинг-корозії. При цьому для зменшення до 50% зносу поверхонь гнучких елементів за новим способом (**патент України на корисну модель №151426**), застосовують металомастильні матеріали у вигляді парафіну з добавками з міді, дисульфиду молібдену і графіту; для захисту кріпильних деталей муфт, запропонований новий спосіб (**патент України на корисну модель № 142811**), який включає хіміко-фізичний вплив на поверхневий шар деталей, що контактують епіламу, що дозволяє знизити коефіцієнт тертя в 2–3 рази і, як наслідок, підвищити зносостійкість пар тертя.



6. Розроблені і впроваджені у виробництво технологічні рекомендації виготовлення й ремонту деталей насосних агрегатів, задіяних в системах зрошувального землеробства економічними, енергоощадними і екологічно й техногенно безпечними технологіями, захищеними 10 патентами України із загальним економічним ефектом 856 тис. грн.

#### Бібліографічні посилання:

1. Bolotskykh O.S., Bondarenko H.P., Skliarevskiy M.O. ta in. (1988) Operatsiina tekhnolohiia vyrobnytstva ovochiv [Operational technology of vegetable production] / Za red. O.S. Bolotskykh. K. : Urozhai. 344 s (in Ukrainian).
2. Bilonozhko M.A., Shevchenko V.P., Alimov D.M. ta in. (1990) Roslynnnytstvo. Intensyvna tekhnolohiia vyroshchuvannia polovykh i kormovykh kultur [Plant growing. Intensive technology for growing field and fodder crops] / Za red. M.A. Bilonozhka. K. : Vyshcha shkola. 292 s (in Ukrainian).
3. Voitiuk D.H. Dubrovin V.O., Ishchenko T.D. ta in. (2004) Silskohospodarski ta melioratyvni mashyny [Agricultural and reclamation machines] / Za red. D.H.Voitiuka. K. : Vyshcha shkola. 544 s (in Ukrainian).
4. Kovalskyi V. (2019) Systema zroshuvalnoho zemlerobstva v Ukraini: problemy, vartist ta shliakhy vyrishennia [Irrigation farming system in Ukraine: problems, cost and solutions] *Landlord* URL: <https://landlord.ua/news/systema-zroshuvalnoho-zemlerobstva-v-ukraini-problemy-vartist-ta-shliakhy-vyrishennia/> (in Ukrainian).
5. Triahobchuk V.I. (2006) Innovatsiino-investytsiinyi rozvytok natsionalnoho APK: problemy, napriamy, mekhanizmy [Innovative and investment development of the national agricultural industry: problems, directions, mechanisms] *Ekonomika Ukrainy*. 2. 4–12 (in Ukrainian).
6. Dmitriiev A.F., Khlapak M.M., Shuminskyi V.D. ta in. (1999) Hidrotekhnichni sporudy. Pidruchnyk dlia vuziv [Waterworks. Textbook for universities] / Za redaktsiieu A.F. Dmytriieva. Vyd-vo Rivnenskoho derzhavnoho tekhnichnoho universtyetu. 328 s (in Ukrainian).
7. Zaydelman F. R. (2003) Melioratsiya pochvy [Soil reclamation]. M. : Izd-vo MGU. 448 s. (in Russian).
8. Harkavyi A.D., Sereda L.P., Kondratiuk O.M. (2007) Mashynovykorystannia u roslynnnytstvi: Navch. posibn [Machine use in crop production: Study guide]. Vinnytsia. VDAU. 48 s (in Ukrainian).
9. Kuzmenko V.D., Volochniuk Ye.H. (2019) Zroshennia silskohospodarskykh kultur doshchuvanniam [Irrigation of agricultural crops by sprinkling.]. Kherson : VV KhDAU. 76 s (in Ukrainian).
10. Sad-Gorod (2021) 9 osnovnykh prichin polomki kapelnogo orosheniya [9 main reasons for the breakdown of drip irrigation] URL: <https://sad-ogorod.in.ua/ua/stati/kapelnoe-oroshenie-ua/9-osnovnykh-prichin-polomki-kapelno-go-orosheniya-ua/> (in Russian).
11. Senchenko I.O. Nasosy dlia systemy zroshennia – vydy, perevahy [Pumps for the irrigation system – types, advantages] *Stroytechnology.net – budivelni tekhnolohii*. URL: <http://stroytechnology.net/budivelni-roboty/485-nasosy-dlasystemy-zrochena.html> (in Ukrainian).
12. PrAT "Epos" – nasosy ta nasosne obladnannia [PJSC "Epos" – pumps and pumping equipment] *PrAT "Epos"*. URL: <https://pratepos.com.ua/> (in Ukrainian).
13. Chermenskiy O. N. Fedotov N. N. (2003) Podshipniki kacheniya: spravochnik-katalog [Rolling bearings: directory-catalogue] M. : Mashinostroenie. 576 s. (in Russian).
14. Hasselferd Z. (2017) Pravilnyiy vybor zaschitnykh uplotneniy podshipnikov. [The right choice of protective seals for bearings] *Himicheskaja tehnika*. 9. 16–17. (in Russian).
15. Radionov A.V., Vinogradov A.N., Gornov V.A. i dr. (2004) Asinhronnyie dvigateli serii BACO4s magnitozhidkostnyimi germetizatorami [Asynchronous motors of the BACO4 series with magnetic liquid seals]. *Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*. №3. S 29–32 (in Russian).
16. GOST 27674–88. Trenie, iznashivanie i smazka. Terminy i opredeleniya [Friction, wear and lubrication. Terms and Definitions] (in Russian).
17. Yakimov S. V., Ivanovskiy V. N., Degovtsov A. V., Eliseev D. V., Aygishev E. V. (2017) O vliyanii fraktsionnogo sostava abrazivnykh chastits v dobyvaemoy zhidkosti na vidu iznosa detaley elektrotsentrobezhnykh nasosov. [On the influence of the fractional composition of abrasive particles in the produced fluid on the types of wear of parts of electric centrifugal pumps]. *Territorija «NEFTEGAZ»*. 11. 32–38. (in Russian).
18. Paschenko M. I., Golubets V. M., Chernets M. V. (1992) Formirovanie i friktsionnaya stoykost evtekticheskikh pokrytuy [Formation and friction resistance of eutectic coatings]. K. : Naukova dumka. 344 s (in Russian).
19. Chernets M.V., Pashechko M.I., Nievchas A. (2001) Metody prohnozuvannia ta pidvyshchennia znosostiikosti trybotekhnichnykh system kovzannia. 3t. [Methods of forecasting and increasing the wear resistance of tribotechnical sliding systems. with]. Drohobych: Kolo. 512 s. (in Ukrainian).
20. Kogaev V. P., Drozdov Yu. N. (1991) Prochnost i iznosostoykost detaley mashin [Strength and wear resistance of machine parts]. M. : Vysshaja shkola. 319 s (in Russian).
21. Remont teplovoznnykh i teplokhidnykh rozpyliuvachiv forsunok [Repair of locomotive and locomotive spray nozzles] URL: <https://prom.ua/ua/p1061832522-remont-teplovoznnyh-teplohodnyh.html> (in Ukrainian).
22. Tarellyk V.B., Martsynkovskiy V.S., Bratushchak M.P. (2005) Problemy zakhystu hnuchkykh muft turbokompresoriv vid fretynh-korozii [Problems of protecting flexible couplings of turbocompressors from fretting corrosion]. *Visnyk SNAU*. 12. 231–240 (in Ukrainian).
23. Martsynkovskyy V., Tarellyk V., Konoplianchenko I., Gaponova O., Dumanchuk M. (2020) Technology Support for Protecting Contacting Surfaces of Half-Coupling–Shaft Press Joints Against Fretting Wear. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_22)

24. Galiahmetov I.G. (2009) Konstruktivnyie materialyi tsentrobezhnyih i vintovyih kompressorov. Vyibor i tehnologiya ih primeneniya. [Structural materials of centrifugal and screw compressors. The choice and technology of their application] Kazan': Izd-vo «FON». 155 s (in Russian).
25. Pometun S.K. (2009) Opyit OOO "TSZP" po uvelicheniyu resursa oborudovaniya metodami gazotekhnicheskogo napyileniya [The experience of TSZP LLC in increasing the resource of equipment using thermal spraying methods]. *Himicheskaja tehnika*. 4. 8–9 (in Russian).
26. Lebedeva A.P., Pogorelova T.N. (2003) Vosstanovlenie detaley mashin [Restoration of machine parts] – M. : Mashinostroenie. 672 s (in Russian).
27. Barykin N.P., Fazlyahmetov R.F. (2006) Izgotovlenie podshipnikov skolzheniya s primeneniem shtampovki anti-friktsionnogo sloya v usloviyah kristallizatsii i posleduyushey plasticheskoy deformatsii [Production of plain bearings using stamping of an antifriction layer under conditions of crystallization and subsequent plastic deformation]. *Kuznechno-shtampovnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 9. 27–29 (in Russian).
28. DIMET – novaya tehnologiya naneseniya metallicheskih pokryitij [OOO «Obninskiy tsentr poroshkovogo napyileniya»]. [DIMET – a new technology for applying metal coatings [LLC Obninsk Center for Powder Spraying]]. *Himicheskaja tehnika*. – (2010). 5. 29 (in Russian).
29. Luzan S.O. (2011) Predlagaemye obschie printsipy upravleniya kachestvom gazoplamennyih pokryitij pri vosstanovitelnom remonte detaley [Suggested General Principles of Quality Control of Gas-Flame Coatings in the Reconditioning of Parts]. *Mehanika ta mashinobuduvannya*. 2. S. 211–219. (in Russian).
30. Tarel'nik V.B., Paustovskii A.V., Tkachenko Yu.G., Martsinkovskii V.S. et al. (2018) Electrospark Graphite Alloying of Steel Surfaces: Technology, Properties, and Application. *Surf Eng Appl Electrochem*. 54(2), 147–156. doi: 10.3103/S106837551802014X.
31. Tarel'nyk V., Martsynkovskyy V., Dziuba A. (2014) New Method of Friction Assemblies Reliability and Endurance Improvement. *Appl Mech Mater*. 630, 388–396. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.630.388.
32. Tarel'nyk, V.B., Gaponova, O.P., Loboda, V.B., Konoplyanchenko, E.V., Martsinkovskii, V.S., Semirnenko, Yu.I., Tarel'nyk, N.V., Mikulina, M.A., Sarzhanov B.A. (2021) Improving Ecological Safety when Forming Wear-Resistant Coatings on the Surfaces of Rotation Body Parts of 12Kh18N10T Steel Using a Combined Technology Based on Electrospark Alloying. *Surf. Engin. Appl. Electrochem*. 57, 173–184. <https://doi.org/10.3103/S1068375521020113>.
33. Tarel'nik V.B., Solar'ov O.O., Tarel'nik N.V. i Voloshko T.P. (2021) Znizhennja intensivnosti avtomobil'nih perevezen' v sistemi tehnicnogo obslugovuvannya j remontu mashin agropromislovogo kompleksu [Reducing the intensity of road transport in the system of maintenance and repair of machines of the agro-industrial complex]. *Naukovij zhurnal «Inzhenerija prirodokoristuvannya»*. 3(21), s. 21–31. doi: 10.37700/enm.2021.3(21). 21–31 (in Ukrainian).
34. Tarel'nik V.B., Dumanchuk M.Ju., Pirogov V.O. (2022) Zastosuvannya sistemnogo pidhodu dlja upravlinnja yakistju poverhnevih shariv detalej nasosnih agregativ [Application of a system approach to quality control of the surface layers of parts of pumping units]. *The 5th International scientific and practical conference – Modern research in world sciencell* (August 7-9, 2022) SPC – Sci-conf.com.ua, Lviv, Ukraine. 2022. pp. 256–262. (in Ukrainian).

**Tarel'nyk V. B.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

**Pirogov V. O.**, Postgraduate, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

**Increasing the durability of pump units used in irrigation systems by combined environmentally safe technological methods**

*The article analyzes the current state of reclamation agriculture.*

*In order to increase the reliability and durability of pumping units (PU) used in irrigation systems, the technology of manufacturing and repairing the surface layers of the centrifugal pumps (CP) rotor shafts necks under sliding bearings (SB) and the landing surfaces of parts that are assembled with tension has been improved by using ecologically and technologically safe technologies of electrospark alloying (ESA), surface plastic deformation (SPD) and application of metal-plastic materials (MPM). At the same time: a) a new method of cementing their surfaces using the ESA method was developed and tested, which improves the quality parameters of the surface layer; b) a new method of forming sulfomolybdenum coatings using the ESA method was developed and tested, the surface layer of which contains up to 5% molybdenum disulfide. A new method of forming wear-resistant coatings of Al-C-B composition on the bearing necks of CP rotor shafts by the ESA method has been developed, in which the microhardness of both the "white" layer and the diffusion zone increases with increasing discharge energy ( $W_p$ ): at  $W_p=0.13$  J –  $H_{\mu} = 6487$  MPa, and at  $W_p = 4.9$  J – 12350 MPa. To improve the technology of restoration of the surface layer of the shaft, a new method is proposed, which includes the cementation operation by the ESA method, which is accompanied by the supply of nitrogen to the doping zone, which is a nitrocementation process in which the microhardness increases from 10,500 to 10,600 MPa and the depth of the increased hardness zone from 120 to 150  $\mu\text{m}$ . and the surface roughness  $R_a$  also decreases, from 0.7 to 0.6  $\mu\text{m}$ . A physically based mathematical model of the wear process (wear equation) is proposed, which allows to determine the linear and weight wear of the babbitt coating surface, formed by any method based on the work of friction, as well as to solve the inverse problem – it allows to find the amount of friction work necessary to carry out the wear of a substance certain amount or required linear wear. For different materials of friction pairs (babbitt insert – SB neck), a method of determining the constants of the wear equation: the largest weight and linear wear, as well as the activation energy of the wear process, which can be criteria for choosing the most rational technology for increasing the durability of the SB, has been developed. To improve the technology of maintenance and repair of equipment used in irrigation systems, a new technology for restoring babbitt coatings has been developed, which can be used for thrust and support SBs. Advanced technology for protecting parts of their elastic couplings from fretting corrosion.*

*At the same time, in order to reduce the wear of the surfaces of flexible elements by up to 50% according to a new method, metal-lubricating materials in the form of paraffin with additives of copper, molybdenum disulfide and graphite are used; to protect the coupling fastening parts, a new method, epilation, is proposed, which allows to reduce the coefficient of friction by 2–3 times.*

*Developed and implemented in production technological recommendations for the manufacture and repair of PU parts economical, energy-saving and ecologically and technogenically safe technologies, protected by 10 patents of Ukraine with a total economic effect of 856 thousand UAH.*

**Key words:** irrigated agriculture, pump unit, centrifugal pump, bearing, elastic coupling, shaft necks, wear, restoration, renovation, modernization.

## ІНЖЕНЕРНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ ВПЛИВУ ПОКАЗНИКІВ БЕЗВІДМОВНОСТІ І РЕМОНТОПРИДАТНОСТІ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЙОГО МАШИНОВИКОРИСТАННЯ

**Тітова Людмила Леонідівна**

кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0001-7313-1253

[l\\_titova@nubip.edu.ua](mailto:l_titova@nubip.edu.ua)

**Надточій Олександр Васильович**

кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0002-4985-9313

[o.nad@ukr.net](mailto:o.nad@ukr.net)

*В статті сформульовані методичні підходи інженерного менеджменту щодо підтримання працездатності зернозбиральних комбайнів, для яких протягом всього періоду експлуатації це пов'язане із ускладненням їх будови за рахунок використання автоматизованих і гідравлічних пристроїв, електроніки, збільшення продуктивності акцентує значимість відмови комбайна з технічних причин. За існуючого розвитку механізації сільськогосподарського виробництва, на авторський погляд, має базуватися на двох рівно важливих моментах, а саме зростанні об'ємів продукції агропромислового комплексу та раціональній зниженні її собівартості. Комплектування комбайнового парку господарств вітчизняними чи зарубіжними машинами має проводитися із врахуванням цих факторів, а також інших вимог сьогодення.*

*Авторами розроблена методика оцінювання ефективності зернозбиральних комбайнів за двома критеріями надійності, а саме показниками безвідмовності і ремонтпридатності, за питомими сумарними затратами на гектар площі збирання врожаю зернових сільськогосподарських культур. При цьому процес машиновикористання зернозбирального комбайна розглядається у вигляді системи масового обслуговування, де у якості апарату розглядається саме збиральна машина, від якої поступає потік відмов, що змушують техніку простоювати.*

*В статті отримано порівняльні залежності питомих сумарних затрат від зазначених показників надійності, що характеризуються наробітком на відмову, часом відновлення та інших показників, що впливають на їх ефективність: балансової вартості комбайна, терміну експлуатації, вартості реалізованої продукції, урожайності культури і тривалості жнив на прикладі зернозбирального комбайна Class Mega-370. Отримано залежність, яка показує, що жнива триватимуть 14 днів за допомогою 24 зернозбиральних комбайнів з простоями, що не перевищують 1,24 години, чи 25 зернозбиральними комбайнами з простоями 1,9 години.*

*Отримані результати, як перспектива подальших досліджень, можуть бути використані аграрними господарствами при комплектуванні комбайнового машинного парку як вітчизняними так і імпортованими моделями зернозбиральних комбайнів.*

**Ключові слова:** безвідмовність, ремонтпридатність, урожайність, наробіток на відмову, надійність, втрати урожаю, критерії.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.11>

**Постановка проблеми.** Існуюча сільськогосподарська техніка, не дивлячись на її постійне удосконалення, потребує підтримання працездатності на протязі усього періоду функціонування (Pisarenko et al., 2019). Це досягається виконанням великого об'єму ремонтно-обслуговуючих дій (Shih-Heng et al., 2018), які при зростанні технічного оснащення (Kurgis et al., 2016), ускладнення технічних засобів та використання автоматизованих пристроїв суттєво зростають (Hrynkiv et al., 2020). З підвищенням продуктивності зростає і значимість кожної відмови (Gurcanli et al., 2015), що в умовах комплексного використання техніки веде до простоїв залежних до неї машин (Xi & Songlin, 2019), порушенню технологічних процесів (Nazarenko et al., 2021), втратам чи погіршенню якості продукції (Aven, 2016). Повною мірою це стосується зернозбиральних комбайнів, які постійно працюють в комплексі додаткових машин (Kuzmich et al., 2021), що забезпечують виконання процесу збирання (Nadtochiy & Titova, 2018).

Забезпечення постачання зернозбиральних комбайнів до України займаються 8 фірм (Rogovskii et al., 2021b), які забезпечують 96% модифікацій (Voinalovych et al., 2019). Окрім того, різні заводи виробники що виготовляють вітчизняні зернозбиральні комбайни різних модифікацій (Nazarenko et al., 2020), що також збільшує їх номенклатуру (Yezekyan et al., 2020). Це ускладнює вибір зернозбиральних комбайнів для експлуатації в конкретних господарствах (Zubko et al., 2022).

Розвиток механізації сільськогосподарського виробництва, на наш погляд, має базуватися на двох рівно важливих моментах – зростанні об'ємів продукції агропромислового комплексу (Khamidullina et al., 2017) та зниженні її собівартості (Corinne & José 2017). Комплектування комбайнового парку господарств вітчизняними чи зарубіжними машинами має проводитися із врахуванням цих факторів (Nykyforchyn et al., 2019), а також інших вимог сьогодення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Глибокі дослідження оцінки ефективності вітчизняних і зарубіжних аналогів зернозбиральних комбайнів ведуться у провідних закладах вищої освіти та науково-дослідних інститутах Європи (Chen et al., 2020) та Північної Америки (Erokhin et al., 2019).

Насправді часто під час оцінки ефективності вітчизняних і зарубіжних аналогів зернозбиральних комбайнів заявки послідовно проходять не одну, а кілька систем масового обслуговування (Rogovskii et al., 2021a). Сукупність таких систем теорії масового обслуговування прийнято називати мережею масового обслуговування чи стохастичною мережею (Zou et al., 2017). Відомо безліч більш менш складних мереж масового обслуговування (Rejovitzky et al., 2013), які характеризуються структурою, тобто зв'язками, існуючими між системами, складовими мережу, і властивостями самих систем (Guansah et al., 2020).

Оптимізація мережі технічної експлуатації зернозбиральних комбайнів зводилася раніше до вирішення питань пошуку оптимальної потужності та режимів роботи окремих систем при заданому постійному технологічному процесі обслуговування (Rogovskii, 2020). Однак у ряді випадків і самі технологічні процеси обслуговування попередньо можуть бути оптимізовані, для чого, як правило, потрібна побудова більш детальних алгоритмів, що моделюють (Nazarenko et al., 2020). Однак критерії оцінки вибору збиральних машин із врахуванням параметрів їх надійності (Rogovskii et al., 2019), що забезпечують ефективність функціонування парку в цілому (Sánchez-Hermosilla et al., 2011), як системи, відсутні, їх можна віднести до розряду умов, придатних лише для орієнтовної якісної оцінки (Tyutrin, 2019). При цьому успіх вирішення задач прогнозування розвитку технічних систем залежить перш за все від наукової обґрунтованості методу вирішення (Najafi et al., 2015), що є дуже актуальним.

**Метою досліджень** є розробка методики оцінки ефективності зернозбиральних комбайнів при комплектуванні парку господарства різними вітчизняними і зарубіжними комбайнами.

**Результати досліджень.** Об'єктом дослідження є процес функціонування зернозбиральних комбайнів основних марок, які використовуються в Київській області. При виконанні досліджень використовувалися методи аналізу і синтезу виробничих процесів, теорії ймовірностей, теорії масового обслуговування, математичного моделювання та теорії надійності машин. Дослідження проводилися в Білоцерківському районі Київської області.

Для оцінки ефективності окремого зернозбирального комбайна за економіко-математичною моделлю в якості критерію оцінки його ефективності приймалися питомі сумарні затрати на збирання зернових, які можна подати у вигляді:

$$C_{\text{п}} = C_{\text{А}} + C_{\text{ЗП}} + C_{\text{ПММ}} + C_{\text{ТОР}} + C'_{\text{ВУ}} + C'_{\text{БВУ}} + C'_{\text{ТО}} + C'_{\text{П}} \rightarrow \min \quad (1)$$

де  $C_{\text{п}}$  – питомі сумарні витрати на збирання урожаю, грн/га;

$C_{\text{А}}$  – амортизаційні відрахування, грн/га;  
 $C_{\text{ЗП}}$  – заробітна плата комбайнера та допоміжних працівників, грн/га;

$C_{\text{ПММ}}$  – затрати на паливо-мастильні матеріали, грн/га;  
 $C_{\text{ТОР}}$  – затрати на технічне обслуговування і ремонт, грн/га;

$C'_{\text{ВУ}}$  – вартість втрат урожаю комбайном, грн/га;

$C'_{\text{БВУ}}$  – вартість біологічних втрат урожаю із-за триваліших термінів жнив, грн/га;

$C'_{\text{ТО}}$  – вартість втрат урожаю з технічних причин, грн/га;

$C'_{\text{П}}$  – затрати на відрахування та податки, грн/га.

Детальний опис економіко-математичної моделі приведено в роботі [6].

Особливістю цієї моделі є те, що в ній враховано загальні втрати урожаю, які включають втрати безпосередньо за зернозбиральним комбайном ( $C'_{\text{ВУ}}$ ), внаслідок його технічного стану, від біологічних втрат урожаю ( $C'_{\text{БВУ}}$ ), які залежать від культури та термінів жнив та втрат з технічних причин ( $C'_{\text{ТО}}$ ) із за простоїв комбайнів по причині відмов. Зупинимось на визначенні втрат урожаю більш детально, оскільки перші чотири складники формули (1) не викликають ускладнень.

При проведенні державних випробувань нових зернозбиральних комбайнів встановлені нормативні втрати в межах 2,5–3% (для розрахунків приймаємо середнє значення 2,75%). Вони складаються із втрат за жаткою внаслідок негерметичності, від недомолоту і наявності вільного зерна в соломі (за клавшами) та полові (за очисткою).

Вартість цих втрат ( $C'_{\text{ВУ}}$ ) для різних марок зернозбиральних комбайнів напишемо у вигляді виразу:

$$C'_{\text{ВУ}} = k_{\text{КОМ}} \cdot U_{\text{З}} \cdot \Pi_{\text{З}}, \quad (2)$$

де  $k_{\text{КОМ}}$  – коефіцієнт втрат за комбайном;

$U_{\text{З}}$  – біологічна урожайність зерна, ц/га;

$\Pi_{\text{З}}$  – закупівельна ціна продукції, грн/ц.

Вартість біологічних втрат урожаю ( $C'_{\text{БВУ}}$ ) визначаємо за формулою:

$$C'_{\text{БВУ}} = \frac{k_{\text{Б}} \cdot U_{\text{max}} \cdot \Pi_{\text{З}} \cdot k_{\text{ПД}} \cdot S_{\text{Г}}}{W_{\text{Д}}}, \quad (3)$$

де  $U_{\text{max}}$  – максимальна урожайність в період повного дозрівання пшениці, ц/га;

$k_{\text{ПД}}$  – коефіцієнт втрат за період повного дозрівання пшениці, %;

$k_{\text{Б}}$  – коефіцієнт біологічних втрат урожаю;

$W_{\text{Д}}$  – денна продуктивність комбайну, га.

Вартість втрат урожаю з технічних причин ( $C'_{\text{ТО}}$ ) (простої комбайнів із за відмов) за період жнив  $T$  складе:

$$C'_{\text{ТО}} = C_{\text{ПР}} \cdot T_{\text{ПР}} \quad (4)$$

де  $C_{\text{ПР}}$  – вартість години простою комбайна за період  $T$ , грн/год.;

$T_{\text{ПР}}$  – час простою комбайна за період  $T$ , год.

В роботі [6] вартісні втрати від недоотримання урожаю, за рахунок триваліших термінів збирання, пов'язаних із відмовами з технічних причин визначені за залежністю:

$$C_{TO}^* = k_B \cdot U_{opt} \cdot C_3 \cdot D. \quad (5)$$

де  $k_B$  – коефіцієнт врахування втрат продукції при затягуванні термінів виконання робіт від оптимального моменту на одиницю часу;

$D$  – відхилення виконання роботи від оптимального агротехнічного терміну з технічних причин, днів;

$U_{opt}$  – значення урожайності, що може бути отримане при виконанні роботи в агротехнічні терміни, ц/га.

Розглянемо процес роботи зернозбирального комбайна у вигляді системи масового обслуговування, де у якості апарату розглядається машина, від якої поступає потік відмов, що змушують техніку простоювати [3].

Тоді, зважаючи на випадковість величини простоїв з технічних причин ( $T_{пр}$ ) середній час простою зернозбирального комбайна із за відмов можна визначити за залежністю:

$$T_{пр} = \frac{T \cdot \lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)^2} \cdot (1 - e^{-(\lambda + \mu)T}), \quad (6)$$

де  $\lambda$  – інтенсивність відмов за період збирання  $T$ , 1/год.;

$\mu$  – інтенсивність відновлення комбайна за період жнив  $T$ , 1/год.

Для визначення величини  $\lambda$  і  $\mu$  необхідно знати наробіток на відмову, середній час відновлення і фактори, що впливають на ці показники.

В загальному час відновлення є величиною випадковою і залежить від складності вузла, агрегату, деталі, яка відмовила, наявності запасних частин, інструменту, організаційних моментів щодо усунення відмови, тощо. Його можна визначити на основі статистичного матеріалу за залежністю:

$$T_{RES} = \frac{\sum_{i=1}^m t_{resi}}{m}, \quad (7)$$

де  $t_{resi}$  – час відновлення працездатності комбайна після  $i$ -ї відмови, год.;

$m$  – кількість відмов за період жнив.

Згідно з експериментальними дослідженнями, закон розподілу часу відновлення близький до експоненціального, а вірогідність попиту на запасні частини розподіляються за пуасонівському закону розподілу.

Наробіток на відмову є основною величиною, що характеризує надійність машини і визначається з виразу:

$$T_{REF} = \frac{\sum_{i=1}^m t_{refi}}{m} \quad (8)$$

де  $t_{refi}$  – наробіток комбайна до  $i$ -ї відмови.

Значення  $\lambda$  і  $\mu$  є оберненими величинами наробітку на відмову і часу відновлення, тобто:

$$\lambda = \frac{1}{T_{REF}} \quad (9)$$

$$\mu = \frac{1}{T_{RES}} \quad (10)$$

Так як величина  $D$  (5) є значенням простоїв машини, що визначене за (6) після підстановки в (5) отримуємо:

$$C_{TO}^* = k_B \cdot U_{opt} \cdot C_3 \left[ \frac{T\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)^2} \left( 1 - e^{-\left(\frac{\lambda + \mu}{T}\right)} \right) \right], \quad (11)$$

Витрати на відрахування і податки ( $C_{п}^*$ ) містять: затрати на соціальні відрахування ( $З_{соц}$ ), страхування техніки ( $З_{стр}$ ), податки ( $H_{п}$ ), непрямі затрати ( $З_{н}$ ) і визначається:

$$C_{п}^* = З_{соц} \cdot З_{стр} \cdot H_{п} \cdot З_{н}. \quad (12)$$

Значення  $З_{соц}$  визначається досить просто:

$$З_{соц} = З_{н} \cdot \epsilon_{св} \quad (13)$$

де  $\epsilon_{св}$  – єдиний соціальний внесок (з 2016 – 22%);

Затрати на страхування ( $H_{п}$ ):

$$З_{cmp} = \frac{Ц_{\sigma} H_{cmp}}{100 \cdot S_{г}}. \quad (14)$$

де  $H_{стр}$  – норма страхування за год у % від балансової вартості.

Сума податків ( $H_{п}$ ) визначаємо за формулою:

$$H_{п} = H_{ди} \cdot H_{Е} \cdot H_{Т}. \quad (15)$$

де  $H_{ди}$  – податкові збори, які стягуються Держтехнаглядом за реєстрацію машин, видачу номерного знаку та паспорта, а також на щорічне проходження техогляду, грн;

$H_{Е}$  – екологічний збір, грн;

$H_{Т}$  – транспортний збір, грн.

Суму кожного з податків визначають відповідно до діючих нормативних актів. Величину податку ( $H_{п}$ ) на одиницю роботи визначають виходячи із середньорічного наробітку комбайна і середньої величини податків.

Непрямі ( $З_{н}$ ) включають в себе загальнопромислові ( $P_{зв}$ ) і загальногосподарські витрати ( $P_{зг}$ ), які приблизно можна визначити за формулами:

$$P_{зв} = (0,3 \dots 0,8) З_{н} \quad (16)$$

$$P_{зг} = (0,1 \dots 0,5) З_{н} \quad (17)$$

Підставивши значення складників затрат у формулу (1), можливо визначити питомі затрати на збирання 1 га чи 1 т бункерної маси для зернозбиральних комбайнів різних марок і порівняти отримані дані для визначення найбільш ефективного комбайна.

Для забезпечення економіко-математичної моделі були введені наступні обмеження:

$$T_{min} \leq T_{\phi} \leq T_{max} \text{ – (тривалість жнив);}$$

$$U_{Nmin} \leq U_N \leq U_{Nmax} \text{ – (урожайність культури);}$$

$$\lambda_{min} \leq \lambda \leq \lambda_{max} \text{ – (інтенсивність відмов);}$$

$$\mu_{min} \leq \mu \leq \mu_{max} \text{ – (час усунення відмов);}$$

$$C_{min} \leq C \leq C_{max} \text{ – (закупівельна ціна продукції);}$$

$$B_{Kmin} \leq B_K \leq B_{Kmax} \text{ – (балансова вартість комбайна);}$$

$$T_{Emin} \leq T_E \leq T_{Emax} \text{ – (термін експлуатації (вік) комбайна).}$$

байна).

Приведена розроблена методика оцінки ефективності зернозбиральних комбайнів із врахуванням їх надійності реалізована на прикладі парку комбайнів Київської області (табл. 1). При цьому середній час відновлення комбайнів склав 3,6 годин.

Таблиця 1

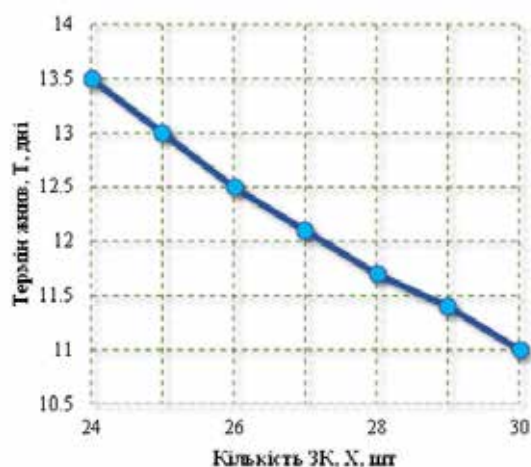
**Наробіток на відмову зернозбиральних комбайнів (в годинах) в 2021 році**

Єнісей-1200	11
PCM-101 «Вектор»	21
Acros-540	28
Палесьє GS12A1	44
Славутич КЗС-9М	90
Class Mega-370	110
Tiscano-450	210
Lexion-570	220
John Deere-9660	250

Порівнюючи отримані дані (табл. 1) відразу можна відмітити, що комбайни закордонного виробництва мають набагато вищі показники надійності.

На рис. 1 – рис. 3 приведені залежності періоду збирання, часу простоїв з технічних причин і надійності парку комбайнів від кількості зернозбиральних комбайнів у господарстві.

Залежності отримані для господарства з об'ємом робіт більше 10000 га, агротехнічний термін жнив 14 днів, а тривалість зміни складала 18 год. Рис. 1 пока-



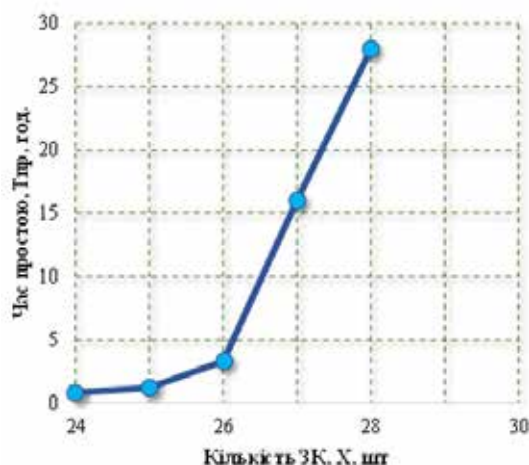
**Рис. 1. Залежність терміну жнив від кількості зернозбиральних комбайнів (ЗК)**

зує, що збирання в агротехнічний термін можливе при наявності в господарстві 24 комбайнів, а при більшій їх кількості цей термін стискається, що дозволяє уникнути втрат зерна із-за осипання.

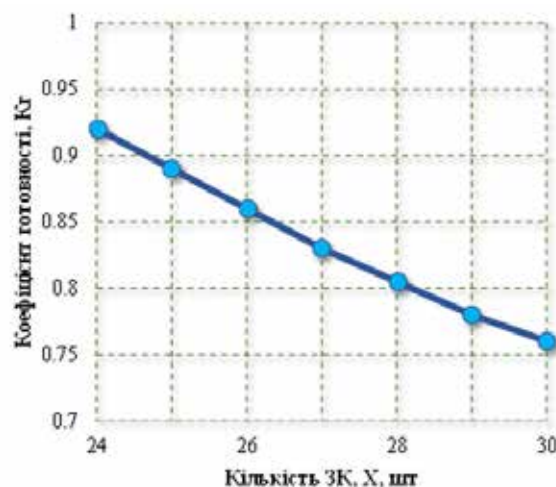
Залежність на рис. 2 показує що жнива триватимуть 14 днів за допомогою 24 комбайнів з простоями, що не перевищують 1,24 год, чи 25 комбайнами з простоями 1,9 год.

Залежність (рис. 3) слід розуміти наступним чином: для виконання збирання в агротехнічні терміни коефіцієнт готовності комбайнового парку (при 24 комбайнах) має бути не менше 0,92, при 25 комбайнах – не менше 0,88, тощо (при 29 комбайнах – не менше 0,76).

Отримані графіки питомих сумарних затрат по кожній марці комбайнів від їх основних показників і характеристик: наробітку на відмову і часу відновлення, які характеризують їх надійність з позиції безвідмовності і ремонтпридатності, а також інших показників, що впливають на їх ефективність: балансової вартості комбайнів, терміну експлуатації, ціни реалізації продукції, урожайності культури і тривалості жнив.



**Рис. 2. Залежність кількості простоїв з технічних причин від кількості зернозбиральних комбайнів (ЗК)**



**Рис. 3. Залежність коефіцієнта готовності від кількості зернозбиральних комбайнів (ЗК)**

На рис. 4 і рис. 5 приведені залежності питомих сумарних затрат від наробітку на відмову і часу відновлення комбайна Class Mega-370. На рис. 6 – рис. 10 приведені, відповідно, залежності питомих сумарних затрат від

балансової вартості комбайна, терміну його експлуатації, вартості реалізації зерна, урожайності і тривалості жнив.

Залежності приведені на рис. 4-10 отримані за економіко-математичною моделлю при змінних лише по осі

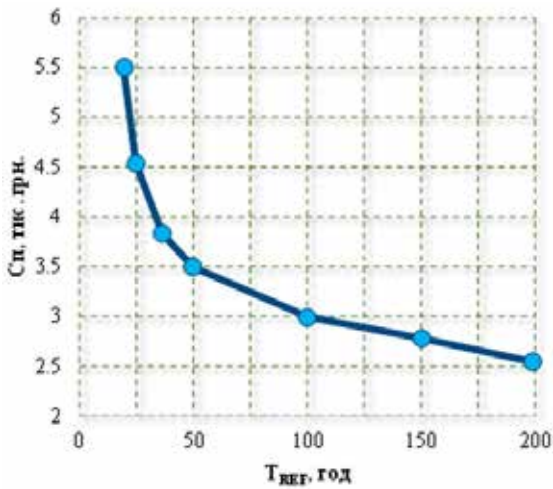


Рис. 4. Залежність питомих простоїв з технічних причин комбайна Class Mega-370

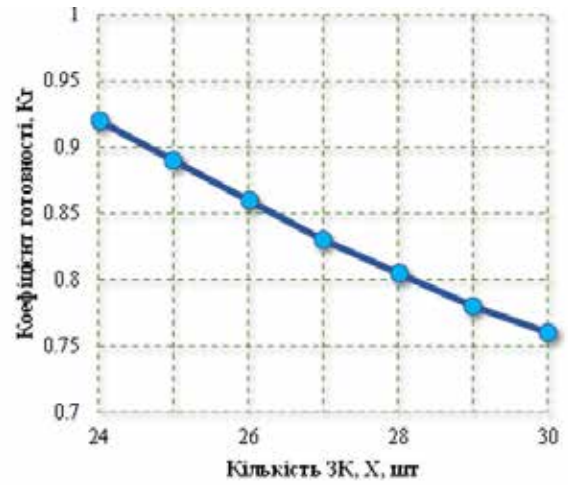


Рис. 7. Залежність питомих сумарних затрат від терміну експлуатації комбайна Class Mega-370

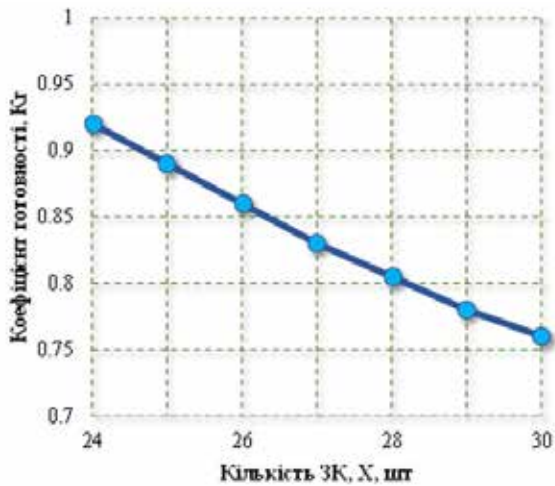


Рис. 5. Залежність питомих сумарних затрат від часу відновлення комбайна Class Mega-370

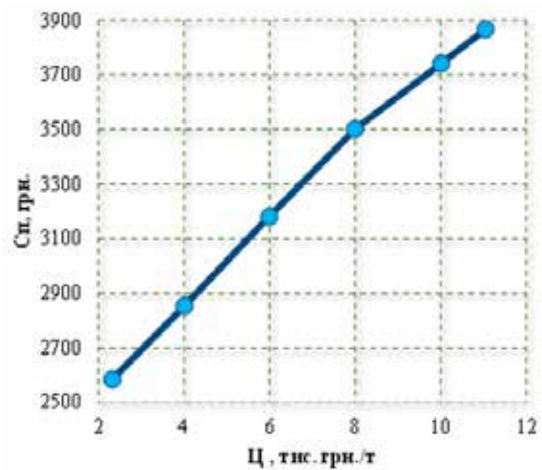


Рис. 8. Залежність питомих сумарних затрат від вартості реалізації продукції комбайна Class Mega-370

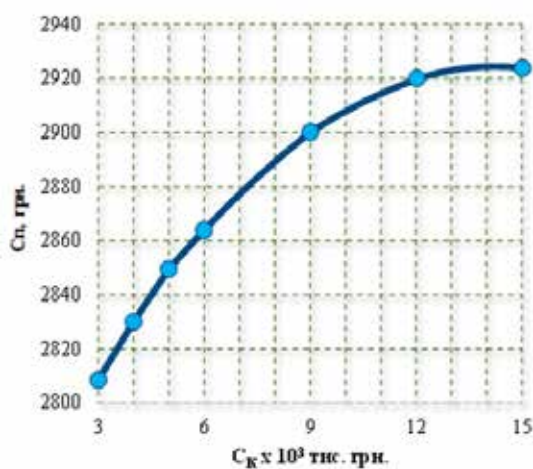


Рис. 6. Залежність питомих сумарних затрат від балансової вартості комбайна Class Mega-370

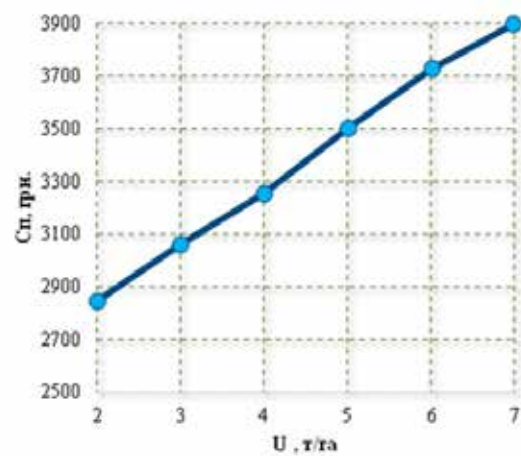
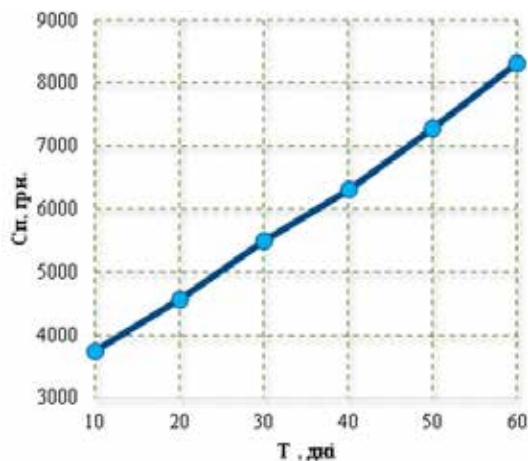


Рис. 9. Залежність питомих сумарних затрат від урожайності комбайна Class Mega-370





**Рис. 10. Залежність питомих сумарних затрат від тривалості жнив комбайна Class Mega-370**

абсцис та постійних величинах всіх інших змінних. Для розрахунків всі значення бралися стосовно конкретного аграрного господарства. Комбайни вітчизняного виробництва (на сьогодні це  $\approx 23\%$ ) парку зернозбиральних комбайнів України по надійності в декілька раз уступають імпортним зернозбиральним комбайнам. Наробіток

у них склав від 70 до 90 годин, а у імпортних – від 100 до 250 годин.

**Висновки.** Розроблена методика оцінки ефективності зернозбиральних комбайнів за питомими сумарними затратами на гектар зібраної площі, що реалізована на основі математико-економічної моделі із врахуванням головних критеріїв надійності комбайнів і інших показників. На основі розробленої методики господарства мають змогу формувати раціональний парк зернозбиральних комбайнів і врахуванням основних показників їх надійності та інших характеристик, зокрема: вартості комбайнів, терміну експлуатації зернозбиральних комбайнів, вартості реалізації продукції, урожайності, тривалості жнив.

Залежності отримані для господарства з об'ємом робіт більше 10000 га, агротехнічний термін жнив 14 днів, а тривалість зміни складала 18 год. показують, що збирання в агротехнічний термін можливе при наявності в господарстві 24 зернозбиральні комбайни, а при більшій їх кількості цей термін стискається, що дозволяє уникнути втрат зерна із-за осипання. При цьому для виконання збирання в агротехнічні терміни коефіцієнт готовності комбайнового парку при 24 комбайнах має бути не менше 0,92, при 25 комбайнах – не менше 0,88, а при 29 комбайнах – не менше 0,76.

#### **Бібліографічні посилання:**

1. Aven, T. (2016). Risk assessment and risk management: review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research* 253(1): 1–13.
2. Chen, Y., Mao, E., Li, W., & Chen, J. (2020). Design and experiment of a high-clearance self-propelled sprayer chassis. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 13(2): 71–80.
3. Corinne, B., & José, R. (2017). Estimating the Hurst parameter. *Statistical Inference for Stochastic Processes*. Springer Verlag, 10(1): 49–73.
4. Erokhin, M., Pastukhov, A., & Kazantsev, S. (2019). Operability assessment of drive shafts of John Deere tractors in operational parameters. *Engineering for rural development* 18: 28–33.
5. Gurcanli, E., Bilir, S., & Sevim, M. (2015). Activity based risk assessment and safety cost estimation for residential building construction projects. *Safety Science* 80: 1–12.
6. Gyansah, L., & Ansah, A. (2020). Fatigue crack initiation analysis in 1060 steel. *Research journal of applied sciences engineering and technology* 4(2): 319–325.
7. Hryniv, A., Rogovskii, I., Aulin, V., Lysenko, S., Titova, L., Zagurskiy, O., & Kolosok, I. (2020). Development of a system for determining the informativeness of the diagnosing parameters of the cylinder-piston group of the diesel engines in operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 3 (5(105)): 19–29. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206073>
8. Khamidullina, E.A., Timofeeva, S.S., & Smirnov, G.I. (2017). Accidents in coal mining from perspective of risk theory. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 262: 012210.
9. Kuzmich, I.M., Rogovskii, I.L., Titova, L.L., & Nadtochiy, O.V. (2021). Research of passage capacity of combine harvesters depending on agrobiological state of bread mass. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 677: 052002. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052002>
10. Kypris, O., Nlebedim, I., & Jiles, D. (2016). Measuring stress variation with depth using Barkhausen signal. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials – Science Direct* 407: 377–395.
11. Nadtochiy, O. & Titova, L. (2018). Simulation of agricultural processes. *TEKA* 18(2): 39–49.
12. Najafi, P., Asoodar, M., Marzban, A., & Hormozi, M. (2015). Reliability analysis of agricultural machinery: A case study of sugarcane chopper harvester. *AgricEngInt: CIGR Journal* March 17(1)1: 158–165.
13. Nazarenko, I., Dedov, O., Beryuk, I., Rogovskii, I., Bondarenko, A., Zapryvoda, A., & Titova, L. (2020). Study of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 6 (7(108)): 71–79. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217747>
14. Nazarenko, I., Mishchuk, Y., Mishchuk, D., Ruchynskiy, M., Rogovskii, I., Mikhailova, L., Titova, L., Berezoviy, M., & Shatrov, R. (2021). Determination of energy characteristics of material destruction in the crushing chamber of the vibration crusher. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 4(7(112)): 41–49. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239292>
15. Nykyforchyn, H., Lunarska, E., & Tsyryllyuk, O. (2019). Environmentally assisted “in-bulk” steel degradation of long term service gas trunkline. *Engineering Failure Analysis* 17: 624–632.
16. Pisarenko, G., Voinalovych, O., Rogovskii, I., & Motrich, M. (2019). Probability of boundary exhaustion of resources as factor of operational safety for agricultural aggregates. *Engineering for rural development* 18: 291–298.

17. Rejovitzky, E., & Altus, E. (2013). On single damage variable models for fatigue. *International Journal of Damage Mechanics* 22(2) 2: 268–284.
18. Rogovskii, I. 2020. Algorithmically determine the frequency of recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research* 11(1): 155–162.
19. Rogovskii, I., Titova, L., Novitskii, A., & Rebenko, V. (2019). Research of vibroacoustic diagnostics of fuel system of engines of combine harvesters. *Engineering for rural development* 18: 291–298.
20. Rogovskii, I.L., Titova, L.L., Voinash, S.A., Troyanovskaya, I.P., & Sokolova, V.A. (2021). Change of technical condition and productivity of grain harvesters depending on term of operation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 720: 012110. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/720/1/012110>
21. Rogovskii, I.L., Titova, L.L., Gumenyuk Yu.O., & Nadtochiy O.V. (2021). Technological effectiveness of formation of planting furrow by working body of passive type of orchard planting machine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 839: 052055. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/5/052055>.
22. Sánchez-Hermosilla, J., Rincón, V., & Páez, F. (2011). Field evaluation of a self-propelled sprayer and effects of the application rate on spray deposition and losses to the ground. *Pest Management Science* 67(8): 942–947.
23. Shih-Heng, T., Ming-Hsiang, S., & Wen-Pei, S. (2018). Development of digital image correlation method to analyse crack variations of masonry wall. *Sadhana* 6: 767–779.
24. Tyutrin, S. (2019). Improving reliability of parts of mounted mower according to monitoring results by fatigue gauges from tin foil. *Engineering for rural development* 18: 22–27.
25. Voinalovych, O., Hnatiuk, O., Rogovskii, I., & Pokutnii, O. (2019). Probability of traumatic situations in mechanized processes in agriculture using mathematical apparatus of Markov chain method. *Engineering for rural development* 18: 563–569.
26. Xi, L., & Songlin, Z. (2019). Changes in mechanical properties of vehicle components after strengthening under low-amplitude loads below the fatigue limit. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 32(10): 847–855.
27. Yezekyan, T., Marinello, F., Armentano, G., Trestini, S. & Sartori, L. (2020). Modelling of harvesting machines' technical parameters and prices. *Agriculture* 10(6): 194–204.
28. Zou, F., Kang, J., Xiao, M., & Ji, G. (2017). Hydrostatic driving system for self-propelled sprayer. *Engineering Journal* 26(3): 12–18.
29. Zubko, V., Sirenko, V., Kuzina, T., Koszel, M., & Shchur, T. (2022). Modelling wheat grain flow during sowing based on the model of grain with shifted center of gravity. *Agricultural Engineering* this link is disabled 26(1): 25–37.

**Titova L. L.**, Candidate of Technical Sciences, Assistant of Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**Nadtochiy O. V.**, Candidate of Technical Sciences, Assistant of Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**Engineering management of influence of performance indicators of reliability and maintainability of grain harvester on efficiency of its machine user**

*The article formulates methodological approaches of engineering management to maintain the efficiency of combine harvesters, for which during the entire period of operation it is associated with the complexity of their structure through the use of automated and hydraulic devices, electronics, increased productivity emphasizes the importance of combine failure for technical reasons. In the current development of mechanization of agricultural production, in the author's opinion, should be based on two equally important points, namely the growth of production of the agro-industrial complex and the rational reduction of its cost. Completion of the combine fleet of farms with domestic or foreign machines should be carried out taking into account these factors, as well as other requirements of today.*

*The authors have developed a method for evaluating the efficiency of combine harvesters on two criteria of reliability, namely indicators of reliability and maintainability, on the specific total cost per hectare of the area harvested of grain crops. The process of machine use of the combine is considered in the form of a queuing system, where the device is considered to be the harvesting machine, from which comes the flow of failures that cause the equipment to stand still. The article obtains comparative dependences of specific total costs on these reliability indicators, which are characterized by failure time, recovery time and other indicators that affect their efficiency: the book value of the combine, service life, cost of sales, crop yields and harvest duration on the example of grain combine Class Mega-370. The dependence is obtained, which shows that the harvest will last 14 days with the help of 24 combine harvesters with downtime not exceeding 1.24 hours, or 25 combine harvesters with downtime of 1.9 hours.*

*The obtained results, as a prospect of further research, can be used by agricultural farms in completing the combine fleet of both domestic and imported models of combine harvesters.*

**Key words:** reliability, maintainability, productivity, time between failures, reliability, crop losses, criteria.

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАСІННЄВИХ СУМІШЕЙ ПРИ ЇХ ПОДІЛІ НА ВІБРОВІДЦЕНТРОВИХ РЕШЕТНИХ СЕПАРАТОРАХ

**Харченко Сергій Олександрович**

доктор технічних наук, доцент  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0000-0002-4883-2565,  
kharchenko\_mtf@ukr.net

**Харченко Фаріда Магомедівна**

кандидат технічних наук, доцент  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0000-0002-0815-4691  
faridakharchenko@gmail.com

**Панкова Оксана Володимирівна**

кандидат сільськогосподарських наук, доцент  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна  
ORCID: 0000-0003-2866-1858  
pankova\_oksana@ukr.net

**Бакум Микола Васильович**

кандидат технічних наук, професор  
Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна  
ORCID: 0000-0003-1049-0464  
bakymshm@gmail.com

**Харченко Дмитро Олександрович**

аспірант  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0000-0001-5819-6104  
harchenkodmitriy@ukr.net

*Моделювання динаміки частинок сипких середовищ, якими є насіннєві матеріали, потребують використання максимально точних значень їх властивостей. Властивості насіннєвих сумішей, які є гетерогенним середовищем, залежать від культури, вологості та інших чинників. Процес поділу насіннєвого матеріалу за розмірами на віброрешетах залежить від форми, розмірів, питомої ваги частинок. Узагальненим параметром, який характеризує сипке середовище є в'язкість. При використанні в моделюванні процесів гідродинамічної аналогії псевдозрідженого насіннєвого матеріалу на вібровідцентровому решеті доцільно використовувати саме динамічний коефіцієнт в'язкості. Проведені розрахунки щодо визначення динамічного коефіцієнту в'язкості для насіннєвих матеріалів, які відрізняються формою, розмірами, коефіцієнтами тертя та питомою вагою частинок. Для розрахунків прийнято паспортні конструктивно-кінематичні параметри вібровідцентрових сепараторів типу А1-БЦС. Прийнято умови, що насіннєвий матеріал рухається по внутрішній поверхні циліндричного решета кільцевим шаром товщини, яка залежить від еквівалентних діаметрів частинок насіннєвих матеріалів різних сільськогосподарських культур. Швидкість руху насіннєвого матеріалу направлена уздовж осі вертикальної осі і залежить від радіальної координати. Циліндричне решето обертається навколо вертикальної вісі і виконує вертикальні коливання уздовж неї з амплітудою. Встановлено перелік властивостей насіннєвого матеріалу, які є значущими при обґрунтуванні параметрів процесу поділу частинок на циліндричних віброрешетах відцентрових зернових сепараторів: еквівалентний діаметр та вага частинки; коефіцієнт внутрішнього сухого тертя насіння; коефіцієнт поправки на пористість середовища; густина шару середовища; динамічний коефіцієнт тертя частинок по поверхні решета; висота (товщина) шару середовища. Проведені експериментальні дослідження, які підтвердили математичні розрахунки. Розбіжність ідентифікованих за стандартними та розробленими методиками та відомих показників властивостей: насіння озимої пшениці, кукурудзи, соняшнику, насіння ріпаку не перевищує 5%. Встановлена суттєва відмінність вібров'язкості насіннєвих матеріалів сільськогосподарських культур озимої пшениці, соняшнику, кукурудзи та ріпаку, що пояснюється властивостями частинок. Отримані данні є основою для адекватного моделювання процесів решетного поділу частинок насіннєвих матеріалів насіннєочисних машин та сепараторів.*

**Ключові слова:** насіннєвий матеріал, властивості, частинка, розміри, в'язкість, решето, динаміка.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.12>

**Вступ.** Насіння сільськогосподарських культур є одним з основних факторів, які визначають майбутню врожайність та валову кількість зерна.

Післязбиральна обробка зерна є відповідальним та важливим елементом в технологіях виробництва насіннєвого матеріалу більшості сільськогосподарських культур. Поділ частинок за розмірами та аеродинамічними властивостями знайшли найбільше поширення, що пояснюється високими технологічними показниками та низькими енерго- та металовитратами. Реалізуються наведені принципи поділу на віброрешетних блоках та пневмосепарувальних пристроях.

Використання математичного моделювання значно скорочує процес проектування та розробки нового обладнання, але потребує точних вхідних параметрів. Так, моделювання динаміки частинки зернової суміші за використанням матеріальної точки (Isaev et al., 2019; Vineet Kumar Bhagat et al., 2019), потребує окрім технологічних параметрів процесу та технічних параметрів конструкції, ще й властивості самої частинки.

Моделювання динаміки сипкого псевдозрідженого середовища за гідроаналогією наведені в роботах (Kharchenko, 2017; Tishchenko et al., 2011), довели свою адекватність. Однак отримані результати передбачали властивості окремих с.г. культур. В роботі (Badretdinov et al., 2020) розглянуті зернові суміші озимої пшениці, в (Shevchenko et al., 2019) соняшник.

Ідентифікація, одночасний аналіз властивостей насіннєвих матеріалів різних с.г. культур надасть можливість визначати напрями можливих підвищень ефективності насіннеочисних машин, сепараторів та калібраторів.

В роботі розглянуто вібровібцентрові решети сепаратори, які мають високу питому продуктивність роботи. Але на сьогодні є потреба в визначенні оптимальних режимів роботи для насіннєвих матеріалів різних с.г. культур.

**Мета роботи:** провести математичну та експериментальну ідентифікацію властивостей насіннєвих сумішей, встановити відповідні залежності з урахуванням кон-

структивно-кінематичних параметрів вібровібцентрових решет насіннеочисних машин.

**Матеріали і методи досліджень.** Моделювання руху насіннєвого матеріалу по внутрішній поверхні вертикального циліндричного віброрешета за допомогою гідродинамічної аналогії потребує розгляду однорідної псевдорідини, яка має певну в'язкість. Слід зауважити, що подібна аналогія довела свою адекватність внаслідок подібності псевдозрідженого сипкого насіннєвого матеріалу з властивостями рідини (Тіщенко, 2010; Тіщенко, 2000).

Коефіцієнт вібров'язкості псевдозрідженого насіннєвого матеріалу, під дією вібрації, є змінним та залежить від відцентрової сили.

Для вивчення величини коефіцієнта вібров'язкості необхідно мати розуміння координату розгляду всередині шару середовища. Тому для подальших досліджень приймаємо координату  $r$  (рис.1) кільцевого шару від осі обертання циліндричного решета радіуса  $R_R$ .

Таким чином, подібне використання конструктивно-кінематичних параметрів циліндричного віброрешета та властивостей насіннєвих матеріалів різних с.г. культур дозволить комплексно оцінити вплив на їх подальшу динаміку.

Приймаємо, що насіннєвий матеріал рухається по внутрішній поверхні решета з радіусом  $R_R$  кільцевим шаром товщини  $h$  (рис.1). швидкість руху насіннєвого матеріалу  $U(R)$  направлена уздовж осі  $z$  і залежить від радіальної координати  $R$ . Циліндричне решето обертається навколо осі  $z$  з кутовою швидкістю  $\omega$  і виконує вертикальні коливання уздовж неї з амплітудою  $A$  і частотою  $n$  (рис. 1).

За умови постійного динамічного коефіцієнту в'язкості швидкість псевдозрідженого середовища є рішенням рівняння (Тіщенко та ін., 2007; Тіщенко та ін., 2008):

$$\frac{d^2U}{dR^2} + \frac{1}{R} \frac{dU}{dR} = N, \quad (1)$$

в якому

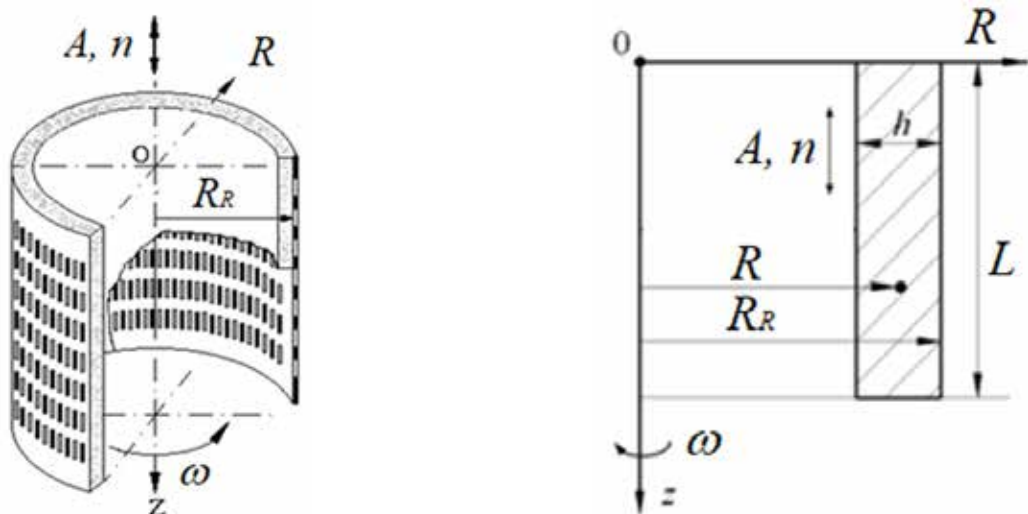


Рис.1. Схеми циліндричного віброрешета

$$N = -\frac{1}{\mu} \left( \frac{\Delta P}{l} + \rho g \right), \quad (2)$$

де  $\Delta P/l$  зміна тиску відносно висоти шару псевдозріженого середовища насінневого матеріалу;  $\rho$  – густина шару насінневого матеріалу.

Динамічний коефіцієнт в'язкості шару насінневого матеріалу визначаємо за виразом (Тіщенко та ін., 2010; Ольшанський та ін., 2017):

$$\mu = \frac{F_T}{6nd \sqrt{(A)^2 - \left( \frac{\pi F_T}{2m\gamma n^2} \right)^2}}, \quad (3)$$

де  $F_T = \frac{f \pi^2 d^2 p \xi}{4}$  – сила тертя, які діє на частинку при

коливаннях середовища, яке представляє насінневий матеріал;  $d, m$  – усереднені значення діаметра і ваги однієї частинки насінневого матеріалу;  $\gamma$  – коефіцієнт приєднання маси до рухомої частинки насінневого матеріалу;

$p = \frac{1}{2} \rho \omega^2 \left( \left( R_R - \frac{h}{2} \right)^2 - (R_R - h)^2 \right)$  – внутрішній тиск

в середовищі, яке досліджується;  $f$  – коефіцієнт внутрішнього сухого тертя насіння;  $\xi$  – коефіцієнт поправки на пористість насінневого матеріалу.

Таким чином, наявні математичні вирази (1)-(3) дозволяють визначити властивості, які впливають на динамічний коефіцієнт в'язкості насінневого матеріалу, і в кінцевому результаті на його динамічні характеристики. Наведемо перелік подібних властивостей насінневого матеріалу: еквівалентний діаметр та вага частинки; коефіцієнт внутрішнього сухого тертя насіння; коефіцієнт поправки на пористість середовища; густина шару середовища; динамічний коефіцієнт тертя частинок по поверхні решета; висота (товщина) шару середовища.

Відсутність єдиних значень, наявність решіт з інтенсифікаторами та активаторами різних типів (Kharchenko et al., 2019) вимагає проведення додаткових експериментальних досліджень та ідентифікації.

Для досліджень використано насіння різних сільськогосподарських культур, які відрізняються вище переліченими властивостями. До подібних культур відносимо кукурудзу, соняшник, пшеницю та ріпак.

Розміри та форма насіння одним зі значущих параметрів при дослідженні та проектуванні робочих органів машин для поділу частинок сипких матеріалів. Лінійні розміри абсолютними показниками, а для отримання адекватних результатів бажано мати відносні. Тому для досліджень обрано еквівалентний діаметр – діаметр кулі, який рівновеликий за об'ємом частинці насінневого матеріалу.

Визначення ваги частинки насінневих матеріалів виконували на вагах ВЛКТ-500. Зважування проводили трикратно по 1000 насінин та визначали вагу однієї насінини.

Для визначення щільності шару середовища використовували мірну ємність з фіксованим об'ємом та виконували її зважування.

Слід відмітити що вологість насінневого матеріалу впливає на більшість інших фізико-механічних показників. Тому при дослідженнях обирали фіксовану вологість для с.г. культури відповідно до ДСТУ 2240-93, ДСТУ 6068-2008, ДСТУ 4811-2007: озима пшениця – 13%; кукурудза 14%; соняшник 6%; ріпак – 7%.

Оцінити шару насінневого матеріалу, а не окрему частинку, можна використавши пористість середовища. Пористість визначається як доля вільного об'єму в шарі насінневого матеріалу. Для обчислень використаємо відношення щільності насінини  $\rho_n$  до густини середовища (шару насінневого матеріалу):

$$\xi = \rho_n / \rho. \quad (4)$$

Технологічний процес роботи насінноочисних та калібрувальних машин передбачає рух насіння по металевим поверхням. Причому насінневий матеріал рухається в шарі, що передбачає тертя частинок одна по одній, а нижній підшар тертя по металеву поверхню.

Обираємо для досліджень коефіцієнт внутрішнього тертя, який враховує тертя між поверхнями однорідних тіл та характеризує рухомість сипкого середовища. Методика визначення є стандартною та складається з визначення кута природнього скоосу, де утворюється вільна поверхня сипкого матеріалу з горизонтальною площиною (Molenda et al., 2002).

Коефіцієнт зовнішнього тертя характеризує тертя, яке виникає між поверхнями неоднорідних матеріалів і залежить від їх поверхні. Використавши нахилену перфоровану поверхню (решето) визначали кут, при якому відбувався рух насіння ( Gan Tang et al., 2017).

Максимальна висота шару насінневого матеріалу, яку необхідно використовувати в математичних моделях, складає два підшари висотою з еквівалентний діаметр.

Кількість повторів дослідів при проведенні досліджень склала три, що свідчить про достатню та необхідну точність.

Отримані данні усереднювали за середнім арифметичним.

**Результати досліджень.** Для повної перевірки адекватності отриманих математичних виразів проведена ідентифікація властивостей насінневих матеріалів пшениці, кукурудзи, соняшника, ріпаку.

Використавши стандартні та розроблені методики визначені властивості насінневих матеріалів.

Визначення ефективного динамічного коефіцієнту в'язкості середовища проводили по виразу (3). Для розрахунків прийнято паспортні конструктивно-кінематичні параметри вібровідцентрових сепараторів типу А1-БЦС (Абдуєва, 2010): радіус решета  $R_r = 0,3075$  м; довжина решета  $L = 0,49$ м; кутова швидкість обертання решета  $\omega = 11,5$  рад/с; частота вертикальних коливань  $n = 75,9$  с<sup>-1</sup>; амплітуда вертикальних коливань  $A = 0,006$  м.

Результати ідентифікацій властивостей насінневих матеріалів зведено до табл.1.

**Обговорення.** Більша частина отриманих результатів узгоджується з даними відомих досліджень. Так, розбіжність ідентифікованих та відомих показників

## Фізико-механічні властивості насіннєвих сумішей матеріалів сільськогосподарських культур

Культура	озима пшениця	кукурудза	соняшник	ріпак
Еквівалентний діаметр частинок насіннєвого матеріалу $f$ , м	0,0048	0,0071	0,0053	0,0019
Вага частинки насіннєвого матеріалу $m$ , кг	0,00005	0,00029	0,00011	0,0000047
Коефіцієнт внутрішнього сухого тертя насіння $f$	0,52	0,5	0,57	0,42
Коефіцієнт поправки на пористість насіннєвого матеріалу $\xi$	0,36	0,5	0,415	0,38
Густина насіннєвого матеріалу $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	740	730	360	610
Динамічний коефіцієнт тертя частинок насіннєвого матеріалу по поверхні решета $f_d$	0,22	0,25	0,32	0,35
Сила тертя, які діє на частинку при коливаннях середовища $F_T$ , Н	0,0015	0,0063	0,00124	0,00006
Ефективний динамічний коефіцієнт вібров'язкості середовища $\mu$ , Па с	0,156557	0,3755	0,088523	0,011

властивостей: насіння кукурудзи (Babic et al., 2013), насіння пшениці (Badretdinov et al., 2020; Fératlégil-Durtmur et al., 2010), насіння соняшнику (Shevchenko et al., 2019), насіння ріпаку (Mehmet Firat Baran et al., 2016) не перевищує 5%. Це свідчить про достатню достовірність обраних методів досліджень та адекватне використання ідентифікованих значень при процесах моделювання руху насіннєвих сумішей по перефорованих віброрешетах насінноочисних машин, сепараторів та калібраторів.

Аналіз отриманих значень узагальненої характеристики середовища (насіннєвого матеріалу) вібров'язкості свідчить про суттєву відмінність в залежності від культури та властивостей частинок. Так, максимальна різ-

ниця результатів в рамках культур насіннєвих матеріалів які досліджувались, склала 34,1 рази.

Таким чином, очевидно, що врахування властивостей насіннєвих матеріалів при математичному моделюванні їх динаміки є обов'язковим, що забезпечить адекватність результатів.

**Висновки.** Проведенні дослідження дозволили ідентифікувати властивості насіннєвих матеріалів, які є значущими та впливають на їх динаміку при поділу на циліндричних віброрешетах калібраторів. Отримані данні дозволяють підвищити точність математичного моделювання процесів поділу частинок насіннєвих матеріалів за розмірами в насінноочисних машинах, сепараторах та калібраторах.

**Бібліографічні посилання:**

1. Isaev, Y., Semashkin N., Zlobin V. (2019). Regularities of motion of a particle in the spiral-screwed device. E3S Web of Conferences, 00041.
2. Vineet Kumar Bhagat, Anil Kumar Prasad, Arvind Kumar Lal Srivastava. (2019). Physical and Mechanical Performance of Luffa-Coir Fiber Reinforced Epoxy Resin Based. 5 E3S Web of Conferences 126, 00041. doi.org/10.1051/e3sconf/201912600041 ICMTMTE 2019.
3. Kharchenko, S.O. (2017). Intensification of grain sifting on flat sieves of vibration grain separators. Kharkiv: «Disa+», 220.
4. Tishchenko, L.N., Ol'shanskii, V.P., Ol'shanskii, S.V. (2011). On velocity profiles of an inhomogeneous vibrofluidized grain bed on a shaker. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 84, Issue 3, 509 – 514. doi: 10.1007/s10891-011-0498-4
5. Badretdinov, I., Mudarisov, S., Lukmanov, R., Ibragimov, R., Permyakov, V., Tuktarov, M. (2020). Mathematical modeling and study of the grain cleaning machine sieve frame operation. INMATEH Agricultural Engineering. 19–28. 10.35633/inmateh-60-02.
6. Shevchenko, I.; Aliev, E. (2019). Study of the process of calibration of confectionery sunflower seeds. Food Science and Technology. 12. 10.15673/fst.v12i4.1209.
7. Tischenko, L.N. (2004). Intensifikaciya separirovaniya zerna [Intensification of grain separation]. Kharkiv : Osnova, 224 (in Russian).
8. Tischenko, L.N. (2000). K opredeleniyu gidrodinamicheskikh harakteristik psevdoozhizhennyh sypuchih sred pri rabote vibrocentrobezhnyh separatorov [To determine the hydrodynamic characteristics of fluidized bulk solids during the operation of vibrating centrifugal separators]. Ecology and agricultural machinery. Collection of works by SZNIIMESH. SPb. Pavlovsk: SZNIIMESH, T. 1, 70–73. (in Russian).
9. Tischenko, L.N., Abdueva F.M., Ol'shanskij, V.P. (2007). K raschetu vyazkosti psevdoozhizhennoj sypuchej zernovoj smesi pri vibrocentrobezhnom separirovanii [To calculation of viscosity of fluidized bulk grain mixture at vibrating centrifugal separation]. Modern directions of technology and mechanization of processes of processing and food production. Kharkiv: KhNTUA, Vol. 58, 44–51. (in Russian).
10. Tischenko, L.N., Abdueva F.M., Ol'shanskij, V.P. (2008). Sravnenie dvuh sposobov vychisleniya koefficienta vibro-vyazkosti psevdoozhizhennoj zernovoj smesi pri vibrocentrobezhnom separirovanii [Comparison of two methods of calculating the vibration-viscosity coefficient of fluidized grain mixture at vibration centrifugal separation]. Vibrations in Engineering and Technology, №1 (50), 96–100. (in Russian).
11. Tischenko, L.N., Ol'shanskij, V.P., Ol'shanskij, S.V. (2010). Gidrodinamika separirovaniya zerna [Hydrodynamics of grain separation]. Kharkiv: Miskdruk, 174. (in Russian).

12. Ol'shans'ki, V.P., Bredihin, V.V., Luk'yanenko, V. M., Piven, M.V., Slipchenko, M.V, Kharchenko, S. O. (2017). Teoriia separuvannia zerna: kolektyvna monohrafiia [Theory of grain separation: a collective monograph]. Kharkiv: Planeta-Print, 802. (in Ukrainian).
13. Kharchenko, S., Kovalishin, S., Zavgorodniy, A., Kharchenko, F., Mikhaylov, Y. (2019). Effective sifting of flat seeds through sieve. INMATEH-Agricultural Engineering, Vol. 58. №. 2, 17-26. doi: 10.35633/INMATEH-58-02.
14. DSTU 2240-93. (1993). Nasinnia silskohospodarskykh kultur. Sortovi ta posivni yakosti. Tekhnichni umovy [Seeds of agricultural crops. Varietal and sowing qualities. Technical conditions]. Kyiv: State Standard of Ukraine, 74. (in Ukrainian).
15. DSTU 6068-2008. (2008). Nasinnia soniashnyku. Sortovi ta posivni yakosti. Tekhnichni umovy [Sunflower seeds. Varietal and sowing qualities. Technical conditions]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 7. (in Ukrainian).
16. DSTU 4811-2007 (2009). Nasinnia oliinykh kultur. Metody vyznachennia volohosti [Oilseeds. Methods for determination of moisture content]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 10. (in Ukrainian).
17. Molenda, M., Horabik, J., Ross, I., Montross, M. (2002). Friction of wheat: Grain-on-grain and on corrugated steel. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. 45. 415-420. doi: 10.13031/2013.8522.
18. Gan Tang, Ping Sun, Yanqi Zhao, Lingfeng Yin and Hong Zhuang (2017). Experimental research on friction coefficient between grain bulk and bamboo clappers. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 274 012116. doi: 10.1088/1757-899X/274/1/012116.
19. Abduieva, F. M. (2010). Obruntuvannia parametriv protsesu i rozrobka reshit dlia vibrovidtsentrovoho separuvannia nasinnia kukurudzhy [Substantiation of process parameters and development of sieves for vibrating centrifugal separation of corn seeds]. Avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.05.11. Kharkiv, 20. (in Ukrainian).
20. Babic, L., Radojcin, M. (2013). Physical properties and compression and compression loading behaviour of corn seed. International Agrophysics, №27, 119–126.
21. Fératlégil-Durmup, E., Sýkorová, A., Šárka, E., Bubník, Z., Schejbal M., Příhoda, J. ( 2010). Geometric Parameters of Wheat Grain Determined by Image Analysis and FEM Approach. Cereal Research Communications, 38(1), 122–133. doi: 10.1556/CRC.38.2010.1.13.
22. Firat Baran, M., Recai Durgut, M., Aktas, T., Ulger, P., Kayisoglu, B. (2016). Determination of Some Physical Properties of Rapeseed. International journal of engineering technologies, Vol.2, №. 2, 49–55.

**Kharchenko S. O.**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

**Kharchenko F. M.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

**Pankova O. V.**, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

**Bakum M. V.**, Candidate of Technical Sciences, Professor, State Biotechnology University, Kharkiv, Ukraine

**Kharchenko D. O.**, Postgraduate, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

**Properties identification of seed mixtures at their division into vibro-centrifugal sieve separators**

*Modeling the dynamics of loose media particles, which are seed materials, requires the use of the most accurate values of their properties. Seed mixtures properties, which are a heterogeneous environment, depend on the culture, humidity and other factors. Division process of seed material by size on vibrating sieves depends on the shape, size and specific gravity of particles. Viscosity is a generalized parameter that characterizes a loose medium. When using the hydrodynamic analogy of fluidized seed material in modeling processes on a vibro-centrifugal sieve, it is advisable to use the dynamic viscosity coefficient. Calculations were carried out to determine the dynamic viscosity coefficient for seed materials that differ in shape, size, friction coefficients and specific gravity of particles. The passport design and kinematic parameters of the A1-BCS type vibro-centrifugal separators were used for the calculations. It is accepted that seed material moves along the inner surface of cylindrical sieve with an annular layer of thickness, which depends on the equivalent diameters of seed materials particles of different crops. The speed of seed material movement is directed along the axis of the vertical axis and depends on the radial coordinate. The cylindrical sieve rotates around the vertical axis and performs vertical oscillations along it with amplitude. The properties list of seed material, which are significant in the grounding parameters of particle separation process on cylindrical vibrating sieves of centrifugal grain separators has been established: particle equivalent diameter and weight; coefficient of internal dry friction of seed; correction factor for porosity of the medium; density of the medium layer; dynamic coefficient of particles friction on the sieve surface; height (thickness) of the medium layer. Mathematical calculations confirmed the experimental studies. The discrepancy between the identified and known indicators of properties according to standard and developed methods: seeds of winter wheat, corn, sunflower, rapeseed does not exceed 5%. A significant difference in the vibroviscosity of agricultural crops seed materials of winter wheat, sunflower, corn and rapeseed was found, which is explained by the particles properties. The obtained data are the basis for adequate modeling of sieve separation processes of seed material particles of seed cleaning machines and separators.*

**Key words:** seed material, properties, particle, size, viscosity, sieve, dynamics.

## ІНЖЕНЕРНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ АЛГОРИТМІЧНОСТІ ФОРМУВАННЯ КОМБАЙНОВОГО ЗБИРАННЯ ЗЕРНОВОГО ЗБІЖЖЯ

**Шатров Руслан Русланович**

аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0001-7469-8657

10bshatrovruslam@gmail.com

**Роговський Іван Леонідович**

доктор технічних наук, професор

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0002-6957-1616

rogovskii@nubip.edu.ua

*В статті сформульовані методичні підходи інженерного менеджменту щодо алгоритмічності формування комбайнового збирання зернового збіжжя. Для розрахунку структури парку комбайнів конкретних господарств, а не всього регіону нами було запропоновано такі методичні положення: оцінювалася загальна ефективність комбайнового парку загалом за збиральний сезон, а чи не оскільки раніше було прийнято оцінювати роботу одного комбайна, та був узагальнювали його оцінку весь парк комбайнів. Для великотоварного виробництва зерна з високим темпом збиральних робіт це неприйнятно, оскільки у збиранні можуть брати участь комбайни різного класу, з різним річним завантаженням та узагальнення роботи одного комбайна на весь парк дає помилковий результат; враховували не загальну динаміку втрат зерна від самоосипання, а конкретно щодо кожного сорту зернових з урахуванням динаміки врожайності зерна на залишковій площі після кожного дня збирання; валовий збір зерна в господарстві оцінювали не за середньою врожайністю наприкінці збирання, а як сукупність приватних валових зборів зерна за кожний календарний день збирання протягом усього збирального періоду, який залежить від темпів збирання та щодобових втрат зерна; введено нове поняття – коефіцієнт корисної дії комбайнового парку, причому двох типів.*

*Авторами розроблена модель формування загального валового збору зерна в аналітичному вигляді прийнято такі припущення та обмеження: продуктивність комбайна визначалася з урахуванням коефіцієнта використання експлуатаційного часу роботи комбайна протягом доби, тобто з урахуванням простоїв з технологічних, організаційних та технічних причин, що відповідає реальній ситуації; динаміка зниження врожайності зерна від самоосипання прийнята для кожної культури та сорту індивідуально за даними експериментальних досліджень; залишкова врожайність визначається після кожної доби роботи комбайнів на залишковій збиральній площі; темп самоосипання зерна у перший та останній день збирання (температура втрат) приймається виходячи із співвідношення часу роботи комбайнів у цей день та тривалості роботи протягом доби; механічні втрати зерна комбайнами приймаються нормативними, тобто не більше ніж 2% від обмолоченого зерна або за контрольними обмолотами; час роботи комбайнів протягом доби протягом усього терміну збирання прийнято однаковим (можливий виняток для останнього дня збирання).*

*Отримані результати, як перспектива подальших досліджень, можуть бути використані аграрними господарствами при комплектуванні комбайнового машинного парку як вітчизняними так і імпортованими моделями зернозбиральних комбайнів.*

**Ключові слова:** алгоритмічність, урожайність, комбайн, втрати урожаю, критерії.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.13>

**Постановка проблеми.** Сучасне забезпечення господарств України зернозбиральною технікою характеризується використанням багатомарочного типорозмірного ряду зернозбиральних комбайнів вітчизняного та зарубіжного виробництва (Pisarenko et al., 2019). Причому темп закупівлі зарубіжних зернозбиральних комбайнів щорічно зростає та сягає вже 1201 одиницю (Rogovskii et al., 2019). На Україну надходять зернозбиральні комбайни різними каналами з багатьох західних фірм: «Claas» і «Fendt» (Німеччина), «John Deere» та «Massey Ferguson» (США), «Laverda» (Італія), «Sampo-Rozenlev» (Фінляндія), «Vestern» (Канада), найбільші з яких це «John Deere» і «Claas». З вітчизняних підприємств комбайни серійно випускають ТОВ «Херсонські комбайни» (Nazarenko et al., 2021).

При сучасному річному виробництві вітчизняних зернозбиральних комбайнів загальний парк України поповнюється щорічно на 80 одиниць (тобто оновлюється на 3%) (Kuzmich et al., 2021). Але навіть за такого невеликого оновлення парку зернозбиральних комбайнів через їхню розумофікацію (Wang et al., 2018), несумірність за продуктивністю та загальним технічним рівнем виникають великі труднощі з технічним обслуговуванням (Najafi et al., 2015), ремонтом, статистичною звітністю, плануванням розвитку парку зернозбиральних комбайнів за окремими моделями (Lopes et al., 2002). Важко дати об'єктивну оцінку достатності реального забезпечення господарств зернозбиральними комбайнами на одиницю площі збирання, а також прогнозувати розвиток парку



та вибрати найкращі з альтернативних (Fu et al., 2020). Це можна зробити, якщо вдається уніфікувати критерій оцінки зернозбиральних комбайнів, наприклад, ввівши поняття нормативний зернозбиральний комбайн (Voinalovych et al., 2019).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Оптимізації структури комбайнового парку в залежності від умов прибирання та сукупності різних виробничих факторів присвятили свої роботи багато дослідників (Nadtochiy & Titova, 2018). Ними розроблено досить велику кількість різних математичних моделей та комп'ютерних програм для розрахунку загальної кількості комбайнів для конкретних умов збирання (урожайності, самоосипаності, термінів збирання тощо) (Charlyugin & Zhalnin, 2020). У деяких моделях враховувалася навіть загальна динаміка втрат зерна (Rogovskii, 2020).

Однак стосовно великотоварного виробництва зерна вони вимагають коригування, що спричинено особливостями інтенсивної роботи комбайнового парку в таких господарствах (Yezequan et al., 2020). Тому для розрахунку структури парку комбайнів конкретних господарств, а не всього регіону нами було запропоновано такі методичні положення:

– оцінювалася загальна ефективність комбайнового парку загалом за збиральний сезон, а чи не оскільки раніше було прийнято оцінювати роботу одного комбайна, та був узагальнювали його оцінку весь парк комбайнів. Для великотоварного виробництва зерна з високим темпом збиральних робіт це неприйнятно, оскільки у збиранні можуть брати участь комбайни різного класу, з різним річним завантаженням та узагальнення роботи одного комбайна на весь парк дає помилковий результат (Nazarenko et al., 2020);

– враховували не загальну динаміку втрат зерна від самоосипання, а конкретно щодо кожного сорту зернових з урахуванням динаміки врожайності зерна на залишковій площі після кожного дня збирання (Rogovskii et al., 2021b);

– валовий збір зерна в господарстві оцінювали не за середньою врожайністю наприкінці збирання, а як сукупність приватних валових зборів зерна за кожний календарний день збирання протягом усього збирального періоду, який залежить від темпів збирання та щодобових втрат зерна (Dong et al., 2017);

– введено нове поняття – коефіцієнт корисної дії комбайнового парку, причому двох типів (Rogovskii et al., 2021a).

Натуральний коефіцієнт корисної дії – виражається ставленням фактичного валового збору зерна  $W_{\phi}$ , зібраного парком за весь період збирання, до потенційного –  $W_o$ , розрахованого перед початком збирання у господарстві.

$$\eta_1 = \frac{W_{\phi}}{W_o} = \frac{\sum_I^{T_{зб}} S_i \cdot f \cdot y_0 \cdot T_{зб}}{S_0 \cdot y_0}, \quad (1)$$

де  $S_0$  – площа всього збирального масиву господарства під конкретною культурою та сортом;

$y_0$  – початкова врожайність зернових окремого виду та сорту (перед збиранням), т/га;

$f(y_0; T_{зб})$  – функція, що виражає динаміку втрат зерна від тривалості збирання на залишковій площі після кожного дня збирання  $S_i$ .

Формула (1) відображає реальну ситуацію в господарстві, коли в міру збирання зменшується збиральна площа, а врожайність визначається не на всій площі, а на залишковій після кожного дня збирання (Zubko et al., 2020).

З формули (1) випливає: чим більший середньодобовий темп збирання (га/добу); (т/добу), тим менший період збирання, тим вище намолот зерна та вищий ККД комбайнового парку (Hrynkiv et al., 2020).

Якщо комбайн працює на збиранні різних культур (кукурудзи, соняшника, трав на насіння), то відповідно  $W_{\phi} = \sum W_i$ , а коефіцієнт корисної дії розраховується як середньозважене з урахуванням частки  $W_i$  в  $W_{\phi}$ .

Альтернативні варіанти комбайнового парку з приблизно рівним коефіцієнт корисної дії –  $\eta_1$  запропоновано оцінити додатково техніко-економічними показниками (Ding et al., 2020).

Тому введено поняття – ефективний коефіцієнт корисної дії, який залежить від співвідношення собівартості зерна  $\Pi_{\text{соц}}$  (грн/т) та ринкової вартості зерна –  $\Pi_3$  (грн/т), та визначається з виразу:

$$\eta_2 = 1 - \frac{\Pi_{\text{соб}}}{\Pi_3}. \quad (2)$$

Звідси виникають завдання щодо визначення функціонального зв'язку між головними факторами формування валового збору зерна та продуктивності комбайнів, їх кількості у парку, динаміки втрат, виявлення кількох альтернативних комбайнових парків та дати їм техніко-економічну оцінку, розраховавши коефіцієнт корисної дії другого роду. Це дає можливість при будь-яких заданих значеннях  $S_0$  і  $y_0$  визначити оптимальну структуру комбайнового парку за кількістю комбайнів та їхньої продуктивності.

**Метою досліджень** є розробка методологічних положень інженерного менеджменту алгоритмічності формування комбайнового збирання зернового збіжжя при комплектуванні парку господарства різними вітчизняними і зарубіжними комбайнами.

**Результати досліджень.** Насправді загальний валовий збір зерна у господарстві за весь збиральний період зазвичай визначається сумарною кількістю зерна, привезеного з поля на зерноочисний струм. Можуть розрізняти збирання зерна до обробки або після обробки (комори збирання зерна). Середня врожайність зерна за сезон визначається простим розподілом загальної кількості зібраного зерна на загальну збиральну площу.

Однак це досить примітивний і до того ж пасивний спосіб, який лише констатує кінцевий результат збирання врожаю та не розкриває потенційно можливий валовий збір, величину втрат урожаю та їхню причину. Без цього неможливо цілеспрямовано керувати збиральним процесом і через короткочасність прибирання

своєчасно скоригувати технологічне та технічне забезпечення збиральних робіт.

У зв'язку з цим запропоновано більш оперативний метод прогнозування, розрахунку та управління валовим збором зерна за сезон на основі визначення добових темпів збирання, біологічних та механічних втрат зерна. Цей метод дозволяє виявити внутрішній механізм формування загального валового збору зерна як суму середньодобових зборів, які протягом періоду збору можуть бути різними залежно від темпів дозрівання культури, метеоумов, наявності та стану техніки, використання організаційно-технічних ресурсів тощо.

В реальних умовах роботи комбайнового парку господарства за будь-якого заданого об'єму роботи  $S_0$  (за

винятком посівів на 30...40 га) збирання триває кілька днів із поступовим зменшенням збирального масиву. В перший день збирання можна вважати, що врожайність зерна –  $y_0$  і загальний намот –  $W_0$  є максимальними. Якби вся площа була зібрана за один день (змін), то максимальна врожайність буде у перший день жнив. Наступного дня, внаслідок самоосипання стиглого зерна, врожайність зерна на площі, що залишилася, буде вже меншою.

Таким чином, денний (добовий) темп збирання, тобто кількість убраних гектарів за цей час, визначає тривалість всього збирального періоду, а інтенсивність самоосипання зерна – біологічні втрати та загальний валовий збір зерна.

На рис. 1 представлений алгоритм формування валового збору зерна певної культури та сорту. Головна

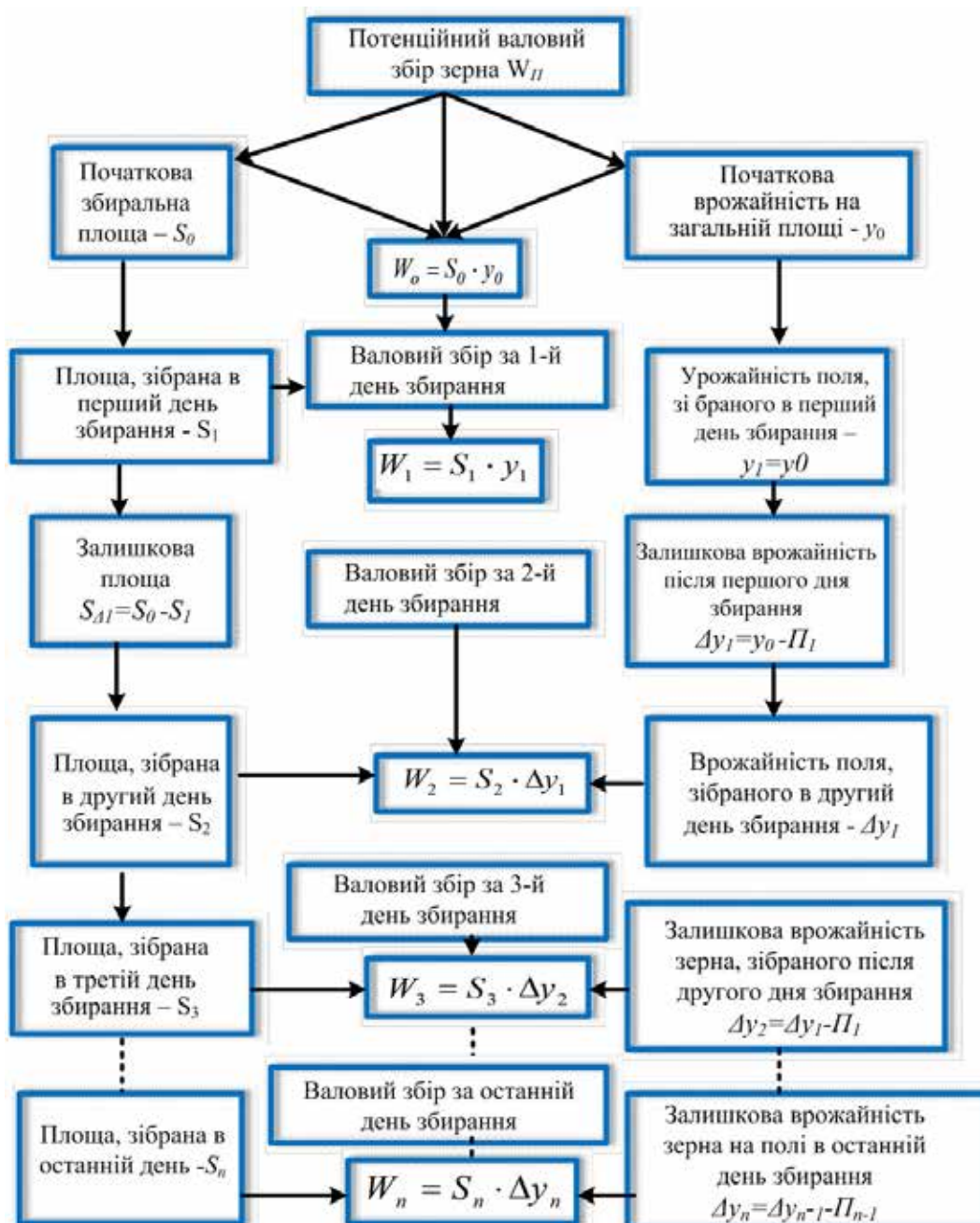


Рис. 1. Алгоритм формування валового збору зерна певної культури та сорту від першого до останнього дня збирання

закономірність – у міру збирання прибрана площа збільшується, а залишкова врожайність та валовий збір зерна зменшуються.

Звідси загальний валовий збір зерна становить суму валових зборів зерна за кожен день збирання з урахуванням біологічних та механічних втрат.

$$W_{\phi} = W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n. \quad (3)$$

Зіставляючи  $W_{\phi}$  і  $W_0$  можна розрахувати коефіцієнт корисної дії комбайнового парку  $\eta_{к.п.}$ .

При розробці моделі формування загального валового збору зерна в аналітичному вигляді прийнято такі припущення та обмеження:

- продуктивність комбайна визначалася з урахуванням коефіцієнта використання експлуатаційного часу роботи комбайна протягом доби, тобто з урахуванням простоїв з технологічних, організаційних та технічних причин, що відповідає реальній ситуації;

- динаміка зниження врожайності зерна від самоосипання прийнята для кожної культури та сорту індивідуально за даними експериментальних досліджень;

- залишкова врожайність визначається після кожної доби роботи комбайнів на залишковій збиральній площі;

- темп самоосипання зерна у перший та останній день збирання (температура втрат) приймається виходячи із співвідношення часу роботи комбайнів у цей день та тривалості роботи протягом доби;

- механічні втрати зерна комбайнами приймаються нормативними, тобто не більше ніж 2% від обмолоченого зерна або за контрольними обмолотами;

- час роботи комбайнів протягом доби протягом усього терміну збирання прийнято однаковим (можливий виняток для останнього дня збирання).

Прийняті припущення та обмеження не порушують реальний процес роботи комбайнів, а деякі навіть підвищують точність оцінки результатів їх роботи, а загалом спрощують математичні викладки.

Потенційний валовий збір зерна перед початком збирання  $W_0$  визначали із рівняння:

$$W_0 = S_0 \cdot y_0, \quad (4)$$

де  $S_0$  – початкова площа збирального масиву, га;

$y_0$  – початкова врожайність зерна перед початком збирання, т/га.

Денне збирання визначали так:

$$t_y = N \cdot W_{e.к.} \cdot T_c, \quad (5)$$

де  $N$  – кількість працюючих комбайнів, шт.;

$W_{e.к.}$  – експлуатаційна продуктивність комбайна, га/год;

$T_c$  – години роботи протягом доби, год/доби.

Таким чином, у перший день збирання буде прибрано врожай з площі:

$$S_1 = N_k \cdot W_{e.к.} \cdot T_1. \quad (6)$$

Валовий збір зерна з цієї площі:

$$W_1 = S_1 \cdot y_1 = S_1 \cdot \frac{T_1}{24} \cdot f_1 \cdot y_0 \cdot T_{зб} \cdot y_0. \quad (7)$$

Врожайність зерна  $y_1$ , наведена на рис. 1 ( $\Pi_i$  – втрати зерна від самоосипання після кожного дня збирання, т/га), з урахуванням втрат від самоосипання в день збирання визначається за такою формулою:

$$y_1 = S_1 \cdot \frac{T_1}{24} \cdot f_1 \cdot y_0 \cdot T_{зб} \cdot y_0. \quad (8)$$

Залишкова збиральна площа після першого дня збирання:

$$S_{\Delta 1} = S_0 - S_1. \quad (9)$$

Залишкова врожайність на цій площі:

$$y_{\Delta 1} = y_1 - y_0 \cdot f_2 \quad y_0 \cdot T_{зб}. \quad (10)$$

Після другого дня прибирання відповідно:

$$S_2 = N \cdot W_{e.к.} \cdot T_2. \quad (11)$$

$$S_{\Delta 2} = S_0 - S_1 - S_2. \quad (12)$$

$$W_2 = S_2 \cdot y_2 = S_2 \cdot y_1 - y_0 \cdot f_2 \quad y_0 \cdot T_{зб}. \quad (13)$$

Після третього дня збирання:

$$S_3 = N \cdot W_{e.к.} \cdot T_3. \quad (14)$$

$$S_{\Delta 3} = S_0 - S_1 - S_2 - S_3. \quad (15)$$

$$W_3 = S_3 \cdot y_3 = S_3 \cdot y_2 - y_0 \cdot f_3 \quad y_0 \cdot T_{зб}. \quad (16)$$

Відповідно в останній день збирання:

$$S_n = N_K \cdot W_{e.к.} \cdot T_n. \quad (17)$$

$$W_n = S_n \cdot y_n = S_n \cdot \frac{T_n}{24} \cdot y_{n-1} - y_0 \cdot f_n \quad y_0 \cdot T_{зб}. \quad (18)$$

Фактичний сумарний валовий збір зерна із загальної площі  $S_0$  буде:

$$W_{cp} = S_1 \cdot y_1 + S_2 \cdot y_2 + S_3 \cdot y_3 + \dots + S_{n-1} \cdot y_{n-1} + S_n \cdot y_n = \sum_1^n (S_i \cdot y_i). \quad (19)$$

Таким чином, у міру збирання внесок щоденного валового збору в загальний намот зерно за сезон дедалі менший і менший через зниження врожайності зерна від самоосипання за однакових добових темпів збирання.

При нормативних механічних втратах зерна за комбайнами (2%) фактичний намот зерно буде ще меншим і складе:

$$W_{\phi}^H = 0,98 \sum_1^n (S_i \cdot y_i), \quad (20)$$

де  $n$  – загальна кількість днів збирання  $n = T_{зб}$ .

Денний темп збирання  $S$  і можна виразити через параметри комбайна:

$$S_i = N_k \cdot 0,1 \cdot B_{жк} \cdot V_k \cdot T_c \quad (21)$$

де  $B_{жк}$  – ширина захвату жнивирки комбайна, м;  
 $V_k$  – швидкість руху комбайна, км/год.

$$S_i = N_k \cdot \frac{3,6 \cdot q_k \cdot K_{екс}}{1 + \alpha_\phi \cdot y_i} \cdot T_c, \quad (22)$$

де  $q_k$  – пропускна спроможність комбайна, кг/с;  
 $\alpha_\phi$  – відношення маси соломи до маси зерна в хлібостой;  
 $y_i$  – поточна врожайність зерна на полі, що забирається, т/га.

$$y_i = f_i; T_{зб}; y_0. \quad (23)$$

Звідси загальна математична модель розрахунку валового збору зерна на площі  $S_0$  з урахуванням динаміки втрат зерна від самоосипання і механічних його втрат комбайнами при ширині захвату  $B_{жк}$  та швидкості комбайна  $V_k$  мають вигляд:

$$W_\phi^H = 0,98 \sum_1^{n=T_{зб}} (N \cdot 0,1 \cdot B_{жк} \cdot V_k \cdot T_c \cdot f; T_{зб}; y_0), \quad (24)$$

або

$$W_\phi^H = 0,98 \sum_1^{n=T_{зб}} \left( N_k \cdot \frac{3,6 \cdot q_k \cdot K_{екс}}{1 + \alpha_\phi} \cdot T_c \cdot (1 - P_c)^{\alpha(T_{зб}-1)} \right), \quad (25)$$

де  $\alpha$  – розмірний коефіцієнт, 1/доба.

Як зрозуміло, функція  $y_i = f_i; T_{зб}; y_0$  визначається експериментальним шляхом.

Формула (24) більш практична, тому що враховує безпосередньо клас комбайна за пропускною спроможністю та його добову продуктивність. До кожного класу комбайна можна підібрати відповідну комплектацію жнивиркою і вибрати його робочу швидкість, оскільки ці параметри взаємопов'язані:

З формул (1), (2) та (24) слідує:

$$\eta_I = 0,98 \cdot (S_0 \cdot y_0)^{-1} \cdot \sum_1^{n=T_{зб}} \times \left( N_k \cdot \frac{3,6 \cdot q_k \cdot K_{екс}}{1 + \alpha_\phi} \cdot T_c \cdot (1 - P_c)^{\alpha(T_{зб}-1)} \right), \quad (26)$$

Тоді за  $S_0=500$  га,  $T_c=10$  год.,  $T_{зб}=10$  діб,  $q_k=10$  кг/с,  $\alpha_\phi=1,5$ ,  $K_{екс}=0,7$ ,  $y_0=5$  т/га, тобто 1% від врожаю в день і в частках.

Тоді необхідний темп збирання збіжжя за добу:

$$t_y = S_0 \cdot (T_{зб})^{-1} = 5000 \cdot (10)^{-1} = 500 \text{ га/добу.}$$

Виходячи з формул (5); (6); (21) можна визначити розрахунковий обсяг робіт одного зернозбирального комбайна за збиральний період:

$$W_\phi^H = \frac{3,6 \cdot 10,07 \cdot 10 \cdot 10}{(1 + 1,5) \cdot 5} = 290 \text{ га.}$$

Тоді

$$N_k = \frac{S_0}{W_\phi^H} = \frac{5000}{290} = 17,24 \text{ комбайнів на добу.}$$

Для практичних розрахунків необхідно уточнити реальну динаміку втрат зерна на самоосипання –  $y_i = f_i; T_{зб}; y_0$ . Після чого  $S_0$ ,  $N_k$ ,  $q_k$ , і  $T_c$ , і можливо побудувати номограму для реальних умов аграрного виробничого циклу збирання збіжжя за  $S_0$ ,  $y_0$ ,  $\alpha_\phi$  і визначити структуру парка зернозбиральних комбайнів для збирання зернових в задані агротехнічні терміни.

**Висновки.** Запропоновано більш оперативний метод прогнозування, розрахунку та управління валовим збором зерна за сезон на основі визначення добових темпів збирання, біологічних та механічних втрат зерна. Цей метод дозволяє виявити внутрішній механізм формування загального валового збору зерна як суму середньодобових зборів, які протягом періоду збору можуть бути різними залежно від темпів дозрівання культури, метеорологічних умов, наявності та стану техніки, використання організаційно-технічних ресурсів.

У міру збирання внесок щоденного валового збору в загальний намот зерно за сезон дедалі менший і менший через зниження врожайності зерна від самоосипання за однакових добових темпів збирання. При нормативних механічних втратах зерна за комбайнами (2%) фактичний намот зерно буде ще меншим і складе  $W_\phi^H = 290$ , за  $S_0 = 5000$  га,  $T_c = 10$  год.,  $T_{зб} = 10$  діб,  $q_k = 10$  кг/с,  $\alpha_\phi = 1,5$ ,  $K_{екс} = 0,7$ ,  $y_0 = 5$  т/га,  $y_1 = 0,99 y_{i-1}$ , тобто 1% від врожаю в день і  $P_c = 0,01$  в частках. Необхідний темп збирання збіжжя за добу 500 га/добу.

#### Бібліографічні посилання:

1. Chaplygin, M.E. & Zhalnin, E.V. (2022). Determining the performance quality of combine harvesters operating. *Agricultural Machinery and Technologies* 13(4): 71–76. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2019-13-4-71-76>
2. Ding, Y., Wang, X., Peng, J., & Xia, Z. (2020). Visual navigation system for wheel-type grain combine harvester. *Smart Agriculture* 2: 89–102.
3. Dong, H., Chen, C., Wang, W., Peng, S., Hang, J., Cui, K., & Nie, L. (2017). The growth and yield of a wet-seeded rice-ratoon rice system in central China. *Field Crops Research*. 208: 55–59.
4. Fu, J., Zhang, G., Xie, G., Wang, Y., Gao, Y., & Zhou, Y. (2020). Development of double-channel feeding harvester for ratoon rice. *CSAE* 36: 11–20.
5. Hrynkiv, A., Rogovskii, I., Aulin, V., Lysenko, S., Titova, L., Zagurskiy, O., & Kolosok, I. (2020). Development of a system for determining the informativeness of the diagnosing parameters of the cylinder-piston group of the diesel engines in operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 3 (5(105)): 19–29. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206073>.
6. Kuzmich, I.M., Rogovskii, I.L., Titova, L.L., & Nadochiy, O.V. (2021). Research of passage capacity of combine harvesters depending on agrobiological state of bread mass. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 677: 052002. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052002>

7. Lopes, G.T., Magalhães, P.S.G., & Nóbrega, E.G.O. (2002). Ae-automation and engineering technologies: Optimal header height control system for combine harvesters. *Biosystem Engineering* 81: 261–272.
8. Nadochiy, O. & Titova, L. (2018). Simulation of agricultural processes. *TEKA* 18(2): 39–49.
9. Najafi, P., Asoodar, M., Marzban, A., & Hormozi, M. (2015). Reliability analysis of agricultural machinery: A case study of sugarcane chopper harvester. *AgricEngInt: CIGR Journal* March 17(1): 158–165.
10. Nazarenko, I., Dedov, O., Beryk, I., Rogovskii, I., Bondarenko, A., Zapryvoda, A., & Titova, L. (2020). Study of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 6 (7(108)): 71–79. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217747>
11. Nazarenko, I., Mishchuk, Y., Mishchuk, D., Ruchynskiy, M., Rogovskii, I., Mikhailova, L., Titova, L., Berezovyi, M., & Shatrov, R. (2021). Determination of energy characteristics of material destruction in the crushing chamber of the vibration crusher. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 4(7(112)): 41–49. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239292>
12. Pisarenko, G., Voinalovych, O., Rogovskii, I., & Motrich, M. (2019). Probability of boundary exhaustion of resources as factor of operational safety for agricultural aggregates. *Engineering for rural development* 18: 291–298.
13. Rogovskii, I. 2020. Algorithmically determine the frequency of recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research* 11(1): 155–162.
14. Rogovskii, I., Titova, L., Novitskii, A., & Rebenko, V. (2019). Research of vibroacoustic diagnostics of fuel system of engines of combine harvesters. *Engineering for rural development* 18: 291–298.
15. Rogovskii, I.L., Titova, L.L., Gumenyuk, Yu.O., & Nadochiy, O.V. (2021a). Technological effectiveness of formation of planting furrow by working body of passive type of orchard planting machine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 839: 052055. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/5/052055>
16. Rogovskii, I.L., Titova, L.L., Voinash, S.A., Troyanovskaya, I.P., & Sokolova, V.A. (2021b). Change of technical condition and productivity of grain harvesters depending on term of operation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 720: 012110. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/720/1/012110>
17. Voinalovych, O., Hnatiuk, O., Rogovskii, I., & Pokutnii, O. (2019). Probability of traumatic situations in mechanized processes in agriculture using mathematical apparatus of Markov chain method. *Engineering for rural development* 18: 563–569.
18. Wang, Z., Che, D., Bai, X., & Hu, H. (2018). Improvement and experiment of cleaning loss rate monitoring device for corn combine harvester. *CSAM* 49: 100–108.
19. Yezekyan, T., Marinello, F., Armentano, G., Trestini, S. & Sartori, L. (2020). Modelling of harvesting machines' technical parameters and prices. *Agriculture* 10(6): 194–204.
20. Zubko, V., Sirenko, V., Kuzina, T., Koszel, M., & Shchur, T. (2022). Modelling wheat grain flow during sowing based on the model of grain with shifted center of gravity. *Agricultural Engineering* this link is disabled 26(1): 25–37.

**Shatrov R. R.**, Postgraduate, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**Rogovskii I. L.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**Engineering management of the algorithmic formation of combine collection of grain**

*the article formulates methodical approaches of engineering management regarding the algorithmic formation of combine harvesting of grain. In order to calculate the structure of the harvester fleet of specific farms, rather than the entire region, we proposed the following methodological provisions: the overall efficiency of the harvester fleet was evaluated in general for the harvesting season, and not because it was previously accepted to evaluate the work of one harvester, and its assessment was generalized for the entire fleet of harvesters. For large-scale grain production with a high rate of harvesting, this is unacceptable, since harvesters of different classes, with different annual loadings, can participate in harvesting, and generalizing the work of one harvester to the entire fleet gives a false result; did not take into account the general dynamics of grain losses from self-shedding, but specifically for each type of grain, taking into account the dynamics of grain yield on the remaining area after each day of harvesting; the gross harvest of grain in the farm was assessed not according to the average yield at the end of harvesting, but as a set of private gross harvests of grain for each calendar day of harvesting during the entire harvesting period, which depends on the pace of harvesting and daily losses of grain; a new concept was introduced – the efficiency factor of the combine park, and of two types. The authors developed a model of the formation of the total gross collection of grain in an analytical form, the following assumptions and limitations were adopted: the productivity of the harvester was determined taking into account the coefficient of utilization of the operating time of the harvester during the day, that is, taking into account downtime for technological, organizational and technical reasons, which corresponds to the real situation; the dynamics of grain yield reduction due to self-shedding is adopted for each culture and variety individually according to the data of experimental studies; the residual yield is determined after each day of harvester operation on the residual harvesting area; the rate of self-shedding of grain on the first and last day of harvesting (rate of losses) is taken based on the ratio of the working time of the harvesters on this day and the duration of work during the day; mechanical losses of grain by combine harvesters are accepted as normative, i.e. no more than 2% of threshed grain or according to control threshing; the hours of operation of harvesters during the day during the entire period of harvesting are assumed to be the same (a possible exception is for the last day of harvesting).*

*The obtained results, as a perspective for further research, can be used by agricultural farms when equipping the combine machine park with both domestic and imported models of grain harvesters.*

**Key words:** algorithmicity, productivity, harvester, crop losses, criteria.

## РОЗРОБКА ЛОПАТІ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ РАЙОНІВ З НИЗЬКОЮ ШВИДКІСТЮ ВІТРУ

**Юрченко Олександр Юрійович**

асистент

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0002-3047-6654

aleksyurchenko110917@gmail.com

**Барсукова Ганна Володимирівна**

кандидат технічних наук, старший викладач

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0002-4261-2182

Anna-Barsukova@ukr.net

**Тимошенко Григорій Андрійович**

завідувач навчальної лабораторії

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0003-0451-137X

GATymoshenko@gmail.com

*Розширення можливостей альтернативної енергетики може призвести до значного зменшення використання традиційних джерел енергії, а також забруднення навколишнього середовища. На сьогоднішній день альтернативна енергетика у різних країнах набирає темпи розвитку досить не стабільно. Це пов'язано з можливістю використання тих чи інших альтернативних джерел, відсутністю окремих їх видів, затрат на виробництво установок, їх монтаж та пусконаладжувальні роботи. Однак, значного поширення набуває вітрова енергетика. Особливо це стосується районів, де швидкість вітру досить часто здатна розкручувати вітроколесо до обертів, за яких генератор буде виробляти електричну енергію. Проте, вітроенергетика не є виключенням і для районів з малою швидкістю вітрів. Використання мінімального зусилля, здатного привести в рух вітроколесо, уже є успіхом. У таких районах для забезпечення достатніх для генерування електричної енергії обертів вітроустановки встановлюють редуктори або інші пристрої, здатні збільшити частоту обертання валу на виході з редуктора, порівнюючи з частотою обертання на вході. Проте, ускладнення конструкції установки призводить до збільшення її маси та збільшення витрат на виробництво окремих частин, їх монтаж та обслуговування. Тому, пошук оптимальної форми лопаті, здатної забезпечити покращений старт вітроустановки та підтримувати оберти на більш високому рівні, порівнюючи з базовою формою лопаті, є актуальним завданням. В роботі представлено нову форму лопаті вітроустановки з вертикальною віссю обертання для районів з малою швидкістю вітрів. Розроблена лопать має незмінні габаритні розміри, порівнюючи з базовим варіантом, проте, за рахунок зміни форми безпосередньо на бічній частині є можливість поглинання енергії одразу у двох напрямках та концентрації її у так званому «кармані», чого не було у базового варіанту. За такого компонування кількість обертів установки складає на 17% більший показник, ніж у лопаті, виконаної у базовому варіанті. Зростає показник розгону установки, що підтверджує ефективність її на старті. Дослідження, проведенні за допомогою мінімоделі вітроустановки з трьома формами лопатей та вентилятора, забезпечили однакові умови випробувань та отримання не лише теоретичних даних, а і практичних.*

**Ключові слова:** енергія, вісь обертання, ефективність, вітер, енергетика.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.14>

**Вступ.** Темпи розвитку енергетичних систем на сьогоднішній день потребують значної уваги, поставивши перед конструкторами ряд вимог. Кожна з цих вимог передбачає покращення показників роботи енергоустановки шляхом як внесення змін в конструкцію уже існуючих систем, так і виготовлення нових механізмів та конструкцій.

Вдосконалення вітроенергетичних установок відбувається шляхом ускладнення конструкції вітроколеса, системи керування, а також конструкції генератора. Це дає змогу досягнення більш стабільної роботи вітроустановки.

Класифікацією вітроенергетичні установки (ВЕУ) за положенням вітрогенератора по відношенню до напрямку дії потоку повітря передбачено два основні види вітроу-

становок: вітроустановки з горизонтальною та вертикальною осями обертання.

Дослідження оптимальної форми лопаті для установки проводяться на основі ВЕУ з вертикальною віссю обертання.

Серед вертикально-осьових установок найбільш розповсюдженими є вітроустановки з типами роторів Савоніуса, Еванса, Масгрува та Дар'є.

Значною позитивною якістю конструкцій такого типу є те, що вони уловлюють вітри будь-якого напрямку. Завдяки геометрії своїх лопатей такі ВЕУ завжди знаходяться в робочому положенні. Конструкцією вітрових установок з вертикальною віссю обертання передбачено відмову орієнтації на вітер. А це, в свою чергу,

є значним недоліком конструкції установок з горизонтальною віссю обертання.

Проте для конструкцій із вертикальними осями обертання потрібен початковий старт для того, щоб вітроустановка розпочала свою роботу. Мова йде про розкручування вітроколеса на старті.

Ще одним з недоліків установок даного типу є низька частота обертання вітроколеса. Внаслідок цього виникає необхідність введення в конструкцію ВЕУ редукторів, що дають змогу збільшити оберти генератора.

Разом із цим, установки з вертикальною віссю обертання відрізняються простотою конструкції та відносною дешевизною матеріалів. Незалежність від напрямку вітру, яким розкручується вітряк, дає змогу використовувати його у місцях з обмеженою течією повітря. Такими можуть бути площі, закриті з одного боку будівлями чи іншими спорудами, які б перешкождали дії вітру на вітроколесо.

На сьогоднішній день актуально висвітлюється питання використання енергій вітру, сонця, води та інших альтернативних джерел у максимально можливих об'ємах. Тобто, виникає тенденція отримання енергії від даних ресурсів по максимуму, наскільки це можливо. Вітроустановки є одними з представників такої енергетики.

Проектування і розробка вітрових турбін для районів із низькою швидкістю вітрів пов'язані із рядом технічних і фінансових проблем. А це, в свою чергу, веде до максимізації ефективності перетворення і мінімізації витрат (Adeyeye, K.A., Ijumba, N., Colton, J.S., 2021).

На переважній частині територій, де проводилися дослідження у джерелі (Adeyeye, K.A., Ijumba, N., Colton, J.S., 2021) переважають вітри з низькою швидкістю. У даному дослідженні представлено багатопараметричний метод оптимізації, що використовується з метою дослідження конструкції нового вітроколеса. Використовуючи коефіцієнт швидкості наконечника, відношення підйому і опору а також коефіцієнт потужності, визначено оптимальну ефективність за рахунок зміни кількості лопатей та діаметру ободу.

Як показали дослідження, зміна кількості лопатей має значний вплив на ефективність роботи вітроустановки, тим більше при різних діаметрах ободу. Виявлено, що зменшення кількості спиць у два рази (з 64 до 32) у чотирьох досліджуваних вітроколісах із різними діаметрами ободів знижує ефективність менш, ніж на 0,19%. Крім того, при цьому зменшиться вартість на придбання на 42%, вартість монтажних робіт на 42% та маса на 28%. А зменшення кількості спиць у чотири рази (тобто з 32 до 16) знизило ефективність менш, як на 0,31%, зменшило витрати на придбання і монтаж на 36% та 35,5% відповідно, а масу вітроколеса на 19,2%

Покращення параметрів вітроустановок несе за собою різні методи. Так, наприклад, у джерелі (Hosseinie, R., Roohi, R., Ahmadi, G., 2021) розглядається установка, що працює за рахунок нахилу так званого вітрила, змушуючи гойдатися робочий орган, що, у свою чергу, призводить до руху маховика в випрямленому обертальному русі. Цей маховик використовується з метою приводу електрогенератора. Спроектвані до цього турбіни спо-

чатку були напівактивними, тоді як у даному дослідженні було запропоновано повністю пасивну версію турбіни і вивчено її роботу. Установка складається із коливального вітрила, що прикріплене до щогли, що рухається взаємно за рахунок торсійної пружини. Коливальний рух, в свою чергу, перетворюється у обертальний рух маховика. Таким чином, при проведенні дослідження були отримані динамічні рівняння для вітроустановки, що були використані з метою аналізу тимчасових характеристик роботи установки.

Ефективне використання енергії вітру може нести і підключення великих маховиків до ротора генератора (Akbari, R., Izadian, A., 2021). У даному джерелі представлено моделювання і керування такою системою. Обертний момент накопичувача напряму пов'язаний із ротором генератора. Трансмісією від'єднується вал турбіни від валу генератора з метою забезпечення незалежного контролю кутових швидкостей. Таким чином, якість електроенергії, яка вироблятиметься вітроустановкою, покращиться, так як коливання потужності, викликані зміною швидкості вітру, зменшуються.

Використання енергії вітру збільшується, а тому і розміри вітрових турбін можуть значно відрізнятися. Це призводить до появи більш жорстких вимог, що висувуються до вітроустановок, як із боку електромережі, так і з боку економіки. Деякі із таких вимог можна задовольнити за рахунок додаткових механізмів керування у вітрогенераторах. У роботі (Jauch, C., 2021) розглянуто механізм, що є, свого роду, гідравлічно-пневматичною системою маховика у роторі вітрової турбіни. За рахунок такої системи досягається стабілізація живлення, швидка частотна характеристика, стабілізація системи живлення. Крім того, це може призвести до пом'якшення навантаження на механізми вітроустановки, що виникає внаслідок, наприклад, дисбалансу, гравітації, які діють на лопаті, вібрацій та екстреного гальмування.

Моделювання обтікання вітроколеса із лопатями у формі обертаних циліндрів може також підвищити ефективність використання енергії вітру, а тим більше для районів із малою швидкістю вітрів (Tanasheva, N.K., Bakhtybekova, A.R., Sakipova, S.E., Minkov, L.L., Shuyushbaeva, N.N., Kasimov, A.R., 2021). У даній роботі розглянуто вітроустановки із обертаними циліндричними лопатями. Перевагою таких установок, порівнюючи їх із традиційними лопатевими установками, є пусковий момент та початок вироблення енергії за швидкості вітру, що складає 2 – 3 м/с. Також у даній роботі на основі тривимірних рівнянь Нав'є-Стокса у обертаній системі розроблено математичну модель.

Кількість та форма лопатей мають важливу роль при обертанні вітроустановки та максимально ефективному використанні енергії вітру. Так, у дослідженні (Syuhada, A., Maulana, M.I., Syahriza, Sani, M.S.M., Mamat, R., 2020) обговорюється вплив швидкості вітру і коливань в залежності від кількості лопатей вітроустановки на потужність, що досягається вітровими установками для обертання генераторів. Вітряк, що є досліджуваним у кількох варіаціях лопатей, був виготовлений з деревини. Результатами дослідження виявлено, що для швидкостей вітру,

що є нижчими 5 м/с, краще використовувати невелику кількість турбін, а для швидкостей вітру, більших за 7 м/с, краще використовувати вітроколесо з великою кількістю лопатей.

Дослідження, що проводяться з оптимізацією конструкцій вітроустановок, нерідко призводять не до зменшення структури вітроустановки, а навпаки, – до її ускладнення. Однак, усі ці зусилля спрямовані на максимально ефективне використання енергії вітру. У роботі (Yang, R., Chen, Y.-J., Sun, X.-Y., Ma, C.-S., 2020) розглянуто установку з допоміжним вітровим колесом, що знаходиться на тій же осі обертання. Допоміжне вітроколесо, що спроектовано з діаметром 26 м, кількість лопатей якого складає 8–12 шт., використовується в конфігурації п'яти типів моделей подвійних вітроустановок. Аналіз роботи таких моделей за різних умов показав, що подвійні вітроустановки здатні збільшити використання енергії вітру. Подвійна вітроустановка із 10-лопатеvim допоміжним вітроколесом показала найкращий ефект. У момент, коли швидкість вітру складає 3 м/с, порівняно із оригінальною моделлю, потужність установки з двома вітроколесами збільшується на 14,17%, а коефіцієнт використання енергії вітру збільшився на 4,53%. Швидкість вітру на ділянці, близькій до кореня лопатей основного вітроколеса (радіус менше 13 м) відносно зменшена, у той момент, як в області, що є близькою до верхівки допоміжного вітроколеса (радіус близько 13–20 м) є відносно більшою. Допоміжним вітроколесом перетворюється частина енергії, а тому кінетична енергія в сліді значно зменшується.

**Формулювання цілей статті (постановка мети та завдання).** ВЕУ з вертикальною віссю обертання, хоч і має одну з головних переваг – відсутність необхідності орієнтації на вітер, але для своєї роботи потребує певного старту для роботи.

Тихохідність, що є однією з ознак вітроустановок такого типу, вимагає встановлення редукторів або мультиплікаторів. Це несе за собою ускладнення конструкції, збільшення маси та розмірів. Крім того, збільшується зусилля для обертання. Це зусилля витрачається на обертання не лише самого генератора і редуктора. Враховуючи тихохідність таких вітроустановок, збільшення зусилля для обертання його основних елементів може значно зменшувати оберти вітроколеса.

Тому, ускладнення конструкції, що несе за собою зменшення крутного моменту вітроустановки, необхідно компенсувати. Разом із цим, питання запуску вітрогенератора вертикально-осьової установки є одним з основних завдань при проектуванні як конструкції лопатей установки, так і їх кількості.

Зменшення стартового зусилля вітроколеса дасть змогу використання його при менших значеннях швидкості вітру, ніж до цього.

З підвищенням старту актуальним залишається збільшення обертів вітроустановки. Завдяки цьому редуктор, який буде встановлено у ВЕУ, може мати значно менше передатне число.

У зв'язку із цим, розробка вітроустановки з вертикальною віссю обертання, у якій лопаті могли б значно покращити старт, є актуальним питанням.

Метою статті є створення вітроенергетичної установки, робота лопатей якої є ефективною, для регіонів з малою швидкістю вітру без додаткового запуску її для початкової роботи. Тому слід провести дослідження числа обертів вітроколеса у кількох варіантах лопатей для зменшення його стартового зусилля.

**Матеріали і методи досліджень.** Основною характеристикою ВЕУ є коефіцієнт використання енергії вітру, що по змісту має схожість з коефіцієнтом корисної дії (Chizhma S. N., Molchanov S. V., Zakharov A. I., 2018).

При розробці вітроустановки ставляться такі завдання:

- 1) початок роботи вітроустановки при якомога менших зусиллях;
- 2) сприяння більшій частоті обертання вітроколеса під час роботи;
- 3) проведення дослідів з лопатями однакових габаритних розмірів;
- 4) випробування усіх типів лопатей за однакових умов.
- 5) розробка оптимальної конструкції ВЕУ при певних умовах дослідження (як варіант).

Розробка кількох типів лопатей, що зовні в певній мірі є схожими одна на одну, дозволить зменшити стартове зусилля для вітроколеса.

Нижче, на рисунку 1, представляємо схеми трьох лопатей, які було виготовлено.

**Результати.** При виготовленні вітроустановки головним завданням вбачалося зменшення стартового

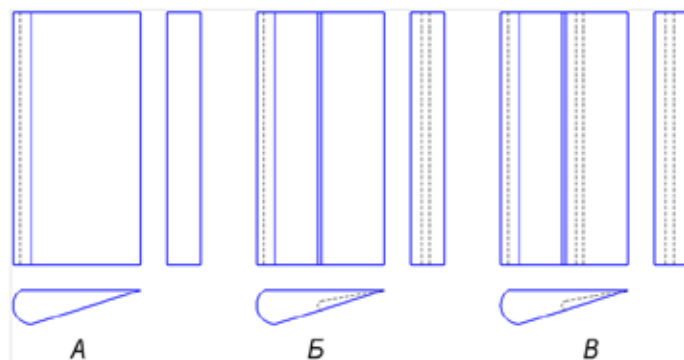


Рис. 1. Схема лопаті вітроколеса:

А – плоска лопать; Б – лопать з «карманом»; В – лопать з «карманом» та щілиною.



зусилля. Це досягалося поступово від варіанту А рисунку 1 до варіанту В.

Використання в конструкції лопатей «карманів» з одного боку (варіанти Б та В) та щілини з протилежного боку (варіант В) дає змогу сконцентрувати потік вітру не лише в одному напрямку, а в кількох відразу, при чому з двох протилежних одна до одної сторін.

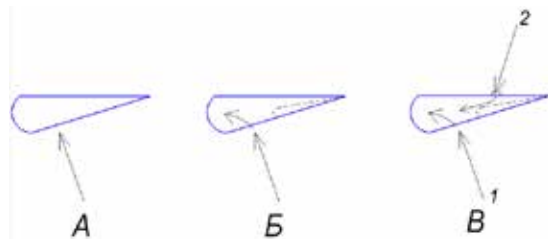
Так чи інакше, потік вітру концентрується у «кармані» лопаті, спонукаючи вітроколесо до руху.

Показаний на рисунку 2 напрям вітру, що діє на кожен з представлених лопатей, має неоднозначний характер.

Аналізуючи варіант Б рисунку 2, стає зрозумілим, що потік вітру концентрується уже не на безпосередньо боковій частині лопаті, як це відбувається у варіанту А. У даному варіанті потік сконцентровується у «кармані» лопаті, що приводить в рух вітроколесо.

Порівнюючи варіанти Б та В рисунку 2, видно, що лопать у виконанні за варіантом В матиме ще один напрям дії вітру – напрям «2», що реалізується через вертикальну щілину, яка пролягає через усю бокову сторону лопаті, що є протилежною до сторони, на яку діє потік «1» вітру за звичним способом.

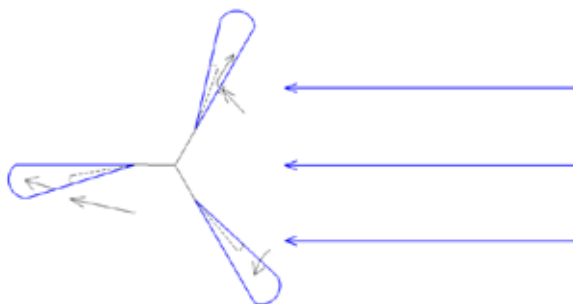
Таким чином, потік, позначений «2» на рисунку 2, потрапляючи усередину лопаті, направляється до «карману», приводячи в рух вітроколесо.



**Рис. 2. Напрямок потоку вітру, що діє на лопать вітроколеса: А – плоска лопать; Б – лопать з «карманом»; В – лопать з «карманом» та щілиною**

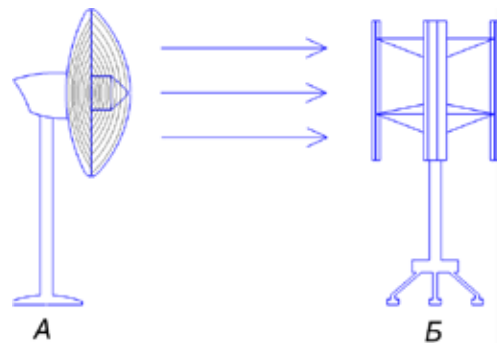
Варіанти Б та В мають значно кращі стартові показники, ніж варіант А. Разом із цим, важливим є те, що лопать у виконанні за варіантом В значно кращі показники і по частоті обертання, порівнюючи з варіантами А та Б.

На рисунку 3 зображено напрям дії вітрового потоку на лопаті вітроустановки, виконаної за варіантом В, на старті. Як бачимо, кожна з лопатей активно задіяна у старті.



**Рис. 3. Потік вітру на старті вітроустановки**

Дослідження залежності кількості обертів вітряка від часу проводилися за допомогою міні моделі вітроустановки, яку окремо виготовлено та встановлено, і вентилятору, зображених на рисунку 4.



**Рис. 4. Експериментальна вітроустановка: А – вентилятор; Б – вітроустановка**

Випробування здійснено по трьом видам лопатей, представлених вище. Умови дослідження усіх типів лопатей – незмінні. Однаковими є відстань від вентилятору до вітроустановки, швидкість обертання вентилятору.

Результати досліджень показали, що найкраще використовують потік вітру мають кращий момент на старті – лопаті, виконані за варіантом В.

Нижче представлено показники обертання вітряка з різними лопатями за окремий проміжок часу при незмінних умовах (таблиця 1).

**Таблиця 1  
Залежність числа обертів від часу**

№	t, с	n <sub>1</sub> , об	n <sub>2</sub> , об	n <sub>3</sub> , об
1	5	0,75	1	1,1
2	10	2,5	3	3,25
3	15	4,5	5,5	6,5
4	20	7	9	10
5	30	15	16	19
6	40	24	25	28
7	50	31	35	38
8	60	41	44	48

У таблиці 1 представлено дані досліджень, де n<sub>1</sub>, n<sub>2</sub>, n<sub>3</sub> – кількість обертів вітроустановки, виготовлених відповідно за способами А, Б та В.

Результати досліджень говорять про те, що за 1 хвилину число обертів вітроустановки з лопатями, виготовленими по способу В, на 17% більше, ніж з лопатями, що виготовлені за способом А.

**Обговорення (Discussion).** Використання сил рухомих повітряних мас на даний момент є глобальним явищем (Pytel, K., Gumula, S., Dudek, P., Bielik, S., Szpin, S., Hudy, W., Piaskowska-Silarska, M., Kowalski, M., 2019). Метою дослідження у даній роботі було визначення впливу форми лопатей та кута атаки лопаті на ефективність перетворень енергії вітру у механічну на колесі ротору. Роторним колесом перетворюється енергія вітру у механічну енергію при використанні лопатей, орієнтованих із точки зору оптимальної продуктивності



**Рис. 6. Створена ВЕУ з лопатями з «карманом» і щілиною**

та певної форми. У публікації представлено результат аеродинамічних характеристик профільних лопатей для використання у вітрогенераторах.

Дослідження лопатей у джерелі (Ma, J., Huo, D., Li, X., Duan, Y., Wu, Y., Wang, J., 2019) стосуються лопатей вітроустановки з розподіленою віссю, а її жорсткість, коефіцієнт демпфування і власна частота вперше покращені за допомогою увігнутого крила. Передумовою цього було збереження вихідної потужності. Дослідження показали, що увігнута внутрішня аеродинамічна поверхня може краще контролювати положення і вплив на діпазони зближення повітряного потоку. Крім того, увігнутий аеродинамічний профіль здатен збільшити коефіцієнт амортизації вітроколеса на 3%–9%, збільшити значення жорсткості лопаті на 32%, Крім того, ефективно зменшуються максимальний зсув та деформація на 28%. Застосування увігнутого аеродинамічного профілю у конструкції лопатей вітрогенератора не тільки забезпечило новий метод отримання сімейства аеродинамічних крил, але і може забезпечити спосіб для синхронної оптимізації аеродинамічних характеристик та структурних динамічних характеристик лопатей.

У роботі (Bel Mabrouk, I., El Nami, A., 2019) досліджено динамічну поведінку вітроустановки із вертикальною віссю обертання. Крутий момент змодельовано на розрахунках Нав'є-Стокса із усередненими значеннями Рейнольдса для дво-, три- і чотирилопатевого роторів. Для кожної із запропонованих конфігурацій ротору обговорено вплив кількості лопатей на аеродинамічні характеристики. У роботі встановлено взаємозв'язок між аеродинамічними деталями і динамічною вібрацією зубчастих систем шляхом вивчення впливів деяких конструктивних параметрів на динамічну вібрацію системи передачі в нестационарному режимі. Кількість лопатей вважається

основною проблемою вітрової техніки. У цій роботі наведено чисельні результати, які показують, що кількість лопатей чинить істотний вплив на ККД установки та динамічну характеристику досліджуваної системи.

Кут атаки лопаті вважається одним із найважливіших факторів, які впливають на аеродинамічні характеристики вітроколеса із вертикальною віссю (Zhang, L., Zhao, X., Wang, H., Liu, Y., 2018). Для вітроустановки потужністю 1 кВт з вертикальною віссю та симетричним аеродинамічним профілем визначено теоретично оптимальні кути атаки, що складають  $10,7^\circ$  та  $-10,7^\circ$  протівітряної і підвітряної площі вітроустановки з метою отримання максимального коефіцієнту використання сили вітру вітроколесом. На основі теорії багатопотокового керування диска з подвійним приводом, результати досліджень показують, що коефіцієнт використання потужності вітроколеса може бути збільшено на 11,03 % за допомогою закону регулювання кутів атаки лопаті у реальному часі, запропонованого у даній статті.

З метою визначення характеристик вітроустановок у джерелі (Li, Z., Yu, X., Han, R., 2017). досліджується новий тип вітроколеса із горизонтальною структурою вітрогенератора у поєднанні із характеристиками вітрогенератора із вертикальною віссю і вітрогенератора із горизонтальною віссю. За допомогою програмного забезпечення досліджено структуру турбіни і розподіл навколишнього поля потоку. Одночасно для генераторів, що встановлені на вітроустановках, запропоновано синхронний генератор. У роботі досліджено та змодельовано поле потоку навколо вітроустановки. Результати показали, що нова структура установки може покращити використання енергії вітру і значно краще використовувати енергію вітру. Доцільність такої структури перевірено за допомогою моделювання, яке забезпечує подальшу оптимізаційну основу.

Вітроустановки, в тому числі і ті, що містять ротор з вертикальною віссю обертання, можна з'єднати з перетворювачами енергії та нерухомим концентратором повітря з напрямними пластинами. Такий концентратор повітря виконується у вигляді двох конусоподібних чашок із отворами у дні чашок, між якими розташовуються напрямні повітря пластини і ротор. При цьому утворюються канали, що звужуються у горизонтальному і вертикальному напрямках (Рекрут М. І., Шевченко І. А., 2019). В основу моделі було поставлено задачу створення вітроустановки, у якій би з'явилася можливість підвищення потужності і ефективності її експлуатації. Тому, поставлену задачу вирішено тим, що ротор із вертикальною віссю обертання з'єднано з перетворювачем енергії, нерухомим концентратором повітря із напрямними пластинами.

В результаті дослідження ефективності використання лопатей, опис яких представлено у даній роботі, виявлено, що робота вітроустановки може бути покращеною за рахунок зміни форми лопаті без зміни її габаритних розмірів. Час розгону до максимальних обертів скорочується, що означає покращений старт вітроустановки. Крім того, слід відмітити, що максимальні оберти установки також є більшими, порівнюючи зі стандартною формою лопаті, що підтверджує ефективність її використання.

#### **Висновки.**

1. Покращення старту, а саме, – початок роботи з меншим тиском повітряних мас, досягнуто у варіантів лопатей з «карманом» та з «карманом» і щілиною.

2. Кількість обертів вітроколеса покращується зі зміною їх конструкції, а саме: лопать з «карманом» має на 7,3% більше число обертів за хвилину, ніж плоска лопать. А лопать з «карманом» та щілиною має покращений на

17% показник кількості обертів за хвилину у порівнянні з плоскою лопаттю.

3. Усі типи лопатей вітроустановки досліджено з однаковими габаритними розмірами.

4. Умови, в яких проводилися дослідження, є однаковими для кожного з типів лопатей, адже вентилятор працював у одному режимі, відстань від вентилятору до вітроустановки була незмінною. Крім того, в усіх трьох випадках дотримано висоту, на якій знаходилися лопаті вітроустановки та вентилятор.

5. Було створено конструкцію тихохідної ВЕУ з вертикальною віссю обертання для районів з малою швидкістю вітрів.

Результати дослідних випробувань розробки тихохідної ВЕУ з лопатями з «карманами» та щілинами реалізовано як пристрій для освітлення емблеми університету у темну пору доби, що виготовлений за способом В і знаходиться поруч з корпусом інженерно-технологічного факультету Сумського національного аграрного університету (акт впровадження від 03.12.2021 р.).

А теоретико-практичні результати дослідження використовуються в навчальному процесі при вивченні дисциплін: «Екологічні аспекти раціонального енергокористування», «Енергетичні та екологічні основи в збереженні та використанні поновлюваних джерел енергії» «Енергетичні та екологічні основи в забезпеченні та використанні поновлюваних джерел енергії» (акт впровадження від 03.12.2021 р.).

Отже, при створенні оптимальної конструкції лопатей вітроустановки було досягнуто зменшення стартового зусилля для вітроколеса. Крім того, виявлено, що у лопатей з «карманами» та щілиною щілини, що знаходяться з однієї зі сторін лопатей, також виконують допоміжну функцію не лише при старті, а й під час роботи вітроустановки.

#### **Бібліографічні посилання:**

1. Adeyeye, K.A., Ijumba, N., Colton, J.S. (2021). Multi-parameter optimization of efficiency, capital cost and mass of ferris wheel turbine for low wind speed regions. *Energies*, 14 (19), № 6217. DOI: 10.3390/en14196217.
2. Hosseinie, R., Roohi, R., Ahmadi, G. (2021). Modeling and analysis of a fully passive swinging sail wind turbine. *Wind Energy*, 24 (7), pp. 653-671. DOI: 10.1002/we.2595.
3. Akbari, R., Izadian, A. (2021). Modelling and Control of Flywheels Integrated in Wind Turbine Generators. *IEEE International Conference on Electro Information Technology*, 2021-May, № 9491886, pp. 106-114. DOI: 10.1109/EIT51626.2021.9491886.
4. Jauch, C. (2021). Grid services and stress reduction with a flywheel in the rotor of a wind turbine. *Energies*, 14 (9), № 2556, DOI: 10.3390/en14092556.
5. Tanasheva, N.K., Bakhtybekova, A.R., Sakipova, S.E., Minkov, L.L., Shuyushbaeva, N.N., Kasimov, A.R. (2021). Numerical simulation of the flow around a wind wheel with rotating cylindrical blades. *Eurasian Physical Technical Journal*, 18 (1), pp. 51-56. DOI: 10.31489/2021NO1/51-56.
6. Syuhada, A., Maulana, M.I., Syahriza, Sani, M.S.M., Mamat, R. (2020). The potential of wind velocity in the Banda Aceh coast to the ability to generate electrical energy by horizontal axis wind turbines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 788 (1), стаття № 012082, DOI: 10.1088/1757-899X/788/1/012082.
7. Yang, R., Chen, Y.-J., Sun, X.-Y., Ma, C.-S. (2020) Analysis on the Phenomenon of Power Increase in Dual-wind Turbine under Low Wind Speed [Article@低风速下双风轮风力机增功现象分析] Reneng Dongli Gongcheng/Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 35 (9), pp. 134-140. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.09.019. (in Chinese).
8. Pytel, K., Gumula, S., Dudek, P., Bielik, S., Szpin, S., Hudy, W., Piaskowska-Silarska, M., Kowalski, M. (2019). Testing the performance characteristics of specific profiles for applications in wind turbines. *E3S Web of Conferences*, 108, № 01015, DOI: 10.1051/e3sconf/201910801015.
9. Ma, J., Huo, D., Li, X., Duan, Y., Wu, Y., Wang, J. (2019). A study on the optimization method of structural dynamic properties of blades based on concave deformation of airfoil [Article@基于翼型凹变的叶片结构动力学性能优化方法研究] Zhendong yu Chongji/Journal of Vibration and Shock, 38 (8), pp. 36-41. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.08.006. (in Chinese).

10. Bel Mabrouk, I., El Hami, A. (2019). Effect of number of blades on the dynamic behavior of a Darrieus turbine geared transmission system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 121, pp. 562-578. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.11.048.
11. Zhang, L., Zhao, X., Wang, H., Liu, Y. (2018). Study on the Real time and Efficient Adjustment Law for H-Type Vertical Axis Wind Turbine [Article@H型垂直轴风力机实时高效攻角调节方法研究] *Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering*, 54 (10), pp. 173-181. DOI: 10.3901/JME.2018.10.173. (in Chinese).
12. Li, Z., Yu, X., Han, R. (2017). Modeling and wake characteristics analysis of a new vertical axis wind generation system. *Proceedings IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2017-January, pp. 8590-8595., DOI: 10.1109/IECON.2017.8217509.
13. Recruit M.I., Shevchenko I.A. (2019). Vitroustanovka [Wind generator] (Patent of Ukraine № 134082, 21.04.2019) State Enterprise "Ukrainian Institute of Intellectual Property"(Ukrpatent) URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=258070> (in Ukrainian).
14. Chizhma S. N., Molchanov S. V., Zakharov A. I. (2018). Kriterii vybora tipa vetroustanovok dlya mobil'nykh vetro-solnechnykh elektrostansiy [Criteria for selecting the type of wind plants for mobile wind-solar power plants] *Bulletin of the Baltic Federal University. I. Kant. Ser.: Physical-mathematical and technical sciences*. 2018. № 1. C. 53–62. (in Russian).

**Yurchenko O. Yu.**, Assistant, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

**Barsukova H. V.**, PhD, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

**Tymoshenko H. A.**, Head of the training laboratory, Sumy, Ukraine

**Development of a wind turbine blade for areas with low wind speed**

*Expanding the possibilities of alternative energy can lead to a significant reduction in the use of traditional energy sources, as well as environmental pollution. Today, alternative energy in different countries is gaining momentum rather unstable. This is due to the possibility of using certain alternative sources, the lack of certain types, the cost of production, installation and commissioning. However, there is a significant expansion of wind energy. Particularly important are the districts, where the wind is often blown up by spinning the wind wheel to the wraps, for which the generator will vibrate electric energy. Prote, wind energy is not excluded and for areas with low wind speed. Winning the minimal susilla, building to bring the wind wheel into operation is already a success. In such areas, for the provision of wrappers of wind turbines sufficient for generating electrical energy, reducers or other extensions are installed to increase the frequency of wrapping the shaft at the output of the reducer, equal to the frequency of wrapping at the input. However, the complex design of the installation leads to increased weight and increased loss for the production of some parts, as well as maintenance installations. Therefore, look for the optimal shape of the blade, creating protection for starting the wind turbine and leveling it to a higher level, which corresponds to the basic shape of the blade is the actual task. This article presents a new shape of wind turbine blade for areas with low wind speeds. The developed blade has the same dimensions compared to the base version, however, due to the change in shape directly on the side it is possible to absorb energy in two directions and concentrate it in the so-called "pocket", which was not the base version. With this arrangement, the number of revolutions of the installation is 17% higher than in the blade made in the basic version. The rate of acceleration of the installation increases, which confirms its effectiveness at the start. Studies conducted with the help of a mini-model of a wind turbine with three forms of blades and a fan provided the same conditions for testing and obtaining not only theoretical but also practical data.*

**Key words:** energy, axis of rotation, efficiency, wind, energy.

**КОМПОЗИТНІ ВІДВАЛИ TEKRONE – АЛЬТЕРНАТИВА  
ДЛЯ СУЧАСНОЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ****Юрченко Олександр Юрійович**

асистент

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0002-3047-6654

aleksyurchenko110917@gmail.com

**Колодненко Віталій Миколайович**

старший викладач

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0002-8450-6759

kolodnenko\_vn@ukr.net

*Оранка, як один із видів обробітку ґрунту, має на меті виконання ряду вимог по забезпеченню якості технологічної операції та виконанню своїх основних функцій. Серед таких завдань, що ставляться перед даною операцією, виділяють: дотримання заданої глибини обробітку та не перевищення допустимого відхилення, оборот пласта повинен бути щільним, оброблюваний шару ґрунту має бути рихлим, усі наявні бур'яни та пожнивні залишки мають бути повністю приораними і т. п. Досягнення усіх поставлених цілей можливе лише за якісного підбору агрегатів для виконання технологічної операції на тих чи інших ділянках ґрунту, а також вибору робочих органів, що є змінними для сільськогосподарської техніки. При розгляданні плуга, як агрегату для основного обробітку ґрунту, варто відмітити те, що структурні частини корпусу, такі як відвали, леміші, башмаки, польові дошки, стойки несуть значний вплив на якість здійснюваного процесу. Наприклад, зміна форми відвалу може значною мірою вплинути на процесу перевертання оброблюваного шару, а також приорювання бур'янів та пожнивних решток. Підвищення ефективності і зниження енергоємності оранки можливе шляхом вирішення завдань по оптимізації таких параметрів плуга, як ширина захвату, геометрія та форма лемішно-відвальної поверхні корпусу. Заміна корпусів або їх відвалів є досить тривалим і трудомістким процесом, тому її виконання в залежності від виробничих та метеорологічних ситуацій, які є часто змінними, являється вкрай важким. Однак, витрати часу на здійснення операцій по оптимізації процесу роботи агрегату, а саме, - заміні його робочих органів на більш енергоощадні, довговічні та здатні покращити якість технологічної операції, виправдовуються отриманим результатом. У даній роботі представлено аналіз роботи композитних відвалів Tekrone, що були встановлені на класичний плуг з метою оптимізації роботи машино-тракторного агрегату. Так як дана операція не вносить змін до конструкції плуга, заміна відвалів не вимагає додаткового втручання до інших його структурних елементів. Результатом оптимізації роботи плуга є зменшення витрат палива на здійснення процесу оранки, зменшення завантаженості двигуна, можливість роботи на вищій передачі та збільшення швидкості обробітку ґрунту. При цьому виявлено значну перевагу композитних відвалів у порівнянні з залізними – не залипання робочої поверхні відвалу при роботі на вологих ґрунтах, швидке їх очищення, відсутність процесів корозії та покращене ковзання оброблюваного шару ґрунту по поверхні відвалу. В результаті цього, можна зробити висновок, що композитні відвали Tekrone можуть бути альтернативою для покращення якості технологічного процесу оранки.*

**Ключові слова:** оранка, регулювання, корпус, плуг, якість.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.15>

**Вступ.** Використання сучасної сільськогосподарської техніки та технології, за якими здійснюється її виробництво, мають на меті розширення можливостей техніки, покращення ряду показників з обробітку ґрунту, умов праці, зносостійкості агрегатів та окремо узятих їх структурних елементів, а також зменшення витрат на виконання технологічної операції.

Ефективність вирощування різних сільськогосподарських культур залежить від біологічних, природних та агрономічних факторів, таких як: сорт, відтворюваність, умови рослинності, живлення, технологія вирощування (Kuzina, T., Sirenko, V.Y., Zubko, V., & Chuba, V., 2018).

Розповсюдженість різних за формою та виконанням плугів так чи інакше залишає їх основну функцію

незмінною. Використання, наприклад, оборотного плуга підтверджує його ефективність для глибокого обробітку ґрунту, який працює як по лівому, так і з правому проходу з двостороннім механізмом повороту та автоматично змінює положення (Yanxin Yin, Shuxia Guo, Zhijun Meng, Wuchang Qin, Bin Li, Changhai Luo., 2018). Тому, пошук оптимальних конструкційних параметрів для плугів є важливим завданням, що, згодом, призводить до покращення якості обробітку. При цьому, відвальні плуги і досі є важливими ґрунтообробними знаряддями в умовах сучасних технологій вирощування культур (Lobachevsky Y. P., Liskin I. V., Panov A. I., Aldoshin N. V., Plyaka V. I. and Lylin N. A., 2021). Дослідження, що здійснюються з метою зміни опору і підвищення

ефективності обробітку можна реалізувати за рахунок оптимізації форми корпусу (Ucgul M., Saunders C. and Fielke J. M. 2017; Mazitov N. K., Lobachevsky Y. P., Dmitriev S. Y., Sakhapov R. L., Sharafiev L. Z. and Rakhimov I. R., 2015).

Форма та виконання відвалів плугів чинять значний вплив на якість обробітку, що характеризується оптимальною швидкістю, кутом перевероту, грудкуватістю, ковзанням оброблюваного шару ґрунту по поверхні відвалу, тяговим зусиллям, тощо. За допомогою теоретичних досліджень є можливість оптимізації робочого процесу плуга змінної ширини (Nuțescu C., Gageanu I., Cujbescu D., 2021). Так, наприклад, багаторічний неглибокий обробіток ґрунту спричиняє невелику товщину орного шару, а ефективність використання модифікованих плугів здатне покращити керування водними ресурсами ґрунту і врожайністю систем, одночасно зменшивши ерозію ґрунту (Yongjie Ma, Zhiqian Lan, Kaige Zhang, Banguao Li, Wende Zheng, Yanming Gao, Jianshe Li, Xueyan Zhang., 2021; Fenta, H.M.; Hussein, M.A.; Tilahun, S.A.; Nakawuka, P.; Steenhuis, T.S.; Barron, J.; Adie, A.; Blummel, M.; Schmitter, P., 2022). Крім того, оптимізація конструкції, що залежить від параметрів відвалу: кута різання, налаштування кута частки, параметру кривизни, глибини і швидкості оранки здатна покращити обертання та укладку на дно борозни насіння бур'янів (Hadi Azimi-Nejadian, Seyed Hossein Karparvarfard, Mojtaba Naderi-Boldaji, 2022). Тому, метою обробки ґрунту є забезпечення сприятливих умов ґрунту шляхом зрізання та перевертання ґрунту для посіву чи пересадки [10]. Аналіз функціональних можливостей плугів можливий за розгляду його конструкційних особливостей. Так, у роботі (K. Chandra Mouli, S. Arunkumar, B. Satwik, S.BhargavaRam, J.Rushi Tej, A.SaiChaitanya., 2018) коротко розглянуто різні типи плугів, які використовуються для обробки землі, а також розроблено три типи простих насадок для оборотних плугів.

У роботі плуга є чіткі закономірності, які впливають на величину динамічної складової опору плугу для відвалів, та її особливості залежно від напрямку надходження шару ґрунту на леміш (Bulgakov, V., Pascuzzi, S., Adamchuk, V., Ivanovs, S., Pylypaka, S., 2019). Оптимізація конструкційних особливостей плуга має на меті

мінімізацію енергії. Встановлено, що на обробіток ґрунту припадає близько половини енергії, яка використовується в рослинництві (Karmakar S. and Kushwaha R. L., 2006). Витрата палива на здійснення процесу оранки та продуктивність в основному залежить від фізичних властивостей ґрунту та відвалів і їх геометричних параметрів (Ahmadi I., 2017). Серед методів визначення сил, які діють на робочі органи плугів, найбільш поширеними є теоретичні методи та методи механіки ґрунтів (Bulgakov, V., Pascuzzi, S., Adamchuk, V., Ivanovs, S., Pylypaka, S., 2019; Goryachkin V. P., 1973).

**Матеріали і методи досліджень.** Основний обробіток ґрунту має задовольняти такі вимоги, як:

- дотримання встановленої глибини;
- відсутність огріхів;
- достатнє (якісне) розпушування ґрунту;
- якісне загортання післяжнивних залишків, бур'янів, добрив.

При цьому слід дотримуватися заданої заводом-виробником техніки витрат палива та отримувати дійсні показники, заявлені заводом щодо зносостійкості деталей.

Умови оптимізації процесу оранки плугом з відвалами TEKRONE здійснено з використанням плуга ПЛН-3-35 з набором елементів для переобладнання (рис. 1).

**Результати.** Після переобладнання плуга його робочі органи, на перший погляд, є незмінними, однак одразу є помітною перевага регулювання кута відвалу за рахунок розпорного механізму, що служить відразу для досягнення двох цілей – регулювання кута та як упор для відвалу у процесі роботи агрегату (рис. 2).

Процес роботи плуга з композитними відвалами є звичним і майже нічим не відрізняється від роботи плуга з металевими відвалами. Однак, відчутною відмінністю роботи плуга з так званими «пластиковими» відвалами є якість обробітку ґрунту. Вона характеризується кількома факторами. Серед них:

- залипання/незалипання робочих органів при роботі на вологих ґрунтах;
- якісно підібраний кут відвалу;
- ковзання оброблюваного шару ґрунту об поверхню відвалу.

Також слід відмітити поведінку безпосередньо трактора, з яким агрегується плуг. Серед помітних змін зафіксовано:



Рис. 1. А – залізний відвал; Б – композитний відвал Текроне та додаткові елементи



**Рис. 2. Робочі органи плуга після встановлення відвалів Tekrone**

- значно менша витрата палива;
- менша завантаженість двигуна;
- менший показник пробуксовування.

Дослідження, проведені на вологій поверхні ґрунту після дощової погоди, засвідчили, що композитні відвали не залипають вологим шаром ґрунту, що є характерним для металевих відвалів (рис. 3).

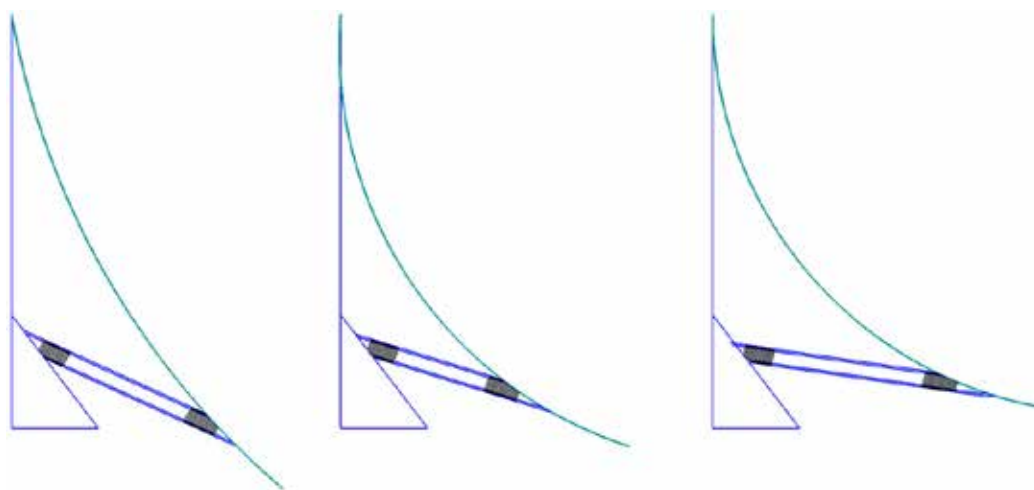
Із рисунку 3 чітко видно те, наскільки залипає вологим ґрунтом опорне колесо плуга, що є залізним і ступінь залипання робочих органів. Як бачимо, відвали Tekrone мають гарні показники для роботи на вологих ґрунтах за рахунок матеріалу, з якого вони виготовлені. При цьому

значно краще відбувається ковзання шару ґрунту по поверхні відвалу, що також є причиною незалипання його поверхні.

Підбір кута відвалу, що досягається за рахунок розпорного механізму, також є немалою важливою перевагою таких відвалів. На плугах з металевими відвалами таку опцію можна отримати лише частково за рахунок установки додаткових шайб між башмаком корпусу та самим відвалом. Однак, дана опція реалізується у межах кількох міліметрів, що іноді не є достатнім. Порівнюючи із розпорним механізмом на композитних відвалах, регулювання кута може сягати кількох сантиметрів.



**Рис. 3. Композитні відвали при роботі на вологих ґрунтах**



**Рис. 4. Регулювання кута композитного відвалу**

Особливо важливо це при роботі на важких ґрунтах, де пошкодження стійки плуга (наприклад, вигинання її) призводить до неможливості рівномірного та однакового обробітку землі усіма корпусами плуга. В результаті регулювання кута можна здійснювати зміну положення відвалу, а, відповідно, – і докидання, перекидання та розпушування ґрунту кожним, окремо узятим корпусом плуга.

Таблиця 1

**Витрата палива трактора МТЗ-80 з плугом ПЛН-3-35**

Глибина обробітку, см	Витрата палива л/га	
	Металеві відвали	Композитні відвали
18	18,5	17
20	20,1	18,3
25	22,2	20,1

В результаті досліджень з витрат палива трактором МТЗ-80 з «пластиковими» відвалами виявлено, що витрата палива на 1 га зменшується в середньому на 1,5–2 л, порівнюючи із класичними металевими відвалами.

При цьому відчутно змінилася завантаженість двигуна трактора та можливість працювати на вищій передачі. За рахунок цього є можливість збільшення швидкості обробітку, продуктивності та більш раціонального використання фізичної праці. При збільшенні швидкості обробітку покращилося докидання ґрунту кожним з корпусів та досягається більш краще розпушування.

З рисунку 5 можна спостерігати, що ступінь залипання відвалів плуга як на вологій поверхні ґрунту, так і на сухій, – однаковий. Відвали є чистими, що сприяє якісному обробітку ґрунту.

Використання плуга з «пластиковими» відвалами для оранки з великою кількістю поживних залишків (рис. 6) має значно кращий ефект приорування решток, що знаходяться на поверхні ґрунту. Це пояснюється покращеним ковзанням як шару ґрунту, так і решток, що знаходяться на ньому, по відвалам. Класичні залізни відвали мають значно менші показники проковзування матеріалу по їхнім стінкам, а це є їх недоліком в порівнянні з «пластиковими відвалами». За рахунок кращого ковзання шару ґрунту відбувається перевертання більш якісно та рівномірно. Крім того, як зазначалося вище, за рахунок зменшення завантаженості є можливість збільшення швидкості обробітку, що також значно покращує виконання головних функцій основного обробітку ґрунту. В результаті проведених досліджень виявлено, що навіть найбільші за розмірами залишки кукурудзи з довжиною стебла 70 см приоруваються повною мірою.

Після використання відвалу на площі 80 га товщина стінки відвалу залишилася незмінною. Помітними є лише окремі потертості на відвалах при контактуванні з твердим шаром, що періодично залишає свій слід, або з камінням чи металічними частками, що присутні в оброблюваному шарі ґрунту.

**Обговорення.** Динамічна поведінка робочих органів плуга безсумнівно несе вплив на продуктивність обробки (Lin Zhu, Shuang-Shuang Peng, Xi Cheng, Yin-Yin Qi, Jia-Ru Ge, Cheng-Long Yin, Tien-Chien Jen., 2016). Дослідження показують, що найбільш сильні ділянки зносу знаходяться на лемішах та відвалах плуга. При цьому, зони зносу посилювалися зі збільшенням робочої глибини (Luo, F., Zhu, L., Wei, M., Zhang, J., Zhu, D., & Jen, T.C., 2019). Зі збільшенням швидкості або глибини



**Рис. 5. Випробування композитних відвалів на вологому та сухому ґрунтах**



**Рис. 6. Використання плуга з композитними відвалами з великою кількістю поживних залишків**



обробітку ґрунту вібраційні реакції тракторів значно підвищуються. Коли швидкість або глибина обробітку ґрунту є постійними, найбільше вертикальне вібраційне прискорення з'являється на передній осі (Zhang, J., Yao, H., Chen, L., Zheng, E., Zhu, Y., & Xue, J., 2022).

Оптимізація робочих параметрів відвального плуга може бути реалізованою безліччю способів. З метою покращення умов ґрунту розроблявся новий триступеневий плуг з інтервалом перемішування ґрунту (Jia, H., Yu, Z., Zhang, C., Araya, K., Teramoto, C., Liu, F., Zhu, B., Meng, Q., Wang, N., Zhang, M., Wu, Z., Shi, Y., & Li, D., 2013).

Відвали, що є одними з ключових елементів корпусів плугів, здатні істотно змінити вплив на здійснення технологічної операції за рахунок своїх форми, розмірів, кута, матеріалу і т. п. Внаслідок цього, значною мірою, оптимізація передбачає покращення якості обробітку. Важливим аспектом моделі є те, що сила тяги розраховується із використанням геометричних параметрів компонентів корпусу плуга, швидкості оранки та фізичних властивостей ґрунту (Godwin, R.J., O'dogherty, M.J., Saunders, C., & Balafoutis, A.T., 2007). Чисельною моделлю на основі методу матеріальних точок є можливість дослідження впливу розміру нерівності та орієнтації відносно напрямків ковзання на поведінку оранки жорсткої еліпсоїдної нерівності. На основі такої змо-

дельованої поведінки оранки розширено аналітичну модель для розрахунку глибини оранки над доріжкою зносу та обчислення сил, які діють на контактну поверхню еліпсоїдної нерівності, що ковзає через жорстку пластикову підкладку. Результатом моделі підтверджується добре узгодження з силами тертя та глибиною оранки, вимірними у результаті експериментів оранки на змащених сталевих листах (Mishra, T., de Rooij, M., Shisode, M., Hazrati, J., & Schipper, D.J., 2020).

**Висновки.** Використання композитних відвалів TEKRONE дає можливість покращити якість обробітку ґрунту, порівнюючи із класичними металевими відвалами та здійснювати раціональні витрати на проведення процесу оранки.

В результаті дослідження виявлено:

- зменшення витрат палива на 1,5 – 2 л/га в залежності від глибини обробітку;
- відсутність залипання відвалів при роботі на вологих ґрунтах;
- якісне приорювання поживних залишків;
- можливість регулювання кута відвалу;
- відносна довговічність робочих органів.

Таким чином, композитні відвали TEKRONE є перспективою для розвитку сучасних сільськогосподарських агрегатів.

#### **Бібліографічні посилання:**

1. Kuzina, T., Sirenko, V.Y., Zubko, V., & Chuba, V. (2018). Increasing yields of winter wheat by means of sowing orientation of grain. Engineering for rural development. DOI:10.22616/ERDev2018.17.N387
2. Yanxin Yin, Shuxia Guo, Zhijun Meng, Wuchang Qin, Bin Li, Changhai Luo . (2018). Method and System of Plowing Depth Online Sensing for Reversible Plough. IFAC-PapersOnLine Volume 51, Issue 17, 2018, P. 326-331. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.199>
3. Lobachevsky Y. P., Liskin I. V., Panov A. I., Aldoshin N. V., Plyaka V. I. and Lylin N. A. (2021). Ploughing quality and energy consumption depending on plough bodies type. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1030. 012154. doi:10.1088/1757-899X/1030/1/012154
4. Ucgul M., Saunders C. and Fielke J. M. (2017). Discrete element modelling of tillage forces and soil movement of a one-third scale mouldboard plough Biosystems Engineering 155 pp. 44–54.
5. Mazitov N. K., Lobachevsky Y. P., Dmitriev S. Y., Sakhapov R. L., Sharafiev L. Z. and Rakhimov I. R. (2015). Upgraded technology and equipment for soil processing and sowing in extreme conditions Russian Agricultural Sciences 41(1) pp. 75–79.
6. Nuțescu C., Gageanu I., Cujbescu D. (2021). Theoretical considerations on the optimization of the working process of variable width ploughs. INMATEH - Agricultural Engineering . 2021, Vol. 65 Issue 3, p129-138. 10p. <https://doi.org/10.35633/inmateh-65-14>
7. Yongjie Ma, Zhiqian Lan, Kaige Zhang, Bangyao Li, Wende Zheng, Yanming Gao, Jianshe Li, Xueyan Zhang. (2021). Effects of Plough Layer Thickness on Soil Nutrients and Cucumber Root Development. Scientia Horticulturae (IF3.463), Pub Date : 2021-08-24, DOI: 10.1016/j.scienta.2021.110498
8. Fenta, H.M.; Hussein, M.A.; Tilahun, S.A.; Nakawuka, P.; Steenhuis, T.S.; Barron, J.; Adie, A.; Blummel, M.; Schmitter, P. (2022). Berken plow and intercropping with pigeon pea ameliorate degraded soils with a hardpan in the Ethiopian Highlands. Geoderma, 407, 115523. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115523>
9. Hadi Azimi-Nejadian, Seyed Hossein Karparvarfard, Mojtaba Naderi-Boldaji (2022). Weed seed burial as affected by mouldboard design parameters, ploughing depth and speed: DEM simulations and experimental validation, Biosystems Engineering. DOI: 10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2022.02.005
10. K. Chandra Mouli, S. Arunkumar, B. Satwik, S.BhargavaRam, J.Rushi Tej, A.SaiChaitanya. (2018). Design of Reversible Plough Attachment. Conference: International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Applications. 5 (11). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.160>
11. Bulgakov, V., Pascuzzi, S., Adamchuk, V., Ivanovs, S., Pylypaka, S. (2019). A theoretical study of the limit path of the movement of a layer of soil along the plough mouldboard. Soil Tillage Res. 195, 104406. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104406>
12. Karmakar S. and Kushwaha R. L. (2006). Dynamic modeling of soil–tool interaction: An overview from a fluid flow perspective J. of Terramechanics 43(4) pp. 411–425.
13. Ahmadi I. (2017). A power estimator for an integrated active-passive tillage machine using the laws of classical mechanics Soil and Tillage Research 171 pp. 1–8.

14. Goryachkin V. P. (1973). Collected works in three volumes vol 1 Published for the U.S. Dept. of Agriculture and the National Science Foundation, Wash., D.C. by the Israel Program for Scientific Translations Edition 2d Jerusalem
15. Lin Zhu, Shuang-Shuang Peng, Xi Cheng, Yin-Yin Qi, Jia-Ru Ge, Cheng-Long Yin, Tien-Chien Jen. (2016). Combined finite element and multi-body dynamics analysis of effects of hydraulic cylinder movement on ploughshare of Horizontally Reversible Plough. Soil and Tillage Research, Volume 163, P. 168-175. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.06.002>
16. Luo, F., Zhu, L., Wei, M., Zhang, J., Zhu, D., & Jen, T.C. (2019). Tillage Condition Effects on Soil/Plow-breast Flow Interaction of a Horizontally Reversible Plow. Procedia Manufacturing. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.045>
17. Zhang, J., Yao, H., Chen, L., Zheng, E., Zhu, Y., & Xue, J. (2022). Vibration characteristics analysis and suspension parameter optimization of tractor/implement system with front axle suspension under ploughing operation condition. Journal of Terramechanics. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2022.05.001>
18. Jia, H., Yu, Z., Zhang, C., Araya, K., Teramoto, C., Liu, F., Zhu, B., Meng, Q., Wang, N., Zhang, M., Wu, Z., Shi, Y., & Li, D. (2013). Three-stage Subsoil Interval Mixing Plough for Improvement of Planosol. Engineering in agriculture, environment and food, 6, 184-190. [https://doi.org/10.1016/S1881-8366\(13\)80007-9](https://doi.org/10.1016/S1881-8366(13)80007-9)
19. Godwin, R.J., O'dogherty, M.J., Saunders, C., & Balafoutis, A.T. (2007). A force prediction model for mouldboard ploughs incorporating the effects of soil characteristic properties, plough geometric factors and ploughing speed. Biosystems Engineering, 97, 117-129. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.02.001>
20. Mishra, T., de Rooij, M., Shisode, M., Hazrati, J., & Schipper, D.J. (2020). A material point method based ploughing model to study the effect of asperity geometry on the ploughing behaviour of an elliptical asperity. Tribology International, 142, 106017. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106017>

**Yurchenko O. Yu.**, Assistant, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

**Kolodnenko V. M.**, Senior Lecturer, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

**Tekrone composite dumps are an alternative for modern agricultural machinery**

*Plowing, as one of the types of tillage, aims to meet a number of requirements to ensure the quality of the technological operation and perform its basic functions. Among the tasks set before this operation are: compliance with the specified depth of cultivation and not exceeding the allowable deviation, the formation of the layer should be dense, the cultivated layer of soil should be loose, all available weeds and crop residues should be completely plowed, etc. n. Achieving all the goals is possible only with high-quality selection of units to perform technological operations on certain areas of soil, as well as the choice of working bodies that are variable for agricultural machinery. When considering the plow as a unit for the main tillage, it should be noted that the structural parts of the body, such as dumps, plowshares, field boards, racks have a significant impact on the quality of the process. For example, changing the shape of the dump can significantly affect the process of overturning the treated layer, as well as the prioritization of weeds and crop residues. Increasing the efficiency and reducing the energy consumption of plowing is possible by solving problems to optimize such parameters of the plow as the width of the grip, the geometry and shape of the ploughshare surface of the body. Replacing body or their dumps is a rather long and laborious process, so its implementation, depending on production and meteorological situations, which are often variable, is extremely difficult. However, the time spent on operations to optimize the process of operation of the unit, namely - the replacement of its working bodies with more energy-efficient, durable and able to improve the quality of the technological operation, is justified by the result. This paper presents an analysis of the operation of Tekrone composite dumps, which were installed on a classic plow in order to optimize the operation of the machine-tractor unit. Since this operation does not change the design of the plow, the replacement of the dumps does not require additional intervention to other structural elements. The result of optimizing the plow is to reduce fuel consumption for the plowing process, reduce engine load, the ability to work in higher gear and increase the speed of tillage. At the same time, a significant advantage of composite dumps in comparison with iron ones was revealed – non-sticking of the working surface of the dump when working on wet soils, their quick cleaning, absence of corrosion processes and improved sliding of the treated soil layer on the dump surface. As a result, it can be concluded that Tekrone composite dumps can be an alternative to improve the quality of the plowing process.*

**Key words:** plowing, adjustment, frame, plow, quality.