

ISSN 2414-3820

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Центральноукраїнський національний технічний університет

**КОНСТРУЮВАННЯ, ВИРОБНИЦТВО
ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ
МАШИН**

Загальнодержавний міжвідомчий
науково-технічний збірник

Випуск 54

Кропивницький • 2024

ISSN 2414-3820

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
Central Ukrainian National Technical University

**DESIGN, PRODUCTION
AND EXPLOITATION
OF AGRICULTURAL MACHINES**

National Interagency Scientific
and Technical Collection of Works

Issue 54

Kropyvnytskyi • 2024

УДК 631.3.001.1 (082)

Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. 2024. Вип. 54. 226

В збірнику викладені питання конструювання, розрахунку, удосконалення, створення і дослідження нових робочих органів сільськогосподарських машин, засобів механізації, електрифікації та автоматизації сільськогосподарського виробництва. Наведені результати досліджень в галузі технологій виробництва і експлуатації машин та забезпечення їх надійності і довговічності. Викладені практичні рекомендації по використанню результатів досліджень і дослідно-конструкторських розробок в сільськогосподарській і інших галузях машинобудування. Збірник розрахований на наукових та інженерно-технічних працівників науково-дослідних установ, ВНЗ, конструкторських організацій та промислових підприємств.

Рекомендовано до друку Вченою радою Центральноукраїнського національного технічного університету, протокол від 02 грудня 2024 року № 3

Редакційна колегія:

Черновол М.І., д.т.н., проф. – головний редактор;
Сало В.М., д.т.н., проф. – заст. головного редактора;
Амосов В.В., к.т.н., доц. – відповідальний секретар;
Алієв Е.Б., д.т.н., ст. докл.;
Алфьоров О.І., д.т.н., проф.;
Аулін В.В., д.т.н., проф.;
Васильковська К.В., к.т.н., доц.;
Васильковський О.М., к.т.н., проф.
Дідух В.Ф., д.т.н., проф.;
Кірчук Р.В., к.т.н., проф.;
Кириченко А.М., д.т.н., проф.;
Коваленко О.В., д.т.н., проф.;
Кропівний В.М., к.т.н., проф.;
Лещенко С.М., к.т.н., доц.;
Мацуї А.М., д.т.н., проф.;

Мелешко Є.В., д.т.н., проф.;
Мороз М.М., д.т.н., проф.;
Надикто В.Т., д.т.н., проф.;
Осадчий С.І., д.т.н., проф.;
Пастухов В.І., д.т.н., проф.;
Петренко Д.І., к.т.н., доц.;
Сайчук О.В., д.т.н., проф.;
Степаненко С.В., д.т.н., с.н.с.;
Харченко С.О., д.т.н., доц.;
Шепеленко І.В., д.т.н., проф.;
Anas M. Al-Oraiqat, D.Sc. (Королівство Саудівська Аравія);
Iurie Melnic, Ph.D., Associate Professor (Молдова);
Juozas Padgurskas, Dr., Professor;
Pošta Jozef, Ph.D., Professor (Чехія);
Predrag Dašić, Hon.D.Sc. (Сербія);
Andrii Yatskul, Ph.D., Associate Professor (Франція).

Адреса редакційної колегії: 25030, м. Кропивницький, проспект Університетський, 8,
Центральноукраїнський національний технічний університет, тел.: +380 (522) 390-581, +380 (522) 390-472, +380 (522) 55-10-49.

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

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

Заснований у 1971 р.

Включений до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватись результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук з технічних наук (бюлетень ВАК №5 від 2010р., накази Міністерства освіти і науки України від 21 грудня 2015 року №1328, від 07 листопада 2018 року №1218, від 02 липня 2020 року № 886).

Категорія «Б»

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

Ідентифікатор медіа: **R30-03925** (рішення Національної ради України від 25.04.2024 р. № 1418).
2414-3820 (Print) 2664-9136 (e) DOI: 10.32515/2414-3820

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.7

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.3-11>

В.Я. Ошовський, доц., канд. техн. наук, **І.А. Капура**, канд. техн. наук, **О.В. Шостак**, ст. викл.

*Первомайський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Первомайськ, Україна
e-mail: oshovskyikt@ukr.net*

Перспективність сучасних методів стикового електрозварювання для виготовлення заготовок і ремонту колінчастих валів

Пропонується виготовлення колінчастих валів зварюванням з попередньо виготовлених щік з половинками шийок, або щік і шийок автоматизованими електростиковими методами: невеликих валів - з пульсуючим оплавленням зварюваних поверхонь, а великих з оплавленням керованою дугою, що обертається по спіралі Архімеда під дією радіального магнітного поля соленоїдів. Такі методи підвищать продуктивність і якість виготовлення і ремонту колінчастих валів в умовах машинобудівних та ремонтних підприємств.

колінчастий вал, шийки, щоки, кування, електроконтактне зварювання, зварювання обертовою дугою

Постановка проблеми. Колінчасті вали двигунів внутрішнього згорання працюють порівняно з іншими деталями у важких експлуатаційних умовах. Різні динамічні сили, скручуючі моменти та згин різноманітно діють на окремі частини вала - на щоки та рамові і мотильові шийки. Так, щоки повинні мати достатню міцність та в'язкість, а шийки – високу міцність та зносостійкість поверхонь. Залежно від потужності колінчасті вали можуть мати різну кількість корінних шийок та шатунних, розташованих під кутами 180° , 120° або 90° , а також противаги та фланець, тому їх відносять до самої високої групи складності. Спосіб виготовлення заготовки колінчастого вала вибирають залежно від його матеріалу, конструкції і маси. З конструкційної сталі заготовки виготовляють обробкою тиском.

Вали невеликої маси з розташуванням шатунних шийок під кутами штампують за декілька переходів, спочатку - з розташуванням корінних і шатунних шийок в одній площині, а потім на викрутних пресах розташовують шатунні шийки під кутами. Це сприяє значним геометричним недолікам виготовлення та збільшенню припусків.

Якщо неможливо виконати штампування в одному штампі, то послідовно штампують кожну секцію валу окремо, а потім калібрують всі секції в одному штампі

Заготовки крупних колінчастих валів виготовляють вільним куванням на гідравлічних пресах великої потужності, які є тільки на спеціалізованих підприємствах. Технологічний процес кування складається зі значної кількості переходів – надруб, протягання і обтиску рамових шийок та ін. [1, с. 165]. При цьому кожна шатунна шийка для спрощення кування з'єднується з двома щоками великим напуском, який потім вирізають, що зменшує коефіцієнт використання матеріалу до 0,2...0,25. Окрім

того, вирізання напусків є суттєвим недоліком з-за перерізання волокон, що зменшує втомну міцність колін і може призвести до їх руйнування. Проведено багато досліджень для усунення недоліків кування [2, 3, 4] – відповідно куванням вузькими бойками, дослідження вигину вала та «перевертання плеча», які неможливо попередити і складно усунути при практичному застосуванні.

Недоліками виготовлення крупних колінчастих валів куванням є також необхідність спеціалізованих заготівельних підприємств з потужним унікальним обладнанням та високою кваліфікацією робітників, тому ці вали неможливо виготовляти на підприємствах двигунобудування.

Кожен з методів отримання заготовок колінчастих валів обробкою тиском має свої недоліки – низьку геометричну точність виготовлення, високу трудомісткість та потребу робітників високої кваліфікації і спеціалізованих підприємств, неможливість автоматизації, що не сприяє розвитку сучасних автоматизованих технологій.

Широке використання надійних і продуктивних методів стикового зварювання залізничних рейок і трубопроводів, автоматизованих комп'ютерним керуванням, показує, що ці методи можна впровадити для виготовлення складаних колінчастих валів зварюванням з простих за складністю елементів, які можуть виготовлятися на двигунобудівних підприємствах, а також для ремонту колінчастих валів заміною зношених шийок або інших пошкоджених частин.

Тому дослідження надійних, автоматизованих і техніко-економічних способів виготовлення заготовок та ремонту колінчастих валів сучасними методами електростикового зварювання з простих частин, безпосередньо виготовлених на підприємствах двигунобудування, в заміну обробки тиском є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для електростикового зварювання досліджені і розповсюджені такі основні методи, як зварювання: опором, безперервним і пульсуючим оплавленням та дугою, керованою магнітним полем.

Зварювання опором використовують для деталей перерізом до 300 мм² [5, с. 213]. При більших перерізах не досягається достатня якість з'єднання, тому таке зварювання непридатне для виготовлення заготовок колінчастих валів.

За методом безперервного оплавлення [6] рухому плити зварювальної машини подають тільки у бік зближення стиків. Спочатку на деталі подають напругу, потім їх наближають. При дотику деталей без стиску в окремих точках виступів поверхонь з-за великої щільності струму метал при контакті швидко нагрівається з утворенням рідких перемичок, які потім вибухово руйнуються і утворюються знову. Після утворення на торцях суцільного шару рідкого металу виконують осадку деталей. При цьому частина рідкого і твердого металу разом з поверхневими плівками видавлюється із зони зварювання і утворює потовщення. Під час осадки струм виключається. В роботі [7] відмічено, що при осадці метал на торцях повинен бути у стані розплаву.

Технологія зварювання з безперервним оплавленням, яка відповідає руху однієї заготовки тільки на зближення поверхонь [6, 7], розроблена в інституті електрозварювання (ІЕЗ) ім. Є.О. Патона стала пріоритетною для зварювання газових труб великого діаметра в різних країнах світу. Її переваги – малий час зварювання, 60...200 с на один стик, труб діаметром 114...1420 мм товщиною стінки до 30 мм. Процес зварювання виконувався на спеціальному комплексі автоматизовано за розробленою програмою, що виключає суб'єктивний вплив зварювальника на якість з'єднання. Були проведені також дослідні роботи по виготовленню заготовки крупного, діаметром шийки 200 мм, колінчастого вала із штампованих одноколінних елементів. В з'єднанні після термообробки була така ж міцність, як і основного металу. Зварювання виконувалося при програмному автоматичному регулюванні параметрів. Встановлено,

що зварні колінчасті вали більш економічні, ніж виготовлені куванням. Але відмічено, що недоліком цього способу зварювання був значний розкид струму та нерівномірність нагріву при оплавленні.

Стикове контактне зварювання пульсуючим оплавленням [8, 9] відрізняється тим, що рухома плита зварювальної машини виконує при зближенні зворотнопоступальний рух з частотою 3...45 Гц і амплітудою 0,1...0,8 мм. При зміні зазору між торцями виникає сильне дугоутворення, яке забезпечує рівномірність оплавлення поверхонь. За цим методом можна зварювати поверхні товщиною більше 10000 мм², а необхідна потужність і витрати електроенергії в 3...5 раз менші, ніж при зварюванні опором. В роботі [8] досліджена точність відтворення допустимих параметрів зварювання залізничних рейок для таких допустимих меж основних параметрів: час зварювання 60...100 с; швидкість оплавлення 0,07...0,20 мм/с; припуск на оплавлення 12...18 мм; напруга на оплавленні 250...360 В; напруга до осаджування 355...440 В; швидкість осаджування 30...80 мм/с; припуск осаджування 11,5...17 мм; час осаджування 1...2 с.

На основі досліджень і розробок ІЕЗ [9] Каховський завод електрозварювального устаткування випустив ряд машин для контактного стикового зварювання рейок з метою отримання безстикових залізничних колій. Так, у 2020 році завод поставив Укрзалізниці сучасні мобільні рейкозварювальні комплекси, які дозволили зварювання прямо на залізничному шляху [10].

Високі результати отримані при зварюванні трубчастих деталей дугою керованою магнітним полем [11]. Так, в роботі [12] наведені результати дослідження зварювання обертовою дугою, керованою магнітним полем, труб діаметром до 320 мм завтовшки до 16 мм з високоміцних сталей. Розроблені програми керування дугою для рівномірного нагріву, оплавлення і перемішування розплаву на торцях труб скануванням обертової дуги на площі від внутрішнього до зовнішнього діаметра торців, які забезпечують якісне зварювання без наступної термічної обробки. Експериментально встановлено, що температура розплаву при швидкому переміщенні дуги досягає 1700°C. Тому при осадці в інтервалі кристалізації 1700...1370°C розплавлений метал повністю витискується із зони стику разом з оксидами. Мінімальна товщина розплаву отриманого обертовою дугою складає 0,6 мм. Струм складає 200...250 А, напруга 25 В. Швидкість обертання дуги і температура розплаву до осадки швидко збільшувались. Розплав спочатку утримувався на поверхні торців, а при досягненні певної товщини починав обертатися з невеликою швидкістю в напрямку дуги під дією електродинамічних сил і тиску газу в дуговому зазорі. Це забезпечувало перемішування розплаву перед осадкою. В момент осадки рідкий метал видавлювався зі стику, а зерна металу в зоні термічного впливу роздрібнювались. В роботі [13] визначені оптимальні умови переміщення дуги у вузькому зазорі при виробництві гідроциліндрів діаметром 200 мм при товщині стінки 10 мм. Продуктивність машини зварювання трубчастих деталей МД-205 складала 80 стиків за годину, споживана потужність 40 кВт, маса машини 1500 кг. В роботі [14] з метою економії ресурсів розроблена і досліджена комп'ютерна програма, яка визначала оптимальні параметри зварювання для отримання якісних з'єднань.

Дослідження зварювання рейок і трубчастих деталей підтверджують можливість впровадження деяких удосконалених методів для виготовлення заготовок колінчастих валів з простих частин та ремонту валів заміною дефектних частин в заміну від деяких непродуктивних існуючих технологій.

Постановка завдання. Метою дослідження є аналіз сучасних методів електростикового зварювання перспективних для технологій виготовлення складаних

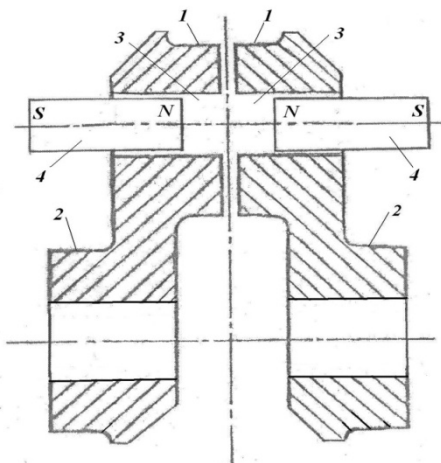
заготовок колінчастих валів, що відзначаються високими продуктивністю, коефіцієнтом використання матеріалу, якістю, надійністю та можливістю виготовлення на двигунобудівних підприємствах за автоматизованими технологіями з комп'ютерним керуванням всіма стадіями процесу.

Виклад основного матеріалу. Аналіз наукових досліджень і накопиченого світового досвіду щодо існуючих видів електростикового зварювання показує, що найбільш ефективними за техніко-економічними показниками для виготовлення заготовки вала з простих частин та ремонту заміною дефектних частин є зварювання з пульсуючим оплавленням та обертовою дугою керованою магнітним полем.

За методом пульсуючого оплавлення струм легко регулюється зміною напруги при переміщенні рухомої частини деталі. До впровадження пульсуючого методу, тобто безперервним оплавленням, потрібна була термічна обробка зони зварювання та її термічного впливу для усунення мікроструктури голчастого мартенситу або бейніту, які сприяють утворенню внутрішніх напружень.

Слід відзначити, що на етапі оплавлення спостерігалось нерегульоване утворення дуг на різних ділянках поверхонь. Дуги звичайно утворюються в першу чергу на самих близьких відстанях між поверхнями, пов'язаними з їх геометричними відхиленнями форми – хвилястості та шорсткості. Нерегульоване утворення дуг зменшує швидкість оплавлення поверхонь, тому що частина їх нагрівається швидко плямами дуг, а частина – за рахунок теплопровідності металу поверхневого шару. Такий нерегульований процес збільшує час нагріву і оплавлення на локальних частках поверхонь, що сприяє утворенню зони термічного впливу.

Пропонується зменшити час і рівномірність оплавлення та підвищити якість зварного шва утворенням між зварюваними поверхнями постійного магнітного поля, наприклад, встановленням неодимових магнітів в технологічні отвори деталей (рис. 1).



1 – половини шатунних шийок; 2 – половини корінних шийок; 3 – технологічний отвір для встановлення магнітів; 4 – неодимові магніти

Рисунок 1 – Схема розташування магнітів у штампованих елементах колінчастого вала для зварювання

Джерело: розроблено авторами

В такому варіанті зварюються елементи вала, кожен з яких містить коліно, та половини шатунної і корінної шийки. Шийки вала 1 і 2 мають технологічні отвори 3 для встановлення неодимових магнітів 4. Неодимові магніти дозволяють в імпульсних розривах рідких і твердих перемичок утворити кругові мікродуги, які будуть більш рівномірно і швидше нагрівати і плавити поверхні стику до осадки.

Вплив поля постійних магнітів на мікроструктуру і механічні властивості зварного шва та на зону термічного впливу підтверджується дослідженням на зразках сталі при їх зварюванні безперервним оплавленням в роботі [15]. Без магнітного поля у шві була отримана структура литої сталі з оксидними включеннями, а з магнітним полем в структурі були зерна фериту і перліту рівновісні з невеликою кількістю відманштеттових. Крупних зерен ЗТО не було. При випробуванні на розтяг зразок зварений без магнітного поля руйнувався в зоні термічного впливу, а з магнітним полем – в основному металі, причому в зоні шва міцність була вище.

Таке зварювання пульсуючим оплавленням високопродуктивне і може виконуватися на двигунобудівних, машинобудівних і ремонтних підприємствах. Всі процеси зварювання можуть виконуватися за спеціальними комп'ютерним програмами, що дозволяє встановлювати оптимальні параметри технологічних процесів зварювання і отримувати заготовки колінчастих валів високої геометричної точності та механічної якості. Окремі елементи вала (коліна з половинками щок або щоки і шийки) можуть виготовлятися штампуванням, литтям та обробкою різанням. Можна також виконувати ремонт колінчастих валів заміною пошкоджених або зношених шийок.

Ще більш ефективним і придатним для з'єднання поверхонь великого перерізу є метод зварювання обертовою дугою, керованою магнітним полем.

Слід відзначити, що ряд властивостей дуги в наш час ще є не досить зрозумілими з-за складності процесів, які в ній відбуваються. Але експериментально доведено, що в радіальному магнітному полі дуга, як і провідник зі струмом, може виконувати обертальний рух.

Так, експериментальні дослідження [12] показують, що радіальні силові лінії магнітного поля, які стиснуті однаковими полюсами намагнічених трубчастих поверхонь, забезпечують обертальний рух стовпа дуги постійного струму.

Якщо припустити, що в загальному радіальне магнітне поле, яке утворюється в зазорі між намагніченими зварюваними поверхнями, діє на дугу, як на провідник зі струмом, то за законами фізики вважають, що дуга обертається під дією двох сил.

Одна з них аксіальна (сила Ампера F_A , дотична), яка рухає дугу, а друга – доцентрова (сила Лоренца, F_L), яка утримує дугу за певним радіусом обертання.

Аксіальна рухома сила F_A залежить від таких параметрів

$$F_A = BIl \sin(\alpha), \quad (1)$$

де B – магнітна індукція;

I – величина струму дуги;

l – довжина дуги (відстань між зварюваними поверхнями);

α – кут між напрямом струму і силовими лініями магнітного поля.

При коловому русі зарядів у магнітному полі доцентрова сила

$$F_L = Bqv = mv^2/R, \quad (2)$$

де q – заряд частинки;

v – швидкість руху зарядженої частинки;

m – маса заряджених частинок;

R – радіус кола по якому рухаються заряди дуги під дією сили Лоренца.

З виразів 1 і 2 видно, що круговий рух дуги, а таким чином і її плям на зварюваних поверхнях в зазорі між зварюваними поверхнями в магнітному полі можна змінювати за радіусом і швидкістю переміщення.

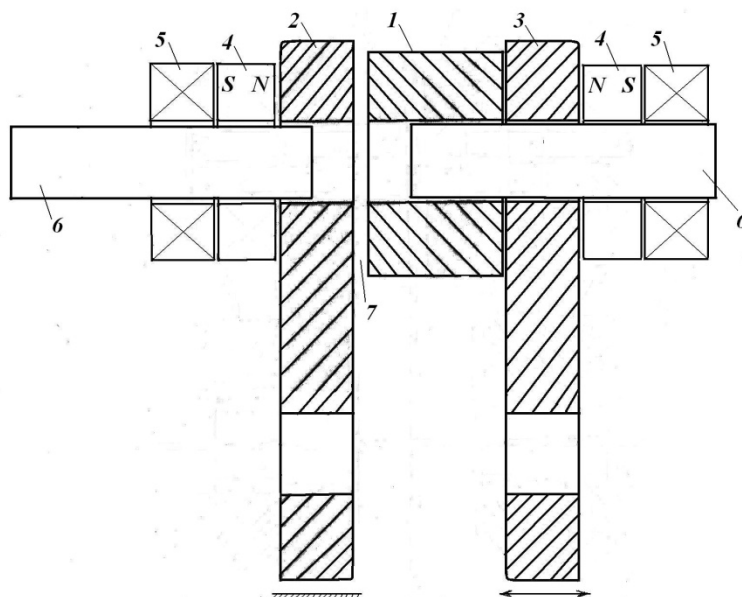
Основними параметрами, які можуть збільшувати або зменшувати швидкість руху дуги є величина струму та довжина дуги, які можуть регулюватися напругою та величиною зазору. Важливим параметром для регулювання є також індуктивність магнітного поля та напрям силових ліній поля. Кут α в основному дорівнює 90° ($\sin\alpha=1$), але при відхиленні від прямолінійності силових ліній магнітного поля може дещо зменшувати швидкість руху дуги.

При зварюванні рухома дуга повинна забезпечувати не тільки рівномірне, а й достатньо швидке нагрівання та оплавлення поверхонь необхідної товщини і температури до осадки тому, що оплавлений шар, який має температуру вище плавлення, у тривалість часу до осадки передає частку теплоти охолодження і кристалізації вглиб поверхні, що сприяє утворенню небажаної зони термічного впливу. Висока щільність і швидкість обертання дуги по архимедовій спіралі дозволить навіть уникнути утворення зони термічного впливу.

Слід врахувати також, що в точці Кюрі (для заліза 768°C) і вище сталь немагнітна, і потік магнітної індукції ослаблюється в декілька разів залежно від товщини немагнітного шару деталей. При створенні магнітного поля соленоїдами це потребує стрімкого збільшення струму в дузі і в соленоїдах при нагріві і плавленні поверхонь, а таким чином і збільшення електричної потужності зварювального обладнання.

У зв'язку з тим, що значну роль має магнітна індукція (вирази (1), (2)) пропонується дію соленоїдів підсилити постійними неодимовими магнітами.

На рис. 2 наведена схема варіанта з'єднання шийки і щік з неодимовими магнітами і соленоїдами при зварюванні обертовою дугою керованою магнітним полем.



1 – шийка шатунна; 2 – щока нерухома; 3 – щока рухома; 4 – неодимові магніти у вигляді шайб;
5 – соленоїди; 6 – стрижні з магнітної сталі; 7 – зазор між поверхнями зварювання

Рисунок 2 – Схема з'єднань при зварюванні шийок і щік

Джерело: розроблено авторами

В технологічний отвір шатунної шийки 1 з рухомою щікою 3 та в отвір нерухомої щіки 2 встановлені стрижні 6 з магнітної сталі для отримання однакових магнітних полюсів на зварюваних поверхнях та силового магнітного поля в зазорі 7 під дією неодимових магнітів 4, у вигляді шайб, та соленоїдів 5.

Неодимові магніти випускаються у вигляді круглих стрижнів або шайб різних розмірів і силової дії. Стрижневі магніти можна закріплювати в технологічних отворах, а шайби – на торцях протилежних поверхнях зварювання поза зоною температури, яка може вплинути на їх індуктивність. Регулювання індуктивності можна виконувати переміщенням магнітів, а більш точно – зміною напруги на соленоїдах. Неодимові магніти значно підвищують індукцію магнітного поля, а таким чином забезпечать більшу рівномірність і швидкість прогріву і оплавлення поверхонь, зменшать час зварювання та підвищать якість з'єднання.

ІЕЗ проведено ряд досліджень і впроваджень у виробництво автоматизованого зварювання труб керованою обертовою дугою [16, с. 191]. Так в роботі [12] теоретично і експериментально доведено, що при зварюванні товстостінних труб за розробленою програмою, що регулює струм дуги та швидкість її обертання, можна досягти скануючого кругового руху дуги між зовнішньою і внутрішньою поверхнями труби [12, с. 50], тобто руху плям дуги на зварюваних поверхнях по спіралі Архімеда. Розроблена ІЕЗ блок-схема комп'ютерної програми керування технологічним процесом і контролем якості автоматизованого зварювання труб наведена в роботі [14]. Відмічено, що програма забезпечує малий час зварювання, високу продуктивність, низькі витрати енергії і матеріалів, мінімальні припуски на оплавлення і осадку, можливість контролю процесу зварювання та інші переваги.

Неодимові магніти можуть значно підвищити індуктивність магнітного поля, а таким чином забезпечити більшу рівномірність і швидкість прогріву і оплавлення поверхонь, зменшити час зварювання, ліквідувати зону термічного впливу для отримання високої якості з'єднання, попередньо виготовлених елементів заготовки колінчастого вала або заміни дефектних його елементів при ремонті.

Висновки. Таким чином, серед сучасних методів стикового електрозварювання для виготовлення заготовки колінчастого вала з окремо виготовлених простих частин та ремонту валів заміною дефектних частин, найбільш перспективними методами є зварювання з імпульсним оплавленням та зварювання обертовою дугою, керованою магнітним полем соленоїдів при одночасному використанні додаткового магнітного поля неодимових магнітів.

Ці методи мають такі переваги порівняно з існуючими методами виготовлення заготовок та методами ремонту дефектних частин колінчастих валів: високий коефіцієнт використання матеріалу; висока геометрична і механічна якість та надійність валу; висока продуктивність та мала трудомісткість виготовлення; можливість автоматизації технологічного процесу зварювання з використанням сучасних комп'ютерних програм; можливість виготовлення заготовок на двигунобудівних і машинобудівних підприємствах. Приведені методи можуть дати значний техніко-економічний ефект при впровадженні у виробництво і сприятимуть сучасному розвитку двигунобудування.

Список літератури

1. Добрянський С.С., Малафеев Ю.М., Пуховський Є.С. Проектування і виробництво заготовок : підручник. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 353 с.
2. Клемешов Є.С. Розвиток теоретичних та технологічних основ металозаощаджувального процесу кування шатунної шийки великогабаритних колінчастих валів : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05. Дніпро : Нац. металург. акад. Укр., 2018. 158 с.
3. Milenin A., Rec T., Walczyk W., Pietrzyk M. Model of curvature of crankshaft blank during the heat treatment after forging. *Procedia Engineering, AGH Krakow*. 2014. Vol. 81. P. 498-503.
4. Miao, J. Z., Shiyao, G., Baofeng, L. Qun. Study on bending and upsetting forging 305 marine crankshafts. *Advanced Materials Research, Switzerland*. 2010. № 101. P. 337-343. DOI : 10.4028/www.scientific.net/AMR.97-101.337

5. Технологія конструкційних матеріалів : підручник: вид. 2-ге, переробл. і допов. / М.А. Сологуб, І.А. Рожнецький, О.І. Некоз та ін.; за ред. М.А. Сологуба. Київ : Вища шк., 2002. 374 с.
6. Beloev M., Khomenko V.I., Kuchuk-Yatsenko S.I. Selection of welding technologies in construction of large-diameter main pipelines. *The Paton Welding Journal*. 2013. № 10/11. P. 131-134.
7. Kuchuk-Yatsenko S.I., Shvets V.I., Didkovsky A.V., Antipin E.V., Kapitanchuk, L.M. Defects of joints of high-strength rails produced using flash-butt welding. *The Paton Welding Journal*. 2013. № 9. P. 2-8.
8. Кучук-Яценко С.І., Руденко П.М., Дідковський О.В., Антіпін Є.В. Операційний контроль процесу контактного стикового зварювання залізничних рейок методом пульсуючого оплавлення. *The Paton Welding Journal*. 2021. № 5. С. 8-14.
9. Спосіб контактного стикового зварювання оплавленням : пат. 46820 Україна : МПК В23К 11/04 (2006.01) : заявл. 28.07.1998; опубл. 17.06.2002. Бюл. №6.
10. Укрзалізниця отримала перші рейкозварювальні машини на платформі Volvo Trucks. *Rail insider*. 04.06.2020. URL : <https://www.railinsider.com.ua/ukrzaliznyczya-otrymala-pershijkozvaryvalni-mashyny-na-platformi-volvo-trucks/> .
11. Спосіб пресового зварювання дугою, керованою магнітним полем : пат. 46036 Україна, МПК В23К 9/08 (2006.01); заявл. 21.01.1998; опубл. 15.05.2002. Бюл. №5.
12. Kachinsky V.S., Kuchuk-Yatsenko S.I. Joint formation in magnetically-impelled arc butt welding of thick-walled pipes from high-strength steels. *The Paton Welding Journal*. 2017. № 8. P. 39-45.
13. Качинський В.С., Кучук-Яценко С.І., Коваль М.П. Пресове зварювання магнітокерованою дугою високоміцних сталевих трубчастих деталей гідро циліндрів. *The Paton Welding Journal*. 2020. № 1. P. 45-50.
14. Кучук-Яценко С.І., Качинський В.С., Коваль М.П. Розробка технології та обладнання для пресового зварювання трубчастих деталей в умовах виробництва з метою економії ресурсу та підвищення надійності високонавантажених виробів. *The Paton Welding Journal*. 2020. № 10. С. 3-7.
15. Chen Haidong, MA Tiejun, Zhang Yong, Zhang Xiaoyu. Microstructural analysis of mild steel joint by flash butt welding with external magnetic field. *Transactions of the China welding institution*. 2012. (2). 109-112.
16. Спеціальні способи зварювання : підручник / І.В. Кривцун, В.В. Квасницький, С.Ю. Максимов, Г.В. Єрмолаєв; за заг. ред. академіка НАН України, д.т.н., проф. Б.Є. Патона. Миколаїв : НУК, 2017. 346 с.

References

1. Dobrianskyi, S.S., Malafeev Yu.M., & Puhovskyi, Ye.S. (2014). *Design and production of blanks: a textbook*. Kyiv: NTUU «KPI» [in Ukrainian].
2. Klemeshev, Ye.S. (2018). *Development of theoretical and technological foundations of the metal-saving process of forging connecting rod journals of large crankshafts*. Thesis for the degree of candidate of technical sciences. Dnipro: National Metallurgical Academy of Ukraine [in Ukrainian].
3. Milenin, A., Rec, T., Walczyk, W., & Pietrzyk M. (2014). Model of curvature of crankshaft blank during the heat treatment after forging. *Procedia Engineering*, 81, 498-503 [in Poland].
4. Miao, J., Shiyang, Z., Baofeng, G., & Qun L. (2010) Study on bending and upsetting forging 305 marine crankshafts. *Advanced Materials Research*, 101, 337 – 343 [in Switzerland]. DOI : 10.4028/www.scientific.net/AMR.97-101.337
5. Sologyb, M.A., Rozhnetskyi, O.I., Nekoz, O.I., Gorpenyuk, M.A., & Preys, G.O. (2002). *Technology of structural materials: a textbook*. M.A. Sologyb (Ed). Kyiv: Vycha Shkola [in Ukrainian].
6. Beloev, M., Khomenko, V.I., & Kuchuk-Yatsenko S.I. (2013) Selection of welding technologies in construction of large-diameter main pipelines. *The Paton Welding Journal*, 10/11, 131-134 [in Ukrainian].
7. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Shvets, V.I., Didkovsky, A.V., Antipin, E.V., & Kapitanchuk, L.M. (2013) Defects of joints of high-strength rails produced using flash-butt welding. *The Paton Welding Journal*, 9, 2-8 [in Ukrainian].
8. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Rudenko, P.M., Didkovsky, A.V., & Antipin, Ye.V. (2021) Operational control of the process of resistance butt welding of railway rails using the pulsed arc method. *The Paton Welding Journal*, 5, 8-14 [in Ukrainian].
9. The method of resistance butt welding: Patent 46820 Україна : МПК В23К 11/04 (2006.01). (22) : 28.07.1998; (46) : 17.06.2002. Bulletin 6.
10. Ukrainian Railways received the first rail welding machines on the Volvo Trucks platform. *Rail insider*. 04.06.2020 URL : <https://www.railinsider.com.ua/ukrzaliznyczya-otrymala-pershijkozvaryvalni-mashyny-na-platformi-volvo-trucks/> .
11. Method of press welding with a magnetic field controlled arc : patent 46036 Україна, МПК В23К 9/08 (2006.01); (22) : 21.01.1998; (46) : 15.05.2002. Bulletin 5.

12. *Kachinsky, V.S., & Kuchuk-Yatsenko, S.I. (2017) Joint formation in magnetically-impelled arc butt welding of thick-walled pipes from high-strength steels. The Paton Welding Journal, 8, 39-45 [in Ukrainian].*
13. *Kachinsky, V.S., Kuchuk-Yatsenko, S.I., & Koval, M.P. (2020) Press welding of high-strength steel tubular parts of hydraulic cylinders with magnetically controlled arc. The Paton Welding Journal, 1, 45-50 [in Ukrainian].*
14. *Kuchuk-Yatsenko, S.I., Kachunskyi, V.S., & Koval, M.P. (2020). Development of technology and equipment for press welding of tubular parts in production conditions to save resources and improve the reliability of highly loaded products. Paton Welding Journal, 10, 3-7 [in Ukrainian].*
15. *Chen, Haidong, MA, Tiejun, ZHANG, Yong, & ZHANG, Xiaoyu. (2012) Microstructural analysis of mild steel joint by flash butt welding with external magnetic field[J]. Transactions of the China welding institution, 2, 109-112 [in China].*
16. *Krivtun, I.V., Kvasnytskyi, V.V., Maksymov, C.Yu., & Yermolayev, G.V. (2017). Special welding methods: a textbook. B.Ye. Paton (Ed). Mykolayiv: NUK [in Ukrainian].*

Viktor Oshovskyi, Assoc. Prof., PhD tech. Sci, **Igor Kapura**, Ph.D. Tech., Senior lecturer, **Oleksandr Shostak**, Senior lecturer
Pervomaisky Educational and Research Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Pervomaysk, Ukraine

Prospects of Modern Methods of Butt Welding for the Manufacture of Blanks and Repair of Crankshafts

The purpose of the study is to analyze modern productive automated methods of electrostatic welding that are promising for technologies for manufacturing blanks or repairing steel crankshafts from prefabricated parts to replace stamping, forging, and other unproductive methods, as well as to increase material utilization, quality, reliability, and the possibility of implementing these methods at engine-building enterprises.

It is noted that the existing stamping methods cause shape deviations when the crankshafts are twisted. And when forging large shafts, due to the need to simplify the workpiece, adjacent jowls and connecting rods are combined with large overlaps, which contribute to a very low material utilization rate, a decrease in reliability due to fiber cutting when they are cut. In addition, there are shape errors in the heat treatment process of crankshafts - bending of the workpiece, which is a very time-consuming and costly operation, "turning the crank arm over" during the settling process, which is determined as the main defect in the shaft shape. The manufacture of large shafts requires specialized enterprises with unique pressing equipment and highly qualified workers. It is proposed to manufacture crankshafts from prefabricated journals with half journals, or journals and journals by modern methods of electrostatic welding, automated by computer control - small shafts with pulsating melting; and large shafts with melting by a controlled arc rotating in an Archimedean spiral under the action of a radial magnetic field of solenoids. To increase efficiency, it is proposed to further enhance the magnetic induction of the field with neodymium magnets.

The proposed methods of manufacturing and repairing crankshafts will increase the material utilization rate to the maximum, reduce shaft shape errors by eliminating heat treatment after manufacturing or repair, obtain high quality and reliability of shafts, and automate the manufacturing process.

crankshaft, journals, jowls, forging, resistance welding, rotating arc welding

Одержано (Received) 28.08.2024

Прорецензовано (Reviewed) 26.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

УДК 621.9

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.12-23>

В.А. Мажара, доц., канд. техн. наук, **К.К. Щербина**, доц., канд. техн. наук, **А.М. Артюхов**, доц., канд. техн. наук, **С.А. Тененика**, асист., **І.С. Шестаков**, здобувач
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: majara@ukr.net

Система автоматизованого проєктування технологічного оснащення

В статті наведені результати розробки САПР типового технологічного оснащення. Було проведено аналіз типових затискних пристроїв, що дав змогу створити передумови для розробки системи автоматизованого проєктування технологічного оснащення. Розроблено блок-схеми головної програми, основної вирішувальної процедури, процедури визначення сил затиску, процедури визначення діаметра силового привода на основі яких розроблено систему автоматизованого проєктування типового технологічного оснащення. Дана система за вхідними даними розраховує діаметр силового привода який потрібен для створення затискного зусилля необхідного для утримання деталі в процесі обробки. Виконано опис компонентів, які використані при створенні головної форми проєкту та наведені приклади вигляду форм проєкту при успішному та неуспішному відпрацюванні. Використання розробленої системи дозволяє швидко і якісно виконувати проєктування затискних пристроїв. Значно скорочуються етапи виконання креслень в порівнянні з ручним методом.

затискний пристрій, технологічне оснащення, зусилля затиску, автоматизоване проєктування, діаметр силового привода

Постановка проблеми. Останнім часом в машинобудуванні намітилась тенденція розширення галузі. Розробляються і впроваджуються у виробництво багато зразків нової техніки. Для підвищення її конкурентноспроможності необхідна постійна робота, що спрямована на зниження витрат виробництва, підвищення продуктивності праці та скорочення термінів розробки нових виробів [1]. Отже добробут суспільства та його положення у світовому співтоваристві значною мірою визначаються рівнем продуктивності суспільної праці. Оскільки сучасні умови характеризуються стрімким розвитком виробництва в усіх галузях народного господарства, то це і визначає пріоритетне значення машинобудування, завданням якого є виробництво, що полегшує працю людини й підвищує її продуктивність.

Тож для підвищення продуктивності праці робітника, який проєктує технологічне оснащення було розроблено систему автоматизованого проєктування технологічного оснащення. Автоматизація проєктування технологічного оснащення сприяє зменшенню витрат матеріальних засобів і часу на його проєктування та виготовлення, а відповідно скорочення часу на виробництво нових виробів, зниження їх собівартості тощо.

Аналіз основних досліджень і публікацій. На світовому ринку САПР найбільш відомими є провідні світові виробники CAD/CAM/CAE технологій, такі як Autodesk, Bentley, Computer-Vision, IBM, Intergraph, SDRC, Unigraphics Solutions, Parametric Technology Corporation. Ці компанії, створені в різний час, займають ніші ринку, що закріпилися за ними, й відрізняються за функціональними можливостями [1].

Існуючі програмні продукти необхідно оцінювати не тільки за функціональними можливостями кожної системи, а й за тим, аби різні програмні пакети добре взаємодіяли один з одним, а розробник (постачальник) був надійним і міг надати кваліфіковану підтримку на всіх стадіях впровадження – від вибору оптимальної конфігурації робочих місця до післягарантійного обслуговування та різноманітних змін [8].

На сучасному ринку систем автоматизованого проектування налічується значна кількість різноманітних програмних продуктів, зокрема параметричні креслярсько-конструкторські системи з широким набором стандартних бібліотек і конструкторських додатків, системи твердотільного параметричного моделювання, системи параметричного твердотільного конструювання, системи управління інженерним документообігом, система програмування обробки на верстатах з ЧПУ [3, 7, 8].

Більшість з цих систем не призначені для ведення інженерних розрахунків, таких як, розрахунок сили затиску деталі чи розрахунок параметрів силового привода затискного пристрою. Сама методика розрахунку цих параметрів загальновідома, і досить широко та детально представлена в різних літературних джерелах [2, 6, 9, 10, 11, 14].

При аналізі літературних джерел, стосовно наявності систем для ведення вищезазначених інженерних розрахунків було виявлено, що більшість наявної інформації мають оглядовий характер, а розрахунки окремих елементів в середовищі Delphi представлені в роботах [4 та 5].

Тож проведений аналіз існуючих систем автоматизованого проектування показав, що існує значна кількість систем призначених для моделювання, але відсутні системи для проведення інженерних розрахунків. Тож вирішено побудувати власний алгоритм виконання поставленої задачі, для типових затискних пристроїв, з написанням програми в середовищі Delphi.

Постановка завдання.

Мета роботи: розробка системи автоматизованого проектування типового технологічного оснащення, що використовується при обробці деталей типу «Вали», «Втулки», «Шестерні».

Для досягнення мети, нами вирішувались наступні задачі:

провести аналіз типових затискних пристроїв з метою створення передумов для розробки системи автоматизованого проектування технологічного оснащення;

розробити блок-схеми головної програми, основної вирішувальної процедури, процедури визначення сил затиску, процедури визначення діаметра силового привода;

на основі розроблених блок-схем розробити систему автоматизованого проектування типового технологічного оснащення, яка за вхідними даними буде розраховувати діаметр силового привода, що потрібен для створення зусилля необхідного для утримання деталі в процесі обробки.

Викладення основного матеріалу. Розробку системи автоматизованого проектування типового технологічного оснащення в середовищі Delphi, яка за вхідними даними буде розраховувати діаметр силового привода почнемо з розробки ієрархії визначення діаметра силового привода (рис. 1). Також розробимо (рис. 2) блок-схему головної процедури проекту.

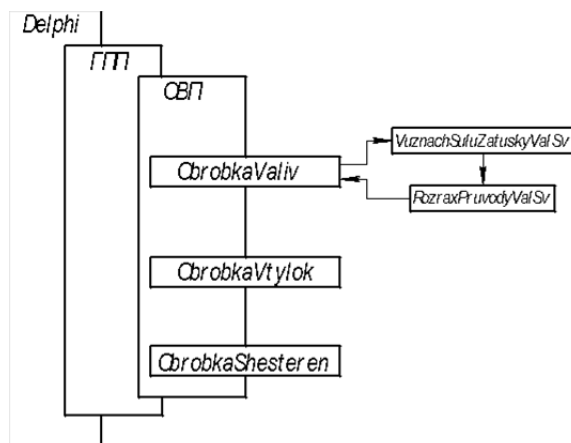


Рисунок 1 – Ієрархія визначення діаметра силового привода

Джерело: розроблено авторами

Блок-схема головної програми MAIN

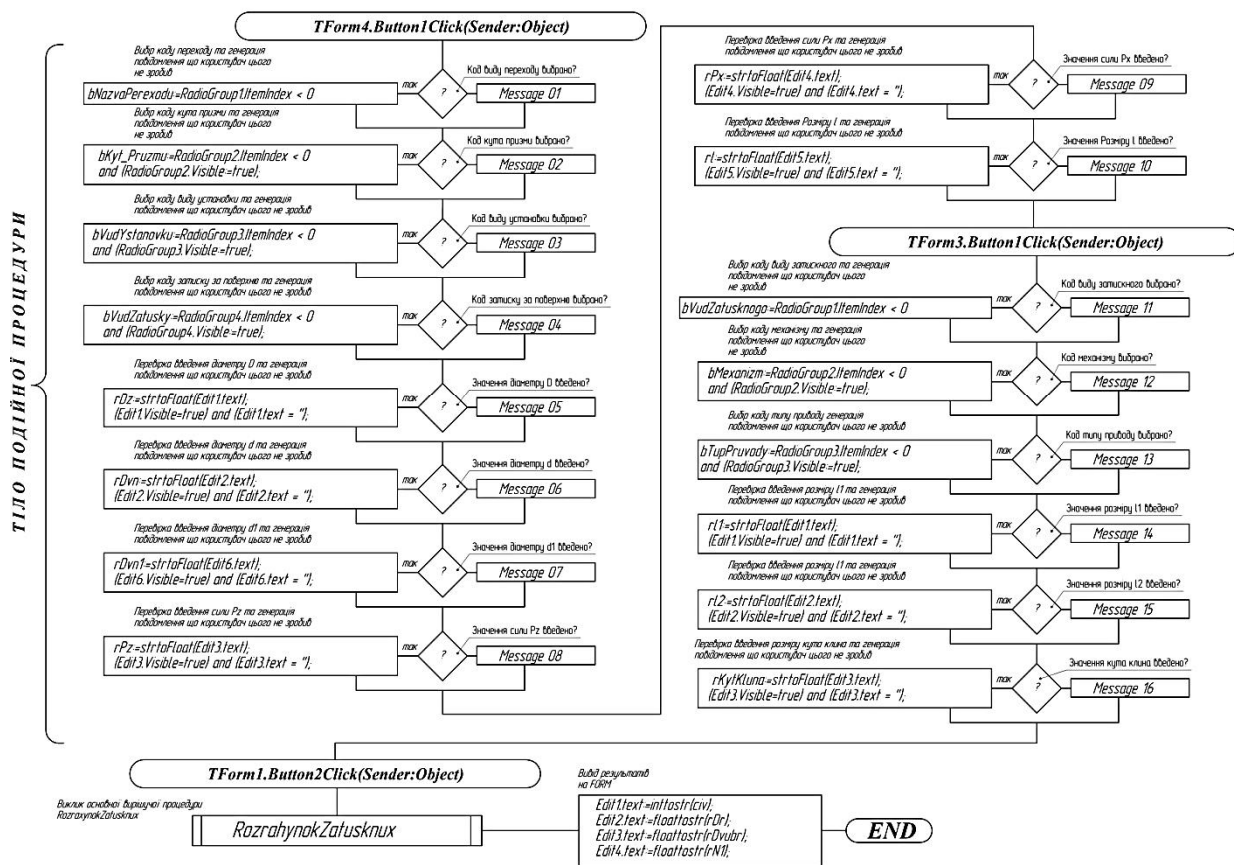


Рисунок 2 – Блок-схема головної процедури проекту (ГПП)

Джерело: розроблено авторами

В таблиці 1 наведемо процедури та їх опис.

Таблиця 1 – Процедури та їх опис

Назва процедури	Призначення та опис процедури
ГПП, або «main»	Головна процедура проекту
ОБП, або «RozrahynokZatusknux»	Основна вирішуюча процедура проекту
«ObrobkaValiv»	Процедура визначення сили затиску та діаметра силового привода для деталей класу вали
«ObrobkaVtylok»	Процедура визначення сили затиску та діаметра силового привода для деталей класу втулки
«ObrobkaShesteren»	Процедура визначення сили затиску та діаметра силового привода для деталей класу шестерні
«VuznachSuluZatuskyValSv»	Процедура визначення сили затиску для деталей класу вали на свердлильній операції
«RozraxPruvodyValSv»	Процедура визначення діаметра силового привода для деталей класу вали на свердлильній операції
«VuznachSuluZatuskyValTok»	Процедура визначення сили затиску для деталей класу вали на токарній операції
«RozraxPruvodyValTok»	Процедура визначення діаметра силового привода для деталей класу вали на токарній операції
«VuznachSuluZatuskyValFrez»	Процедура визначення сили затиску для деталей класу вали на фрезерній операції
«RozraxPruvodyValFrez»	Процедура визначення діаметра силового привода для деталей класу вали на фрезерній операції
«VuznachSuluZatuskyVtylSv»	Процедура визначення сили затиску для деталей класу втулки на свердлильній операції
«RozraxPruvodyVtylSv»	Процедура визначення діаметра силового привода для деталей класу втулки на свердлильній операції
«VuznachSuluZatuskyVtylTok»	Процедура визначення сили затиску для деталей класу втулки на токарній операції
«RozraxPruvodyVtylTok»	Процедура визначення діаметра силового привода для деталей класу втулки на токарній операції
«VuznachSuluZatuskyVtylFrez»	Процедура визначення сили затиску для деталей класу втулки на фрезерній операції
«RozraxPruvodyVtylFrez»	Процедура визначення діаметра силового привода для деталей класу втулки на фрезерній операції
«VuznachSuluZatuskyZyboobrobka»	Процедура визначення сили затиску для деталей класу шестерні на зубообробних операціях
«RozraxPruvodyZyboobrobka»	Процедура визначення діаметра силового привода для деталей класу шестерні на зубообробних операціях
«VubirKlasyDet»	Процедура визначення вхідних даних по вибору класу деталей
«VubirPerexody»	Процедура визначення вхідних даних по вибору переходу для вибраного класу деталей
«VubirZatusknogo»	Процедура визначення вхідних даних по вибору затискного пристрою, його силового механізму та виду привода по вибраному класу деталей та переходу

Джерело: розроблено авторами

Розробимо (рис. 3) блок-схему основної вирішуючої процедури.

Блок-схема основної вирішуючої процедури

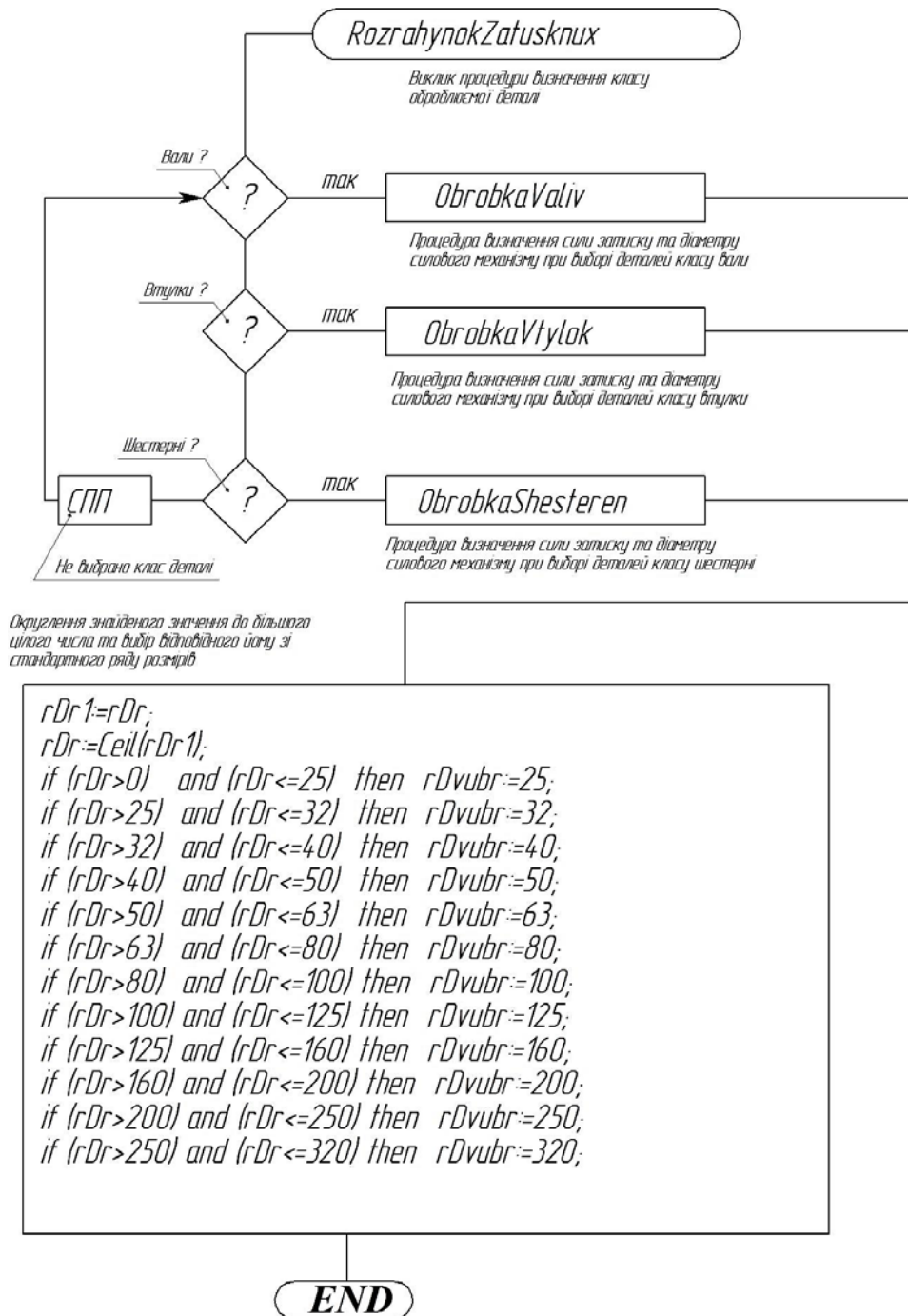


Рисунок 3 – Блок-схема основної вирішуючої процедури

Джерело: розроблено авторами

Також було розроблено блок-схеми процедур визначення сили затиску деталей різних класів на різних операціях. На рисунку 4 наведено блок-схему процедури визначення сили затиску деталей типу втулки на токарній операції.

Блок-схема процедури визначення сили затиску деталей класу втулки на токарній операції

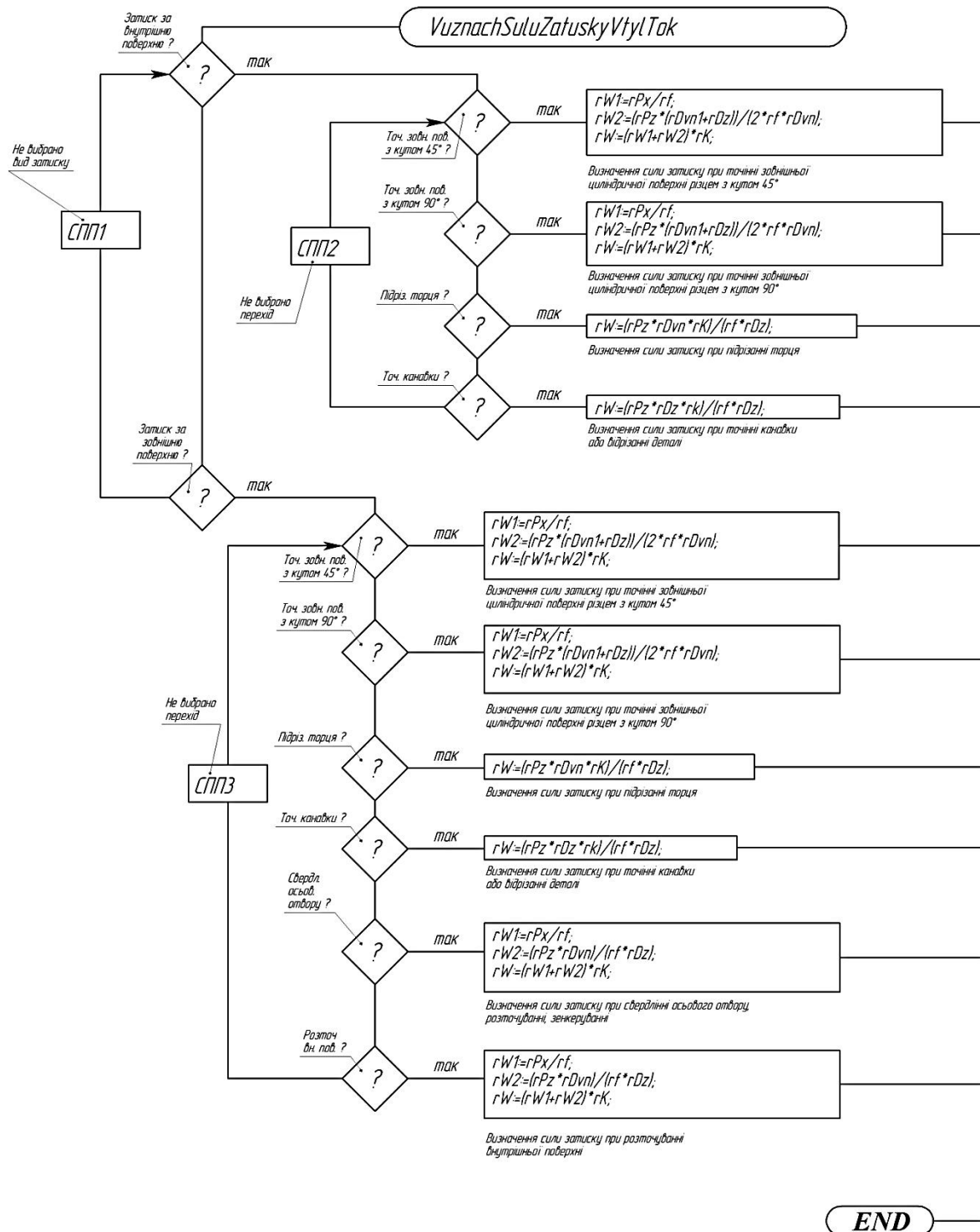


Рисунок 4 – Блок-схема процедури визначення сили затиску деталей типу втулки на токарній операції

Джерело: розроблено авторами

Також було розроблено блок-схеми процедур визначення діаметра силового механізму для обробки деталей різних класів на різних операціях. На рисунку 5

наведено блок-схему процедури визначення діаметра силового механізму для деталей класу вали на фрезерній операції.

Блок-схема процедури визначення діаметру силового механізму для деталей класу вали на фрезерній операції

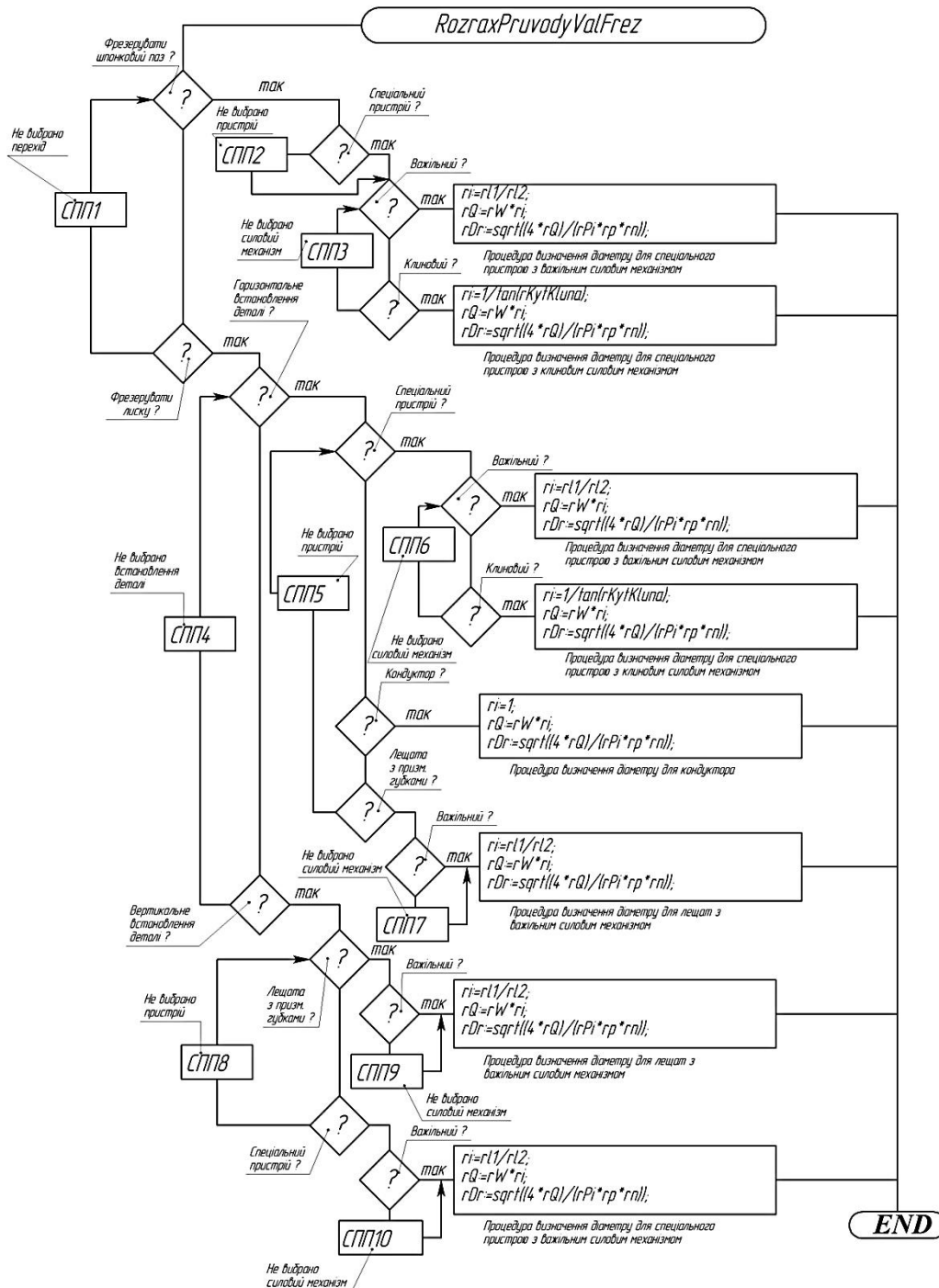


Рисунок 5 – Блок-схема процедури визначення діаметра силового механізму для деталей класу вали на фрезерній операції

Джерело: розроблено авторами

Створення головної форми проєкту здійснюється шляхом використання набору компонентів Label, Edit, ComboBox, Button, Memo, CheckBox, Panel, RadioGroup та з обов'язковим використанням пакету базових процедур Unit_dcu_integral_tech-nol_40_160606_080108.dcu.

У головній формі проєкту використовуються такі компоненти та їх властивості:

Label → Caption, Font (TFont...);

Edit → Text, Font (TFont...);

ComboBox → Text, Font (TFont...), Items (TStrings...);

Button → Caption, Font (TFont...);

Memo → Lines (TStrings...);

CheckBox → Caption, Font (TFont...), Checked;

Panel → Caption, Color;

RadioGroup → Text, Font (TFont...), Items (TStrings...).

Задані властивості компонентів мають певні абстрактні значення по замовчуванню. Для того, щоб вони відображали суть нашої задачі необхідно змінити типові значення на конкретні.

Для зміни властивостей компонентів необхідно звернутись до :

Object Inspector → Properties.

В даній головній формі проєкту:

Компонент Label → Caption використовується для запису;

Компонент Edit → Text використовується для вводу та виводу;

Компонент ComboBox → Text використовується для запису;

Компонент RadioGroup → Text використовується для запису;

Компонент Button, властивості Caption якого ми присвоюємо значення «Підрахувати», використовується для створення подвійної процедури, яка є головною в проєкті.

Компонент Memo → Lines (TStrings...) використовується для виводу ситуаційних повідомлень, які можуть бути генеровані основною вирішувальною процедурою.

Компонент CheckBox → Caption використовується для запису.

Компонент Panel → використовується як контейнер для інших компонентів, з тим щоб полегшити продукування клонів головної форми проєктів в інших проєктах. При цьому властивість Caption, яка по замовчуванню розміщуються в центрі панелі, краще очистити, а при необхідності її підписати рекомендується скористатись компонентом Label.

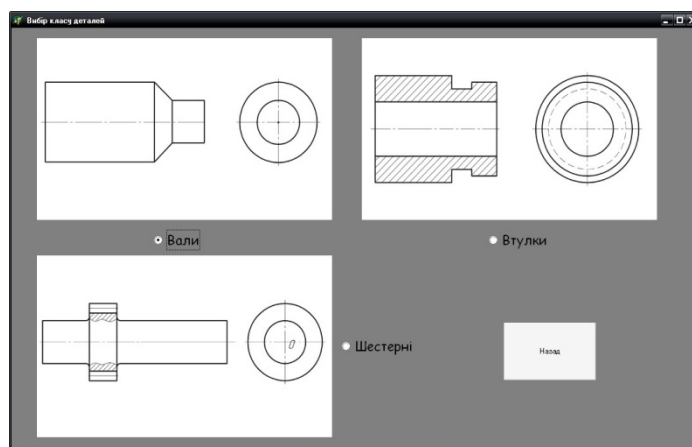


Рисунок 6 – Приклад вибору класу деталей на головній формі проєкту

Джерело: розроблено авторами

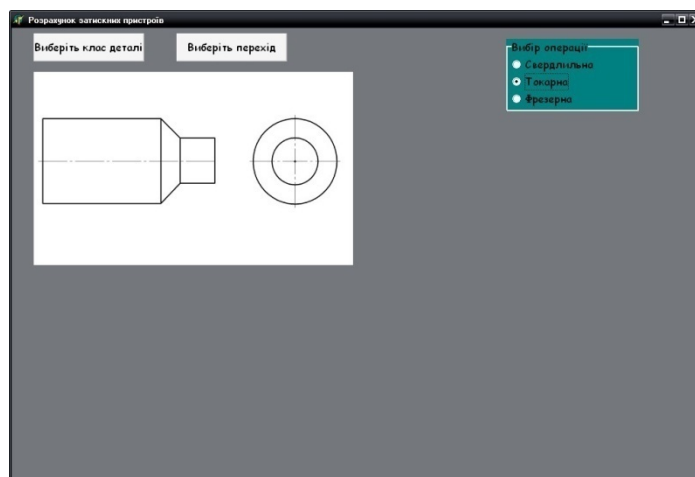


Рисунок 7 – Головна форма проекту після вибору класу деталей та операції

Джерело: розроблено авторами

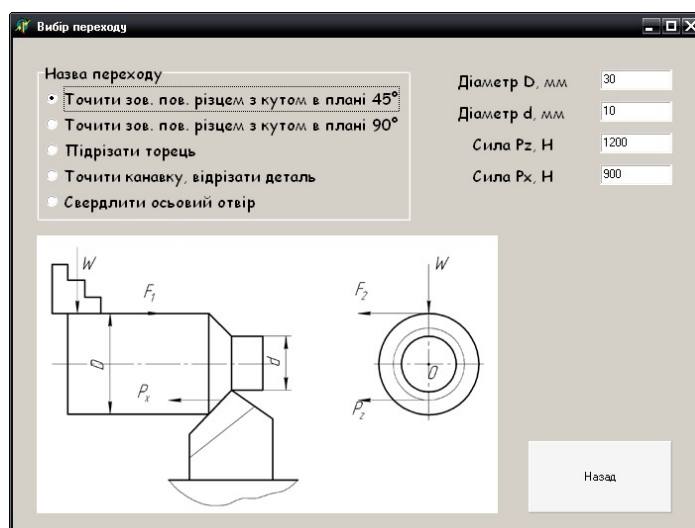


Рисунок 8 – Приклад вибору переходу на головній формі проекту

Джерело: розроблено авторами

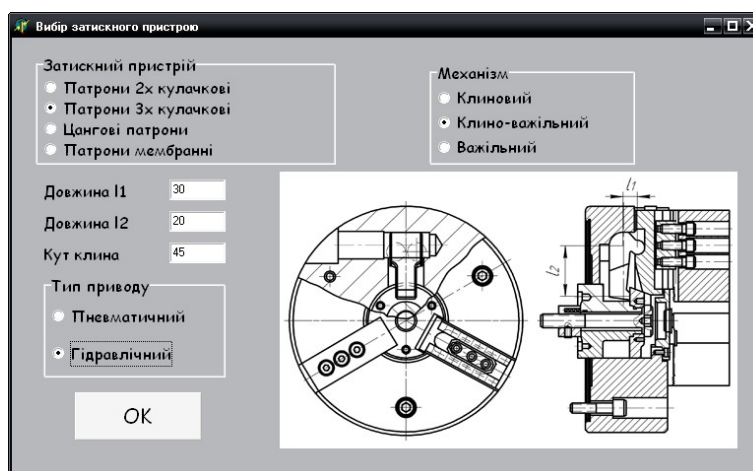


Рисунок 9 – Приклад вибору затискного пристрою на головній формі проекту

Джерело: розроблено авторами

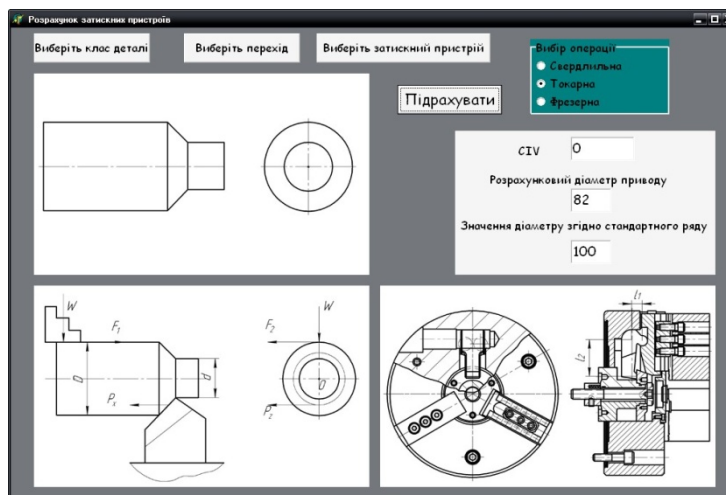


Рисунок 10 – Видгляд головної форми проекту при успішному відпрацюванні
Джерело: розроблено авторами

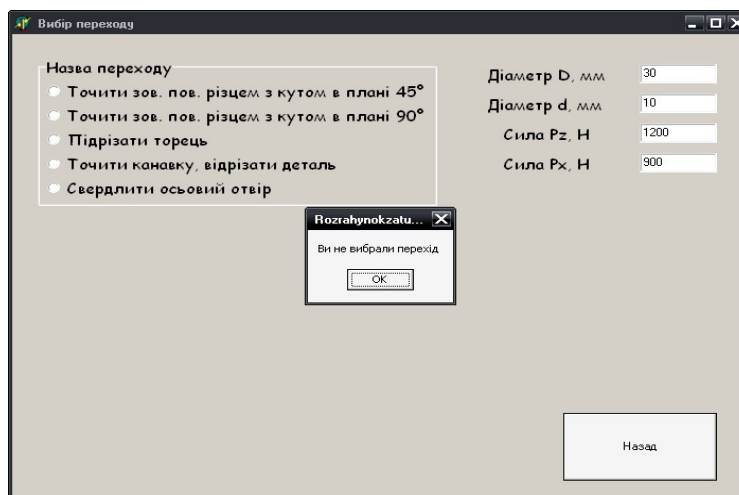


Рисунок 11 – Видгляд головної форми при одному з варіантів неуспішного відпрацювання проекту (не вибрано перехід)
Джерело: розроблено авторами

На рисунку 6 зображено форму вибору класу деталей з компонентами Image, RadioButton та Button. Після вибору класу деталей програма повертає нас на головну форму проекту, де з'являється компонент RadioGroup для вибору операції рисунок 7. На рисунку 8 зображено форму вибору переходів для обраного класу деталей, з компонентами Label, Edit, RadioGroup, Button та Image. Вибір затискного пристрою, а також силового механізму та типу привода зображено на рисунку 9. На рисунку 10 представлено вигляд програми при успішному відпрацюванні. В цьому вікні ми бачимо розрахований діаметр силового привода та відповідне йому значення зі стандартного ряду, а також значення CIV, яке рівне 0, що показує на відсутність помилок.

При некоректному зверненні до програми, вона видає відповідні повідомлення, як на рисунку 11. В даному випадку була спроба без вказання переходу порахувати діаметр силового привода.

Висновки. 1. Проведений аналіз типових затискних пристроїв, дав змогу створити передумови для розробки системи автоматизованого проектування технологічного оснащення.

2. Розроблено блок-схеми головної програми, основної вирішувальної процедури, процедури визначення сил затиску, процедури визначення діаметра силового привода на основі яких розроблено систему автоматизованого проектування типового технологічного оснащення. Дана програма за вхідними даними розраховує діаметр силового привода який потрібен для створення затискного зусилля, необхідного для утримування деталі в процесі обробки.

Використання САПР дозволяє швидко і якісно виконувати проектування затискних пристроїв. Значно скорочуються етапи виконання креслень в порівнянні з ручним методом. Автоматичним і автоматизованим методикам підготовки виробництва властива постійна готовність вихідної інформації, яка необхідна для рішення ряду задач автоматизованої системи керування підприємством.

Список літератури

1. Сиротинський О.А. Основи автоматизації проектування машин : навч. посіб. для студ. вищих навч. закладів. Рівне : УДУВГП, 2003. 252 с. URL: https://ep3.nuwm.edu.ua/13584/1/Posibn_sapr%20%281%29.pdf (дата звернення: 08.09.2024)
2. Григурко І.О., Анастасенко С.М., Будуров В.Л. Проектування технологічного оснащення : навч. посіб. для студ. вищих навч. закладів. Львів : "Новий Світ-2000", 2021. 218 с.
3. Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. Приводи затискних механізмів металообробних верстатів : монографія. Луцьк : Вежа-Друк, 2016, 352 с.
4. Безменов М. І. Основи програмування у середовищі Delphi : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2010. 608 с.
5. Коваленко І.В., Федорів П.С. Системне програмування у Windows з прикладами на Delphi : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ, 2012. 319 с.
6. Гевко Б.М., Дичковський М.Г., Матвійчук А.В. Технологічна оснастка. Контрольні пристрої : навч. посіб. Київ : «Кондор», 2008. 220 с.
7. Дичковський М.Г. Технологічна оснастка. Проектноконструкторські розрахунки пристосувань : навч. посіб. Тернопіль : ТДТУ ім. І. Пулюя, 2001. 277 с.
8. Кузнецов Ю. М., Придальний Б.І. Передумови автоматизації пошукового проектування приводів затискних механізмів. *Наукові нотатки. Вип. 55*. Луцьк : ЛНТУ, 2016. С. 216–221. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2016_55_44. (дата звернення: 11.09.2024)
9. Петров, О. В., Сухоруков С.І. Технологічна оснастка : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2018. 123 с.
10. Павленко І.І., Мажара В.А. Роботизовані технологічні комплекси : монографія. Кропивницький : Видавництво ТОВ «КОД», 2019. 384 с.
11. Дичковський М.Г. Технологічна оснастка : навчальний посібник. Київ : «Кондор», 2008. 328 с.
12. Edward G. Hoffman. Jig and Fixture Design / Edward G. Hoffman. Fifth Edition. Delmar: Cengage Learning, 2011. 369 p.
13. Боровик, А.І. Технологічна оснастка механоскладального виробництва : підручник. Київ : «Кондор», 2008. 726с.
14. Боженко Л.І. Технологія машинобудування. Проектування технологічного спорядження : посібник. Львів : Світ, 2001. 296 с.
15. Медведєв В.С., Тулупов В.І., Онишук С.Г. Технологічна оснастка : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка». Краматорськ : ДДМА, 2021. 108 с.

Referencis

1. Syrotynskiy, O.A. (2003). *Basics of machine design automation: Study guide for students of higher educational institutions*. Rivne: UDUVHP. https://ep3.nuwm.edu.ua/13584/1/Posibn_sapr%20%281%29.pdf [in Ukrainian].
2. Hryhurko, I.O., Anastasenko, S.M. & Budurov V.L. (2021). *Design of technological equipment: Study guide for students of higher educational institutions*. Lviv: Novyi svit-2000 [in Ukrainian].
3. Kuznietsov, Yu.M. & Prydalnyi, B.I. (2016). *Drives of clamping mechanisms of metalworking machines: Monograph*. Lutsk: Vezha-Druk [in Ukrainian].
4. Bezmenov, M.I. (2010). *Fundamentals of programming in the Delphi environment: Training manual*. Kharkiv: NTU «KhPI» [in Ukrainian].

5. Kovalenko, I.V. & Fedoriv, P.S. (2012). *System programming in Windows with examples on Delphi: Training manual*. Ternopil: TNTU im I. Puliuia [in Ukrainian].
6. Hevko, B.M., Dychkovskiy, M.H. & Matviichuk, A.V. (2008). *Technological equipment. Control devices : Training manual*. Kyiv : «Kondor» [in Ukrainian].
7. Dychkovskiy, M.H. (2001). *Technological equipment. Design and construction calculations of devices : Training manual*. Ternopil : TNTU im I. Puliuia [in Ukrainian].
8. Kuznietsov, Yu.M. & Prydalnyi, B.I. (2016). Prerequisites for the automation of search design of drives of clamping mechanisms. *Scientific notes*. 55, 216–221. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2016_55_44 [in Ukrainian].
9. Petrov, O.V. & Sukhorukov, S.I. (2018). *Technological equipment : Training manual*. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
10. Pavlenko, I.I. & Mazhara, V.A. (2019). *Robotic technological complexes*. Monograph. Kropyvnytskyi: TOV «KOD» [in Ukrainian]. <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/11871>
11. Dychkovskiy, M.H. (2008). *Technological equipment*. Training manual. Kyiv: «Kondor» [in Ukrainian].
12. Edward G. Hoffman. (2011). *Jig and Fixture Design / Edward G. Hoffman*. Fifth Edition. Delmar: Cengage Learning, 369 p.
13. Borovyk, A.I. (2008). *Technological equipment of mechanical assembly production*. Textbook. Kyiv: «Kondor» [in Ukrainian].
14. Bozhenko, L.I. (2001). *Mechanical engineering technology. Design of technological equipment: Manual*. Lviv: Svit [in Ukrainian].
15. Medvediev, V.S., Tulupov, V.I. & Onyshchuk, S.H. (2021). *Technological equipment: Study guide for students of speciality 131 «Applied mechanics»*. Kramatorsk: DDMA [in Ukrainian].

Vitalii Mazhara, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Kyryl Shcherbyna**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anatolii Artiukhov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Svitlana Tenenyka**, Lecturer, **Ivan Shestakov**, Student
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Automated Design System for Technological Equipment

The current conditions of production development in all sectors of the economy of Ukraine is to determine the priority importance of mechanical engineering, whose task is to produce equipment that facilitates human labor and increases its productivity. Therefore, to increase the productivity of a worker who designs technological equipment, a system of automated design of technological equipment was developed. Automated design of technological equipment helps to reduce the cost of material resources and time for its design and manufacture, and, accordingly, reduce the time for the production of new products, reduce their cost, etc.

The article presents the results of the development of a computer-aided design system for typical technological tooling used in the processing of parts such as “Shaft”, “Sleeve” and “Gear”. The analysis of typical clamping devices and methods of their calculation allowed to create prerequisites for the development of a system of computer-aided design of technological equipment in the Delphi environment. The flowcharts of the main program, the main solving procedure, the procedure for determining the clamping forces, the procedure for determining the diameter of the power drive were developed, on the basis of which a system for computer-aided design of typical technological equipment was developed, which, according to the input data, calculates the diameter of the power drive required to create the force necessary to hold the part during processing. The article describes the components, which used to create the main project form and provides examples of the project form appearance during successful and unsuccessful development.

The analysis of the calculation methods and design features of typical clamping devices made it possible to create the prerequisites for the development of a computer-aided design system for technological equipment. This system was created in the Delphi environment on the basis of the developed flowcharts and tested in various conditions. Using such systems allows quickly and qualitatively perform designing clamping devices in, at the same time much are reduced stages implementation drawings in comparisons with manual method.

clamping device, technological tooling, clamping force, computer-aided design, power drive diameter

Одержано (Received) 16.10.2024

Прорецензовано (Reviewed) 25.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

УДК 621.9.048.4

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.24-35>

О.Ф. Сіса, доц., канд. техн. наук, **В. Я. Мірзак**, доц., канд. техн. наук, **В. В. Пукалов**, доц., канд. техн. наук, **О. С. Довжук**, асп., **Д. С. Тупаленко**, асп.

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: sisoaleh@gmail.com

Удосконалення технології виготовлення зразків із ливарної високоміцної сталі 110Г13Л для металографічних досліджень та випробувань

Запропоновано прогресивну технологію виготовлення зразків із ливарної високоміцної сталі 110Г13Л для металографічних досліджень та випробувань за рахунок використання для формоутворення зразка-стрижня квадратного перерізу способу розмірної обробки електричною дугою в поперечному гідравлічному потоці робочої рідини в умовах прямого прокачування рідини крізь технологічний отвір в графітовому електроді-інструменті. За допомогою метода математичного планування експерименту (план 2^{4+1}), експериментально досліджено такі технологічні характеристики процесу РОД, як продуктивність обробки, питома продуктивність обробки, питома витрата електроенергії, шорсткість обробленої поверхні, бічний міжелектродний зазор та відносний лінійний знос графітового електрод-інструмента. Показано, що використання технології РОД зразків, порівняно з електроімпульсною обробкою, дозволяє збільшити продуктивність обробки у 8 – 10 разів.

сталь 110Г13Л, електрична дуга, гідродинамічний потік, технологічне оснащення, технологічні характеристики

Постановка проблеми. На Україні деякі заводи гірничого обладнання спеціалізуються по випуску великогабаритних конусів броні для млинів, що здрибнюють гірську породу. Звичайно конуси виготовляють із ливарної високоміцної сталі Гадфільда марки 110Г13Л. Оскільки дані деталі відповідальні та коштовні, з кожного відливка із приливу виготовляють стрижневі зразки квадратного перерізу для подальших досліджень, з метою перевірки на працездатність: що найменш, один – для заводу та один – для організації покупця цього виробу.

Виготовлення стрижневих зразків із ливарної сталі 110Г13Л пов'язано з певними технічними складностями. Дана сталь, як відомо [1–4], характеризується тим, що її висока зносостійкість поєднується з високим значенням міцності, пластичності та ударної в'язкості. Вона має такі механічні характеристики: $\sigma_e = 800 \dots 1000$ МПа, $\sigma_m = 250 \dots 400$ МПа, $\delta = 35 \dots 45$ %, $\psi = 40 \dots 50$ %. Збільшена твердість (до НВ 550 – 600) та зносостійкість поверхневих шарів конусів із цієї сталі набуває в процесі експлуатації під дією ударних навантажень і абразивного впливу, завдяки підвищеній здібності до деформаційного зміцнення високомарганцевого аустеніту. Саме тому дану сталь можна віднести до важкооброблюваних різанням матеріалів [5].

В цьому зв'язку, певний практичний інтерес являє використання для виготовлення зразків із ливарної сталі 110Г13Л електроерозійної обробки, яка здатна обробляти будь-якій електропровідний матеріал поза залежністю від його фізичних властивостей [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вибір способу електроерозійної обробки зразків, насамперед, пов'язаний з ефективністю його застосування. В свою чергу, ефективність визначається такою технологічною характеристикою, як продуктивність обробки.

Існують три основних способи електроерозійної обробки, які можуть бути застосовані для виготовлення зразків-стрижнів:

- електроіскрова обробка [7]. При її реалізації процес здійснюється виключно іскровими розрядами, а електрична енергія вводиться в робочу зону невеликими порціями (дискретно) зі шпаруватістю $q > 10$, тобто з великими паузами. Саме тому продуктивність електроіскрової обробки не перевищує сотні $\text{мм}^3/\text{хв}$. Крім того, процес супроводжується значним лінійним зносом електрода-інструмента ($\gamma_l > 40\%$);

- електроімпульсна обробка [8]. Вона реалізується за рахунок застосування спеціальних генераторів імпульсів, які забезпечують їх шпаруватість в межах $1 < q < 10$, тобто із значно меншими паузами. Це дозволило довести продуктивність електроімпульсної обробки до тисячі $\text{мм}^3/\text{хв}$. При цьому відносний лінійний знос суттєво зменшився ($\gamma_l < 1\%$);

- розмірна обробка електричною дугою (РОД) [9, 10]. При реалізації способу РОД процес здійснюється електричною дугою, яка безперервно (без пауз: $q = 1$) горить між електродом-інструментом та електродом-заготовкою, що обробляється. Оскільки електрична енергія вводиться в зону обробки безперервно, спосіб РОД забезпечує найбільшу із усіх способів електроерозійної обробки продуктивність. Так, при РОД глибоких отворів (діаметр 35 мм, глибина 2800 мм) в каландровому валку на верстаті моделі «Дуга 12», продуктивність при технологічному струмі 800 А складає 25 000 $\text{мм}^3/\text{хв}$ [9, с. 274].

Одним із факторів, що впливає на процес РОД, є гідродинамічний режим робочої рідини. В процесі обробки він виконує потрійну функцію:

- визначає енергетичний стан дуги. В роботі [11] показано, із підвищенням динамічного тиску потоку P_d (тиску в напрямку течії робочої рідини): напруженість електричного поля E та густина струму в стовпі дуги зростають;

- визначає геометричний стан електричної дуги як інструмента для розмірної обробки різних поверхонь. Із підвищенням динамічного тиску потоку P_d площа поперечного перерізу дуги S зменшується. Це дозволяє використати таку дугу для достатньо точного формоутворення поверхонь;

- відповідає за процес інтенсивного вилучення продуктів ерозії із зони горіння дуги, чим забезпечує передумови стабілізації процесу обробки поверхонь.

Однак, процес РОД квадратних стрижнів, до якого відносяться зразки із ливарної сталі 110Г13Л, не був об'єктом дослідження, а тому невідомі ефективні електричний та гідродинамічний режими і технологічні характеристики обробки, що стримує його технологічні можливості.

Постановка завдання. Як бачимо, для того, щоб мати можливість керувати процесом РОД квадратних стрижнів, треба експериментально встановити зв'язки між факторами, що обумовлюють режим обробки, та вихідними технологічними характеристиками.

Метою дослідження є будівництво математичних моделей технологічних характеристик процесу РОД квадратних стрижнів із ливарної сталі 110Г13Л.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- запропонувати новий технологічний процес РОД квадратних стрижнів;
- отримати математичні моделі продуктивності обробки M , питомої продуктивності обробки M_a , питомої витрати електроенергії a , шорсткості обробленої поверхні

Ra , бічного міжелектродного зазору δ та відносного лінійного зносу електрода-інструмента γ_L .

Методика дослідження. На підставі апріорної інформації було відібрано чотири фактора, які можуть впливати на технологічні характеристики процесу РОД квадратних стрижнів. Це: сила струму I , А; статичний тиск робочої рідини на потоку в міжелектродний проміжок $P_{ст}$, МПа; площа торцевої поверхні електрода-інструмента (площа обробки) F та висота пояса h на електроді-інструменті. В роботі застосовувалося багатофакторне планування експерименту, зокрема план 24-1, який передбачає проведення 8 основних дослідів та 4 досліді у центрі плану для визначення дисперсії дослідів. Діапазон варіювання факторів показано в таблиці 1. Усі вибрані фактори задовольняють умовам керованості, операціональності та однозначності.

Таблиця 1 – Матриця планування та результати експериментальних досліджень технологічних характеристик процесу РОД квадратних стрижнів

Фактори		I , А	$P_{ст}$, МПа	F , мм ²	h , мм	Технологічні характеристики							
Основний рівень (X_{i0})		300	1,0	3633	12,5	M , мм ³ /хв	$M_{ав}$, мм ³ /А·хв	a , кВт·год кг	Ra , мкм	δ , мм	γ_L , %		
Інтервал варіювання (ΔX_i)		200	0,2	1717	7,5								
Верхній рівень ($x_i = +1$)		500	1,2	5350	20								
Нижній рівень ($x_i = -1$)		100	0,8	1916	5								
Код		x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6		
Номер дослідів	1	Порядок реалізації	9	+	+	+	+	9150	18,30	4,07	30	0,14	3,42
	2		2	-	+	+	-	1720	17,20	4,35	20	0,07	3,10
	3		7	+	-	+	-	6040	12,08	4,41	45	0,10	2,65
	4		1	-	-	+	+	1370	13,70	4,05	25	0,16	2,00
	5		3	+	+	-	-	10450	20,90	3,52	30	0,10	1,45
	6		4	-	+	-	+	1500	15,0	4,90	14	0,15	1,02
	7		6	+	-	-	+	5710	11,42	4,65	40	0,18	0,70
	8		5	-	-	-	-	1510	15,10	3,52	16	0,13	0,50
Досліді у центрі плану	1	0	0	0	0	4680	15,60	4,20	26	0,13	1,85		
	2	0	0	0	0	4682	15,61	4,30	30	0,13	1,90		
	3	0	0	0	0	4679	15,59	3,80	24	0,14	1,80		
	4	0	0	0	0	4678	15,59	4,10	27	0,13	1,85		

Джерело: розроблено авторами

Інші параметри процесу РОД квадратних стрижнів були зафіксовані на таких постійних рівнях:

- напруга на електродах $U = 30$ В;
- склад робочої рідини: масло «Індустріальне І-20А ДСТУ 20790-05 – 50 %»; гас освітлювальний ДСТУ 4953-05 – 50 %;
- полярність обробки – пряма (електрод-заготовка – «плюс»).

Для дослідження технологічних характеристик процесу РОД квадратних стрижневих зразків із ливарної сталі 110Г13Л використовувався експериментальний електроерозійний копіювально-прошивний верстат моделі «АМ-1» (рис. 1).



1 – верстат; 2 – пульт керування; 3 – станція робочої рідини; 4 – джерело живлення технологічним струмом; 5 – пульт керування
Рисунок 1 – Електроерозійний верстат «АМ-1»

Джерело: розроблено авторами

Технологічна схема формоутворення квадратного стержневого зразка способом РОД пояснюється за допомогою креслення експериментального пристрою (рис. 2).

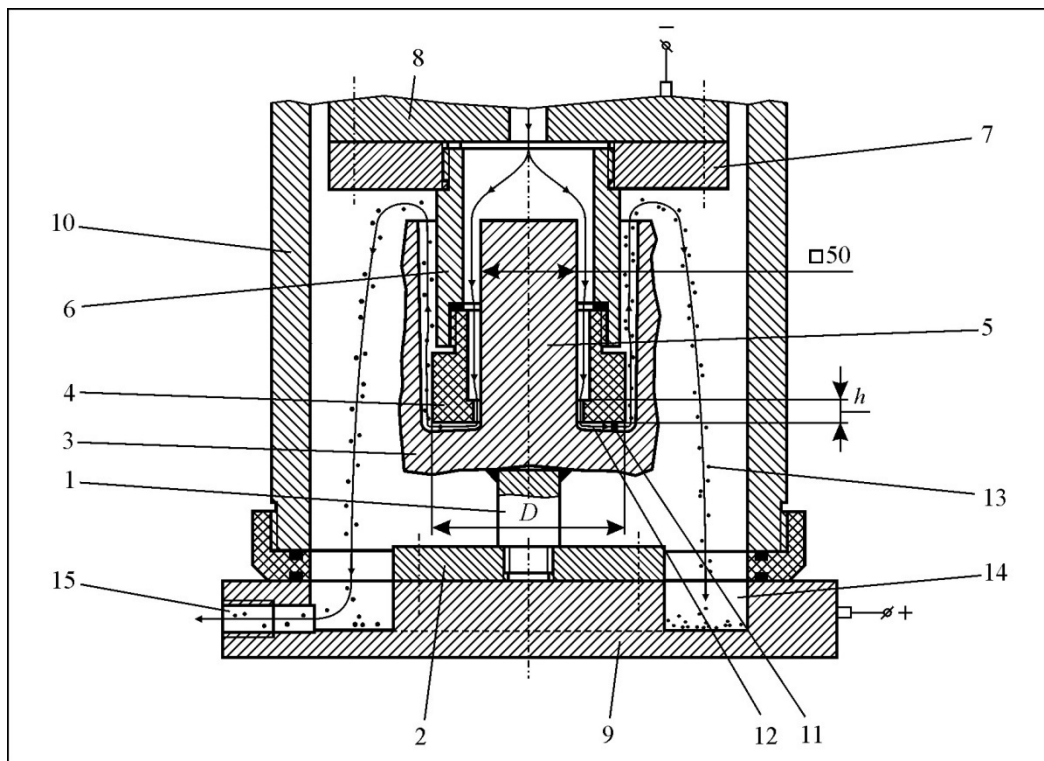


Рисунок 2 – Креслення експериментального пристрою

Джерело: розроблено авторами

Пристрій включає в себе основні деталі:

- тримач електрода-заготовки складеної конструкції, який виконано із стрижня 1 та фланцю 2, та з'єднані різьбою;
- електрод-заготовка 3, що відрізана від корпусу броні газовим різакон та приварена до стрижня 1 тримача для подальшої обробки;

- електрод-інструмент 4 кільцевої конструкції з квадратним центральним отвором для формоутворення квадратного зразка-стрижня 5, який кріпиться різьбою на електродотримачі 6;
- тримач 7 для закріплення електродотримача 6 разом з електродом-інструментом 4 на шпindelній плиті 8 верстата;
- плита 9 для закріплення фланця 2 разом зі стрижнем 1 та електродом-заготовкою 3.

Пристрій працює таким чином. Перед початком роботи герметичну камеру 10 та шпindelну плиту 8 піднімають вгору за допомогою гідроприводу (на рис. 2 не показано). На шпindelній плиті 8 закріплюють тримач 7 разом з електродотримачем 6 та електродом-інструментом 4 (рухома частина), а на плиті 9 закріплюють фланець 2 разом зі стрижнем 1 та електродом-заготовкою 3, з урахуванням центрування останніх. Далі опускають камеру 10 до фізичного герметичного контакту з верхньою горизонтальною поверхнею плити 9 та включають насос подачі робочої рідини. Робоча рідина подається в зону обробки крізь центральний отвір в шпindelній плиті 8. Реалізується зворотне прокачування. Вмикають технологічний струм та ведуть обробку електрода-заготовки 3 з формоутворенням квадратного зразка-стрижня 5. При цьому електрична дуга 11 горить в торцевому міжелектродному зазорі 12 в потужному гідродинамічному потоці робочої рідини, а продукти ерозії 13, що утворюються при РОД, інтенсивно виносяться із зони обробки спочатку у кільцеву порожнину 14 у плиті 9, і далі вилучаються із неї разом з відпрацьованою робочою рідиною через отвір 15 у фільтр та в бак станції робочої рідини верстата (на рис. 2 не показано).

Слід відмітити, що варіювання площі обробки F здійснювалося за рахунок зміни зовнішнього діаметра D електрода-інструмента 4. Так, площі обробки $F_{\max} = 5350 \text{ мм}^2$ відповідає $D_{\max} = 100 \text{ мм}$; $F_{\text{сеп}} = 3633 \text{ мм}^2$ – $D_{\text{сеп}} = 88,4 \text{ мм}$; $F_{\min} = 1916 \text{ мм}^2$ – $D_{\min} = 75 \text{ мм}$.

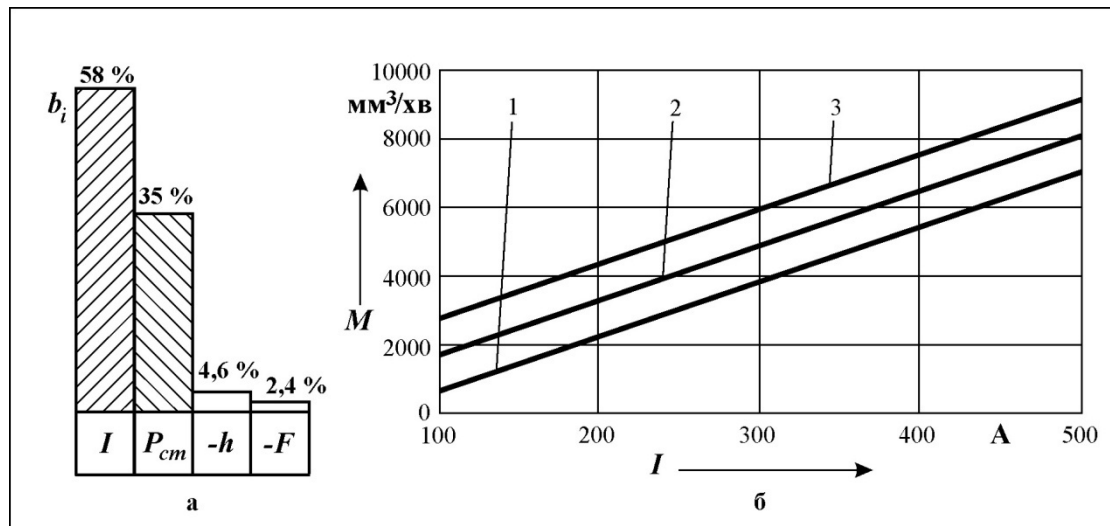
Виклад основного матеріалу. При будіванні математичних моделей технологічних характеристик процесу РОД квадратних стрижневих зразків із ливарної сталі 110Г13Л виходили із того, що значення факторів у кодовому (x_i) та натуральному (X_i) масштабах зв'язані співвідношеннями

$$x_1 = \frac{X_1 - 300}{200}; \quad (1) \quad x_2 = \frac{X_2 - 1,0}{0,2}; \quad (2) \quad x_3 = \frac{X_3 - 3633}{1717}; \quad (3) \quad x_4 = \frac{X_4 - 12,5}{7,5}. \quad (4)$$

Отримано математичну модель продуктивності обробки M (5)

$$y_1 = 4681 + 3156x_1 + 1023x_2 - 111x_3 - 249x_4. \quad (5)$$

Як бачимо (рис. 3, а), найбільш впливає на продуктивність обробки M сила технологічного струму I : ступінь впливу складає 58 %. Із підвищенням сили струму продуктивність підвищується. Останнє підтверджує теплову природу процесу РОД. Саме тому, силу струму можна розглядати як головний керуючий фактор.



1 – $P_{cm} = 0,8$ МПа; 2 – $P_{cm} = 1,0$ МПа; 3 – $P_{cm} = 1,2$ МПа

Рисунок 3 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність продуктивності обробки M від I та P_{cm} ($F = 1916 \text{ мм}^2$; $h = 5 \text{ мм}$) (б)

Джерело: розроблено авторами

Вплив на продуктивність обробки статичного тиску робочої рідини на вході в міжелектродний зазор P_{cm} трохи менший, але достатньо великий і складає 35%. Оскільки підвищення тиску приводить до підвищення продуктивності обробки стрижневих зразків, певний практичний інтерес являє процес інтенсифікації обробки за рахунок одночасного підвищення сили технологічного струму I та тиску P_{cm} . З фізичної точки зору дане явище пояснюється тим, що з підвищенням сили струму збільшується кількість продуктів ерозії в міжелектродному зазорі, що провокує їх вторинне диспергування, а підвищення тиску приводить до підвищення швидкості потоку в зазорі та інтенсифікації вилучення їх із нього і процес стабілізується.

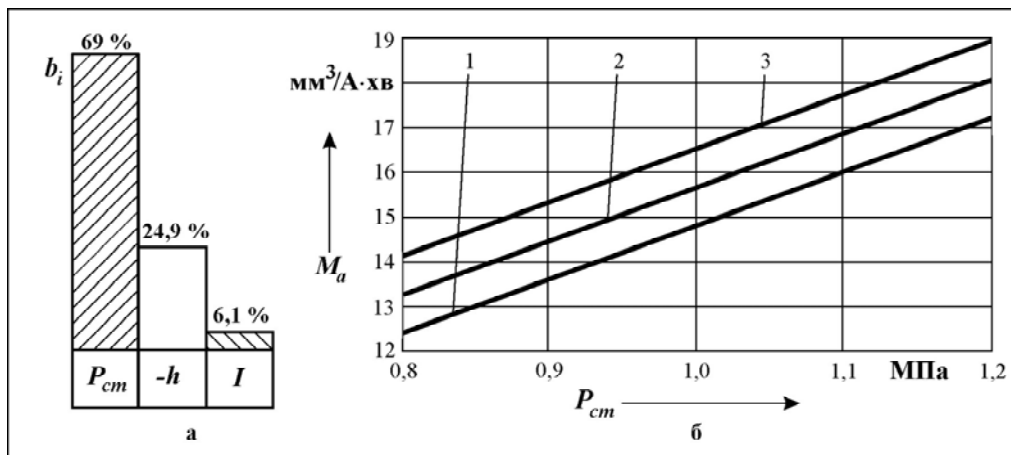
Вплив на продуктивність обробки інших факторів – незначний і складає: висота пояса на електроді-інструменті h – 4,6% та площа обробки F – 2,4%.

На рис. 3, б представлена графічна залежність продуктивності обробки M від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_{cm} . В рамках експерименту продуктивність обробки стрижневих зразків змінювалася у межах від $1500 \text{ мм}^3/\text{хв}$ до $10450 \text{ мм}^3/\text{хв}$, що перевищує продуктивність електроімпульсної обробки у 8–10 разів.

Отримано математичну модель питомої продуктивності обробки M_a (6)

$$y_2 = 15,46 + 0,21x_1 + 2,38x_2 - 0,86x_4. \quad (6)$$

Як бачимо, на питому продуктивність обробки M_a значно впливає статичний тиск робочої рідини на вході потоку в міжелектродний зазор P_{cm} . Із підвищенням статичного тиску питома продуктивність збільшується. Вплив складає 69% (рис. 4, а). Саме тому, статичний тиск можна розглядати як головний керуючий фактор. Суттєва залежність питомої продуктивності обробки від статичного тиску, також як і продуктивність обробки, пояснюється тим, що інтенсивний потік зменшує долю вторинного диспергування продуктів ерозії в міжелектродному зазорі, що є особливістю процесу РОД, його додатковим керуючим фактором. Останнє дозволяє розширити технологічні можливості процесу РОД.



1 – $h = 20$ мм; 2 – $h = 12,5$ мм; 3 – $h = 5$ мм

Рисунок 4 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність питомої продуктивності обробки M_a від P_{cm} та h ($I = 500$ А) (б)

Джерело: розроблено авторами

Вплив на питому продуктивність обробки M_a висоти пояска на електроді-інструменті h менший, але суттєвий, і складає 24,9 %. Із зменшенням величини h питома продуктивність збільшується.

Найменш впливає на питому продуктивність обробки M_a сила технологічного струму. Вплив її складає 6,1 %. А площа обробки F , як показали дослідження, статистично не впливає на M_a . Тому фактор F вилучено із моделі (6).

На рис. 4, б, представлена графічна залежність питомої продуктивності обробки M_a від двох найбільш впливових факторів: статичного тиску робочої рідини P_{cm} та висоти пояска на електроді-інструменті h . В рамках експерименту питома продуктивність обробки стержневих зразків змінювалася у межах від 15,0 мм³/А·хв до 20,9 мм³/А·хв, що перевищує питому продуктивність електроімпульсної обробки у 1,5-2 рази.

Отримано математичну модель питомої витрати електроенергії a (7)

$$y_3 = 4,184 + 0,234x_4 \tag{7}$$

За результатами дослідження, усі коефіцієнти регресії моделі, за винятком коефіцієнта при факторі h , признані статистично не значимими та вилучені із моделі. Отже, на питому витрату електроенергії впливає лише один фактор (ступінь впливу 100 %): висота пояска на електроді-інструменті h (рис. 5).

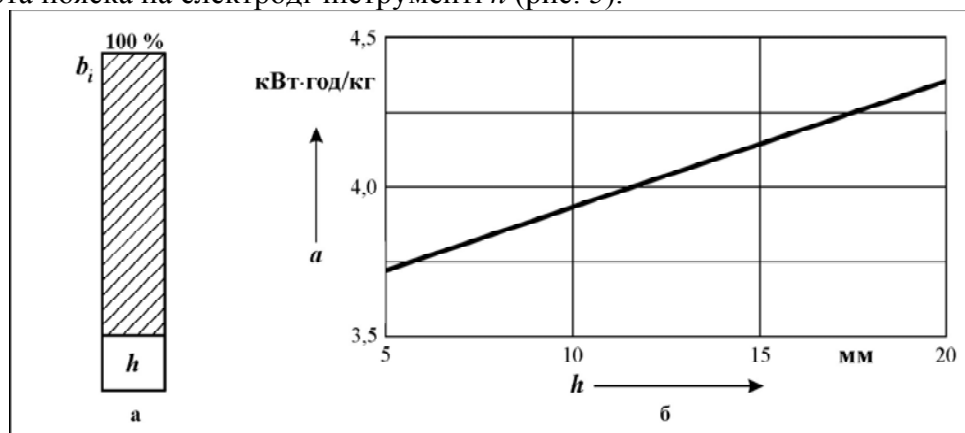


Рисунок 5 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність питомої витрати електроенергії a від h (б)

Джерело: розроблено авторами

З фізичної точки зору, висота пояска h (див. рис. 2) обмежує довжину бічного міжелектродного зазору, в якому можуть виникати холості (не робочі) електричні розряди, які споживають електроенергію, але не руйнують торцеву поверхню деталі.

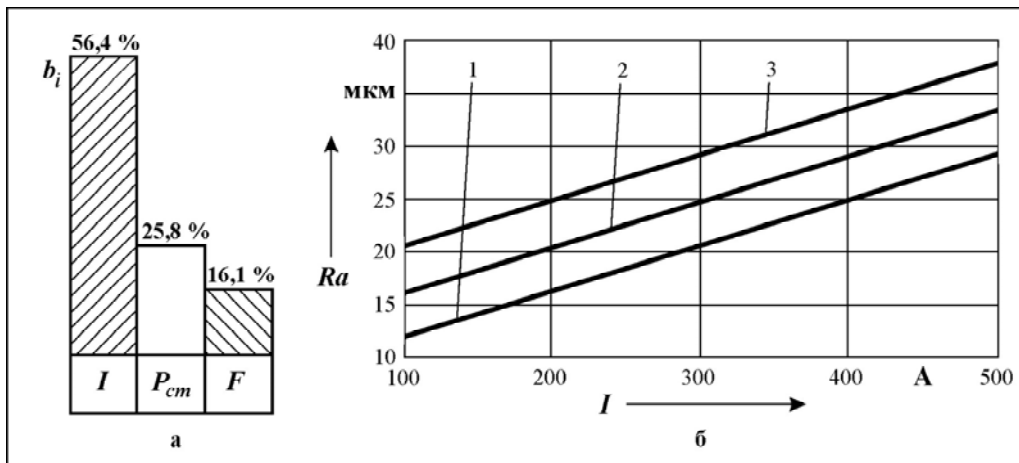
В рамках експерименту питома витрата електроенергії процесу РОД стержневих зразків змінювалася у межах від 3,52 кВт·год/кг до 4,90 кВт·год/кг, що не перевищує питому продуктивність електроімпульсної обробки.

Отримано математичну модель шорсткості обробленої поверхні Ra (8)

$$y_4 = 27,5 + 8,75x_1 - 4x_2 + 2,5x_3. \quad (8)$$

Як бачимо (рис. 6, а), найбільш впливає на шорсткість обробленої поверхні Ra сила технологічного струму I : ступінь впливу складає 56,1 %. Із підвищенням сили струму шорсткість підвищується. Це явище узгоджується з тим, що підвищення сили струму приводить до підвищення геометричних параметрів елементарної електроерозійної лунки, а саме її глибини та діаметру. Саме тому, силу струму можна розглядати як головний керуючий фактор.

Вплив на шорсткість обробленої бічної поверхні зразка статичного тиску робочої рідини на вході в міжелектродний зазор P_{cm} трохи менший, але достатньо великий і складає 25,8 %. Оскільки підвищення тиску приводить до зменшення шорсткості Ra , з метою забезпечення високопродуктивної обробки без суттєвого зниження якості обробленої поверхні, доцільно одночасно підвищувати силу технологічного струму I та тиск P_{cm} .



1 – $P_{cm} = 1,2$ МПа; 2 – $P_{cm} = 1,0$ МПа; 3 – $P_{cm} = 0,8$ МПа

Рисунок 6 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність шорсткості обробленої поверхні Ra від I та P_{cm} ($F = 1916$ мм²) (б)

Джерело: розроблено авторами

Ступінь впливу на шорсткість обробленої бічної поверхні зразка площі обробки F ще менша і складає 16,1 %.

На рис. 6, б, представлена графічна залежність шорсткості обробленої бічної поверхні зразка Ra від двох найбільш впливових факторів: сили струму I та статичного тиску робочої рідини P_{cm} . В рамках експерименту шорсткість обробленої бічної поверхні зразка після РОД змінювалася у межах від Ra 14 мкм до Ra 45 мкм. Оскільки отримані зразки для металографічних досліджень подальше оброблюються (розрізаються, шліфуються та поліруються), отримана після РОД шорсткість є задовільною.

Отримано математичну модель бічного міжелектродного зазору δ (9)

$$y_5 = 0,13 + 0,03x_4. \quad (9)$$

Як бачимо, в умовах експерименту фактори I , P_{cm} та F не впливають на δ . Бічний міжелектродний зазор повністю (ступінь впливу 100 %) визначається висотою пояска на електроді-інструменті h (рис. 7). Із підвищенням h зазор δ збільшується. З фізичної точки зору даний ефект пояснюється підвищенням гідравлічного опору течії рідини в міжелектродному зазорі та подальшого зменшення швидкості потоку, а меншій швидкості, як відомо [11], відповідає більша довжина стовпа дуги, а отже більший міжелектродний зазор.

В рамках експерименту бічний міжелектродний зазор при РОД зразка змінювався у межах від 0,07 мм до 0,18 мм. Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні електродів-інструментів для реалізації процесу РОД квадратних зразків із ливарної сталі 110Г13Л.

Слід відмітити, якщо лінія контуру заготовки зразка в плані в реальних умовах не виходить за межі контуру діаметра D електрода-інструмента (див. рис. 2), процес РОД квадратних зразків здійснюється без утворення або з частковим утворенням бічного міжелектродного зазору (рис. 8).

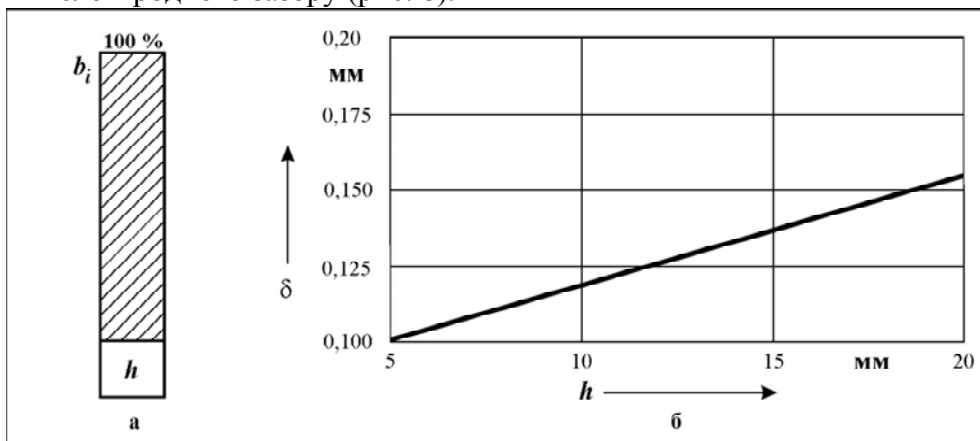


Рисунок 7 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність бічного міжелектродного зазору δ від висоти пояска на електроді-інструменті h (б)

Джерело: розроблено авторами

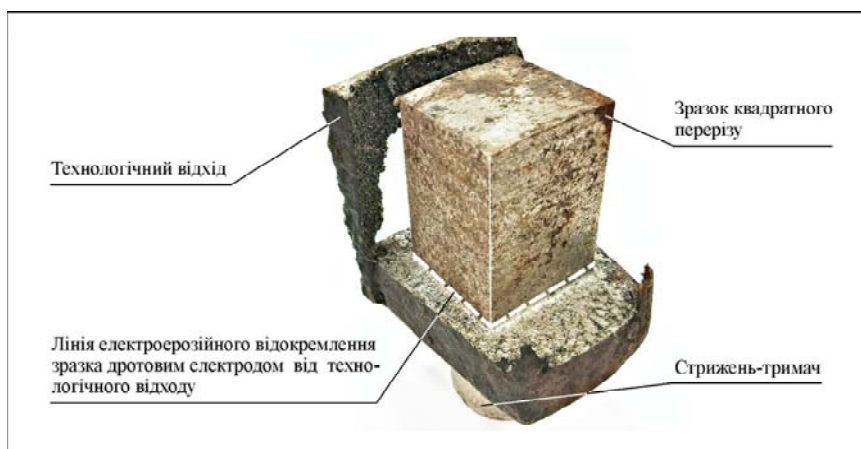


Рисунок 8 – Зразок із ливарної сталі 110Г13Л після РОД

Джерело: розроблено авторами

Отримано математичну модель відносного лінійного зносу графітового електрода-інструмента γ_L (10):

$$y_5 = 1,85 + 0,39x_2 + 0,94x_3. \quad (10)$$

За результатами досліджень, ступінь впливу на знос γ_L площі обробки F – найбільша та складає 70,7 % (рис. 9). Отже, фактор F є головним, керуючим. Вплив статичного тиску P_{cm} менший, але суттєвий, та складає 29,3 %. Той факт, що знос γ_L не залежить від сили струму, дозволяє реалізувати високопродуктивну РОД зразків (при відносно великій силі струму) в малозносному режимі роботи графітового електрода-інструмента, коли $\gamma_L < 1$ %.

В рамках експерименту відносний лінійний знос електрода-інструмента змінювався у межах від 0,5 % до 3,42 %. Результати дослідження можуть бути використані при оптимізації режиму процесу РОД квадратних зразків із ливарної сталі 110Г13Л.

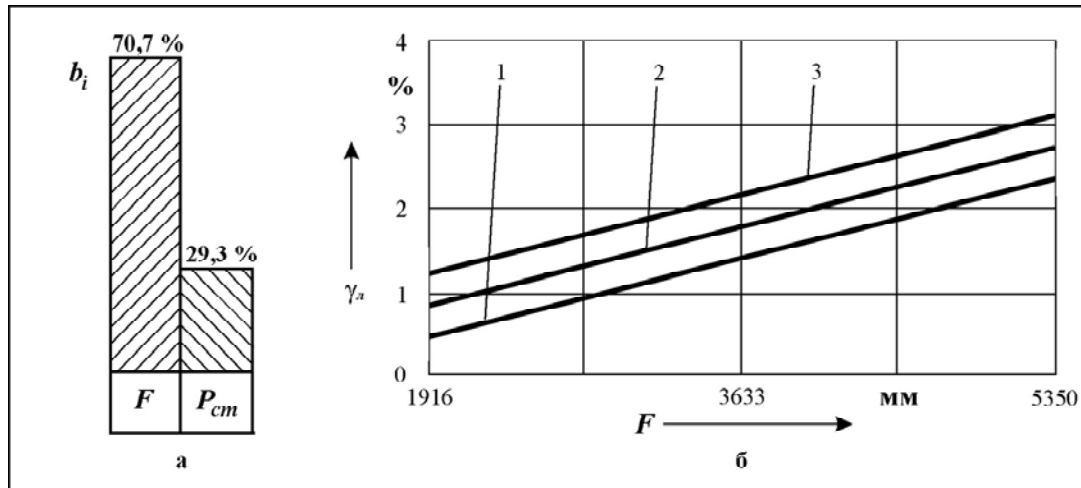


Рисунок 9 – Ступінь впливу факторів (а) та залежність відносного лінійного зносу графітового електрода-інструмента γ від F та P_{cm} (б)

Джерело: розроблено авторами

Отримані моделі технологічних характеристик дозволили оптимізувати режим РОД квадратних зразків (табл. 2).

Таблиця 2 – Параметри оптимального режиму РОД квадратних зразків та його зв'язок з вихідними характеристиками

Режим обробки				Технологічні характеристики					
I , А	P_{cm} , МПа	F , мм ²	h , мм	M , мм ³ /хв	M_a , мм ³ /А·хв	a , кВт·год/кг	Ra , мкм	δ , мм	γ_L , %
500	1,2	1916	5	9720	19,44	4,42	27	0,127	1,3

Джерело: розроблено авторами

Як бачимо, найбільша продуктивність РОД зразків M складає 9720 мм³/хв, що відповідає швидкості обробки $V = 5,1$ мм/хв. В той же час, швидкість електроімпульсної обробки, принаймні, на порядок нижча. Таким чином, спосіб РОД дозволяє обробити квадратний зразок 50 × 50 мм, висотою 100 мм із ливарної сталі 110Г13Л за 19,6 хв.

Висновки. Запропоновано прогресивну технологію виготовлення квадратних зразків із ливарної високоміцної сталі 110Г13Л для металографічних досліджень та випробувань з використанням для їх формоутворення способу розмірної обробки електричною дугою. Отримано математичні моделі процесу РОД даних зразків, що дозволяють керувати продуктивністю обробки, питомою продуктивністю обробки, питомою витратою електроенергії, шорсткістю обробленої поверхні, а також бічним міжелектродним зазором та відносним лінійним зносом графітового електрода-інструмента. Показано, що використання технології РОД зразків, порівняно з їх електроімпульсною обробкою, дозволяє збільшити продуктивність обробки у 8–10 разів.

Список літератури

1. Бугай Л. А. Зниження трудомісткості механічної обробки продукції з високомарганцевих сталей. *Гірничий вісник* : зб. наук. праць, 2023. Вип.111. С. 83–89.
2. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів / Хільчевський В.В., Кондратюк С.Є., Степаненко В.О., Лопатько К.Г. К.: Либідь, 2002. С.328.
3. Сіса О. Ф., Носуленко В. І. Альтернативний спосіб обробки високоміцних зносостійких матеріалів. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*, 2005. Вип.6. С. 136–138.
4. Аналіз нормативних вимог до ВМ-сталі та розробка методики мікроструктурного контролю зереннограничних її характеристик / К. І. Узлов, О. М. Мовчан, Т. О. Черниш, Ю. М. Сапунов, Г. В. Теорія і практика металургії : заг. держ. наук. журн., 2018. №3–5. С. 56–59.
5. Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів] / М.П.Мазур, Ю.М.Внуков, В.Л.Доброскок та ін.; під заг. ред. М.П.Мазура. 2-е вид. перероб. і доп. Львів : Новий світ 2000, 2001. С.422.
6. Kamenskikh, A.A., Muratov, K.R., Shlykov, E.S., Sidhu, S.S., Mahajan, A., Kuznetsova, Y.S., Ablyaz, T.R.: Recent trends and developments in the Electrical Discharge Machining Industry: A review. *J. Manuf. Mater. Process.* 7, 204 (2023), p. 204. <https://doi.org/10.3390/jmmp7060204>.
7. Nugroho, B., Yahya, A., Mat Sidek, A. R., Andromeda, T., Khamis, N. H., Current Pulse Generated by Spark of Electrical Discharge Machining (EDM). *IOP Conference Series: Journal of Physics*, 2020. IOP Publishing, 1529:042109. doi:10.1088/1742-6596/1529/4/042109.
8. Lu, B., Tang, K., Wu, M.X., Yang, Y., Yang, G.: Mechanism of electropulsing treatment technology for flow stress of metal material: A review. *Alloys* 2024, Vol. 3(1), pp. 96–125. <https://doi.org/10.3390/alloys3010006>.
9. Боков В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою. Кіровоград : Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2002. 300 с.
10. Боков В. М., Сіса О. Ф. Оброблюваність матеріалів електричною дугою. Кіровоград : Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2013. 172 с.
11. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.07 / НТУУ «КПІ». Київ, 1999. 36 с.

References

1. Buhay, L.A. (2023). Reducing the complexity of machining products made of high-manganese steels. *Hirnychy visnyk*, 111, 83–89 [in Ukrainian].
2. Khil'chevskyy, V.V., Kondratyuk, S.Ye., Stepanenko, V.O. & Lopat'ko, K.H. (2002). *Materials science and technology of structural materials*. Kyiv: Lybid' [in Ukrainian].
3. Sisa, O.F. & Nosulenko V.I. (2005). An alternative method for processing high-strength, wear-resistant materials. *Visnyk Kremenchuts'koho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu*, 6, 136–138 [in Ukrainian].
4. Uzlov, K. I., Movchan, O. M., Chernysh, T. O. & Sapunov, Yu. M. (2018). Analiz normatyvnykh vymoh do VM-stali ta rozrobka metodyky mikrostrukturnoho kontrolyu zerennohranychnykh yiyi kharakterystyk. *Teoriya i praktyka metalurhiyi*, 3–5, 56–59 [in Ukrainian].
5. Mazur, M.P., Vnukov, Yu.M., Dobroskok, V.L., Zaloha, V.O., Novos'olov, Yu.K., & Yakubov, F.Ya. (2002). *Fundamentals of material cutting theory* (2th ed.). L'viv : Novyy svit 2000 [in Ukrainian].

6. Kamenskikh, A.A., Muratov, K.R., Shlykov, E.S., Sidhu, S.S., Mahajan, A., Kuznetsova, Y.S. & Ablyaz, T.R. (2023). Recent trends and developments in the Electrical Discharge Machining Industry: *A review. J. Manuf. Mater. Process.* 7, 204. <https://doi.org/10.3390/jmmp7060204> [in English].
7. Nugroho, B., Yahya, A., Mat Sidek, A. R., Andromeda, T. & Khamis, N. H. (2020). Current Pulse Generated by Spark of Electrical Discharge Machining (EDM). *IOP Conference Series: Journal of Physics*. IOP Publishing, 1529:042109. doi:10.1088/1742-6596/1529/4/042109 [in English].
8. Lu, B., Tang, K., Wu, M.X., Yang, Y. & Yang, G. (2024). Mechanism of electropulsing treatment technology for flow stress of metal material: *A review. Alloys.* 3(1), 96–125. <https://doi.org/10.3390/alloys3010006> [in English].
9. Bokov, V.M. (2002). *Dimensional shaping of surfaces by an electric arc*. Kirovohrad: Polihrafichno-vydavnychiy tsentr TOV «Imeks LTD» [in Ukrainian].
10. Bokov, V.M. & Sisa, O.F. (2013). *Obrobliuvanist materialiv elektrychnoiu duhoiu [Processing of materials with an electric arc]*. Kirovohrad: Polihrafichno-vydavnychiy tsentr TOV «Imeks LTD» [in Ukrainian].
11. Nosulenko, V.I. (1999). Dimensional processing of metals with an electric arc. *Extended abstract of doctor's thesis*. Kyiv : NTUU «KPI» [in Ukrainian].

Oleh Sisa, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Mirzak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Victor Pukalov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olexandr Dovzhuk**, post-graduate, **Denys Tupalenko**, post-graduate
Central Ukraine National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Improvement of the Technology for Manufacturing Samples From High-Strength Cast Steel 110G13L for Metallographic research and Testing

Typically, armor cones for mills that crush rock are made of high-strength Hadfield foundry steel grade 110G13L. Since these parts are critical and expensive, square-section core samples are made from each casting from the casting for further research, in order to check for operability.

The production of core samples from cast steel 110G13L is associated with certain technical difficulties. This steel is characterized by its high wear resistance combined with high strength, ductility and impact toughness. That is why this steel can be attributed to materials that are difficult to machine.

Of certain practical interest is the use of electrical discharge machining for the manufacture of samples, which is capable of machining any electrically conductive material regardless of its physical properties. Of the three known methods of electrical discharge machining, the most productive is the method of dimensional machining of metals by electric arc (abbreviated as DMA). When implementing the DMA method, the process is carried out by an electric arc, which burns continuously (without pauses) between the electrode-tool and the electrode-workpiece being machined.

In the processing process, the hydrodynamic mode of the working fluid performs a triple function: it determines the energy state of the arc, determines the geometric state of the electric arc as a tool for dimensional processing of various surfaces and is responsible for the process of intensive removal of erosion products from the arc combustion zone, which provides the prerequisites for stabilizing the surface processing process. However, the process of DMA of square rods, to which samples from 110G13L cast steel belong, was not the object of research, and therefore the effective electrical and hydrodynamic modes and technological characteristics of processing are unknown, which limits its technological capabilities. Therefore, in order to be able to control the process of DMA of square rods, it is necessary to experimentally establish the relationship between the factors determining the processing mode and the initial technological characteristics.

The aim of the research is to build mathematical models of the technological characteristics of the DMA process of square rods made of 110G13L cast steel.

The work obtained mathematical models of the DMA process of these samples, which allow controlling the processing productivity, specific processing productivity, specific electricity consumption, roughness of the processed surface, as well as the lateral interelectrode gap and relative linear wear of the graphite electrode-tool. It is shown that the use of DMA technology of samples, compared with their electric pulse processing, allows increasing the processing productivity by 8-10 times.

steel 110G13L, electric arc, hydrodynamic flow, technological equipment, technological characteristics

Одержано (Received) 16.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 25.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

УДК 633.1:681.78

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.36-46>

С.П. Степаненко, ст. наук. співр., д-р техн. наук, **А.Я. Кузьмич**, ст. досл., канд. техн. наук, **А.М. Борис**, ст. досл., канд. техн. наук, **В.І. Днесь**, ст. досл., канд. техн. наук, **Д.А. Волик**, асп.

Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва НААН України, сел. Глеваха, Україна

e-mail: stepanenko_s@ukr.net

А.А. Кузьмич, студ.

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

Дослідження фізико-механічних та оптичних характеристик зернових матеріалів

Дослідження виконувалося на основі експериментальних даних щодо основних фізико-механічних характеристик пшениці та її оболонки. Подано структурно-функціональну схему і опис приладу для визначення оптичних характеристик зернових матеріалів. Встановлено, що зі збільшенням вологості зростають і досліджувані показники: коефіцієнт тертя, кут природного укусу та коефіцієнт внутрішнього тертя. Отримано значення спектральних коефіцієнтів відбиття випромінювання видимого діапазону від зернових матеріалів та коефіцієнтів пропускання випромінювання від висоти шару матеріалу.

пшениця, зерно, коефіцієнт тертя, вологість, оптичні характеристики

Постановка проблеми. Ефективна підготовка зернових матеріалів в процесі післязбиральної обробки зерна значно спрощує технологічний процес сортового поділу, фракціонування, що є особливо актуальним для малих підприємств із обмеженими ресурсами та низькою продуктивністю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сепарування зерна дозволяє видалити більшу частину зовнішніх оболонки разом із мікрофлорою та мінеральними домішками і в подальшому поділити його на фракції, які будуть використані для різних технологічних операцій (фураж, посів, кормова суміш і т.д.) [1, 2]. Нині найпоширенішими є технічні засоби для сепарування, що діють на основі тертя матеріалу по робочій поверхні та впливу на нього повітряного середовища [3, 4]. Вони відрізняються простотою конструкції, високою ефективністю та доступною ціною, що робить їх придатними для малих виробництв. У таких машинах зерно переміщується по шорстких робочих поверхнях, зокрема по перфорованому решету [5]. На кінематику руху зернин, їх траєкторію, а також на конструктивні та режимні параметри машини значно впливають фізико-механічні характеристики оброблюваного матеріалу і відокремлюваних оболонки, домішок, що залежать не тільки від рівня вологості, а і від оптичних характеристик того чи іншого матеріалу суміші (ціле зерно, подрібнене зерно, полова, оболонка тощо) [6, 7]. Очевидно, що ідентифікації зернових матеріалів та їх оптичні характеристики, а також подальші дослідження процесу сепарування (очищення), неможливе без врахування змін фізико-механічних властивостей зернових матеріалів під впливом вологості, освітленості, поглинання та відбивання світлових променів у вузьких діапазонах світла [8–11].

Постановка завдання. Метою даного дослідження є експериментальне вивчення залежності фізико-механічних параметрів зерна пшениці від рівня вологості та оптичних характеристик: коефіцієнта тертя по перфорованій поверхні, кута природного укусу та коефіцієнта внутрішнього тертя, коефіцієнта поглинання та відбивання світлових променів від зернівок.

Виклад основного матеріалу. Фізико-механічні властивості матеріалу, такі як швидкість витання, коефіцієнт тертя по поверхні решета (металу), коефіцієнт внутрішнього тертя та кут природного укусу, значною мірою впливають на траєкторії та кінематичні параметри переміщення зерен. Ці параметри залежать від вологості та впливають на оптичні характеристики зерна, а встановити взаємозв'язок можна лише шляхом експериментальних досліджень.

У ході дослідження були визначені наступні фізико-механічні характеристики зернового матеріалу: вологість (W), коефіцієнт тертя по перфорованій сталевій поверхні (f) та кут природного схилу (ϵ).

Рівень вологості зерна пшениці вимірювали за допомогою вологоміра ВСП-100. Контроль вологості проводився термогравіметричним методом із застосуванням сушильної шафи та електронних ваг «DigitalPocketScale» [12].

Для визначення коефіцієнта тертя по сталевій перфорованій поверхні використовували стандартну методику з нахиленою площиною (рис.1), на якій була встановлена шкала [13].



Рисунок 1 – Загальний вигляд нахиленої площини, для визначення коефіцієнта тертя
Джерело: розроблено авторами

Фіксували кут, при якому починається сповзання зразка, що розташований на робочій поверхні нахиленої площини, під час поступового відхилення її від горизонтального положення.

Цей кут φ є граничним між станом спокою та рухом зразка по нахиленій поверхні і визначає коефіцієнт тертя спокою [14]:

$$f = \tan \varphi \quad (1)$$

Кут природного схилу, що характеризує взаємну рухливість частинок матеріалу, визначали за ДСТУ 2422-94 методом витікання з воронки бункера (рис. 2) [15].



Рисунок 2 – Загальний вигляд природного схилу пшениці, яка витікає з воронки бункера
Джерело: розроблено авторами

Коефіцієнт внутрішнього тертя δ для легкозсипних матеріалів, таких як зерно, обчислювали за формулою

$$\delta = \tan \psi \quad (2)$$

де ψ – кут природного схилу.

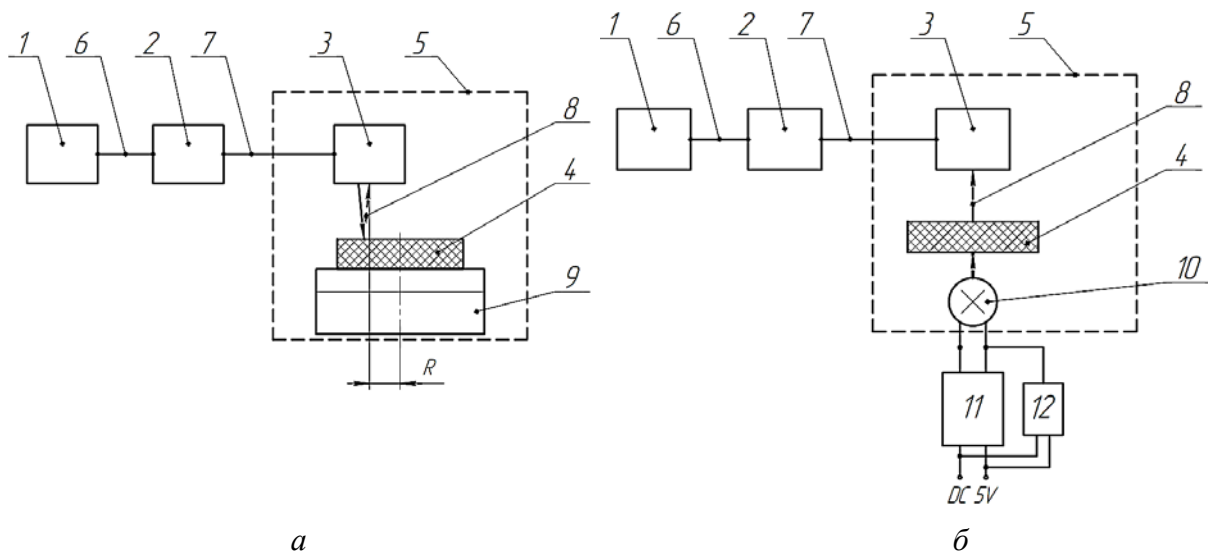
Зерно пшениці та продукти його очищення за добу до експериментів зволожували в целофанових мішках: до зерна, в залежності від початкової вологості, додавали розрахункову кількість води за таблицями [16], закривали мішки і залишали на добу. У експериментах використовували зерно пшениці сортів Білоцерківської дослідно-селекційної станції.

Результати експерименту визначали при різних значеннях одного фактора, з фіксованими значеннями інших (однофакторний експеримент). Достовірність результатів складала 95%. Експерименти повторювали тричі [17].

Статистичну обробку отриманих даних виконували за допомогою комп'ютерних програм «Microsoft Excel» та «StatSoft Statistica».

Для дослідження оптичних характеристик зернових матеріалів була розроблена установка, схема якої наведена на рис. 3

Установка для визначення оптичних характеристик зернових матеріалів базувалась на використанні цифрових мультиспектральних датчиків. Для управління роботою мультиспектрального датчика використана плата Arduino Uno, запрограмована на дискретне зчитування інформації з датчика та передачі даних в послідовний порт ПК. Кількість замірів – не менше 100 для одного дослідження. Для зчитування даних з послідовного порту, візуалізації даних та запису їх на жорсткий диск комп'ютера розроблена програма на мові програмування Python. Для усунення впливу зовнішнього освітлення, дослідний зразок та мультиспектральний датчик були розміщені всередині світлонепроникного екрана.



- 1 – ПК; 2 – плата ArduinoUno; 3 – цифровий мультиспектральний датчик; 4 – скляна чашка Петрі з зерновим матеріалом; 5 – світлонепроникний екран; 6 – кабель USB; 7 – шина I2C; 8 – випромінювання ближнього інфрачервоного та видимого діапазонів; 9 – обертова платформа; 10 – світлодіод, або інфрачервоний діод; 11 – DC/DC перетворювач; 12 – вольтметр

Рисунок 3 – Схема установки для визначення оптичних характеристик зернових матеріалів в режимі відбивання (а) та режимі пропускання (б)

Джерело: розроблено авторами

Для дослідження зернових матеріалів використані скляні чашки Петрі діаметром 100 мм та висотою 15 мм. При дослідженні в режимі відбивання чашку Петрі з зерновим матеріалом встановлювали концентрично на поверхні циліндричної обертальної платформи, яку розміщували зі зміщенням осі обертання відносно матриці мультиспектрального датчика на величину R , що становила 20–25 мм (рис.3, а). Джерелом випромінювання при дослідженнях був штатний світлодіодмультиспектрального датчика.

При дослідженні зернових матеріалів в режимі пропускання, скляну чашку Петрі з зерновим матеріалом встановлювали концентрично осі матриці мультиспектрального датчика. Під чашкою Петрі, на відстані 15 мм від неї, концентрично осі матриці датчика встановлювали SMD-світлодіод, або інфрачервоний діод (рис. 3, б). Регулювання та контроль напруги живлення діодів здійснювали за допомогою знижувального DC/DC перетворювача та паралельно приєднаного цифрового вольтметра. Штатний світлодіодмультиспектрального датчика вимикали програмно за допомогою плати ArduinoUno.

Значення спектральних коефіцієнтів відбиття світла зразками зернових матеріалів визначали за виразом:

$$\rho_{\lambda} = \frac{I_{\gamma}}{\rho_{\lambda} I_{\text{дл}}}, \quad (3)$$

де ρ_{λ} – спектральний коефіцієнт відбиття світла відповідної довжини хвилі;
 I_{γ} – середнє значення інтенсивності відбитого випромінювання відповідного каналу фотодіода, $\mu\text{Вт}/\text{см}^2$;
 $I_{\text{дл}}$ – інтенсивність відбитого дзеркалом випромінювання, відповідного каналу фотодіода, $\mu\text{Вт}/\text{см}^2$.

Значення спектральних коефіцієнтів пропускання світла зразками зернових матеріалів визначали за виразом

$$\tau_{\lambda} = \frac{I_{1\gamma}}{I_{0\lambda}}, \quad (4)$$

де τ_{λ} – спектральний коефіцієнт пропускання світла відповідної довжини хвилі;
 $I_{1\gamma}$ – середнє значення інтенсивності випромінювання, що проходить через зразок та фіксується відповідним каналом фотодіода, $\mu\text{Вт}/\text{см}^2$;

$I_{0\lambda}$ – середнє значення інтенсивності випромінювання, що проходить через пусту чашку Петрі та фіксується відповідним каналом фотодіода, $\mu\text{Вт}/\text{см}^2$.

Значення спектральних коефіцієнтів поглинання світла зразками зернових матеріалів визначали за виразом

$$\alpha_{\lambda} = 1 - \rho_{\lambda} - \tau_{\lambda}, \quad (5)$$

де α_{λ} – спектральний коефіцієнт поглинання світла відповідної довжини хвилі.

Проведені експерименти продемонстрували, що вологість зернового матеріалу має значний вплив на фізико-механічні властивості частинок матеріалу фіксованого розміру.

Крім цього, нами проведено дослідження геометричних розмірів зерен насіннєвого матеріалу пшениці різних сортів (рис. 4), а саме: Краєвид, Романтика, Царівна, Щедра Нива, Либідь, Зорепад Білоцерківський, усереднені дані яких наведено в таблиці 1.



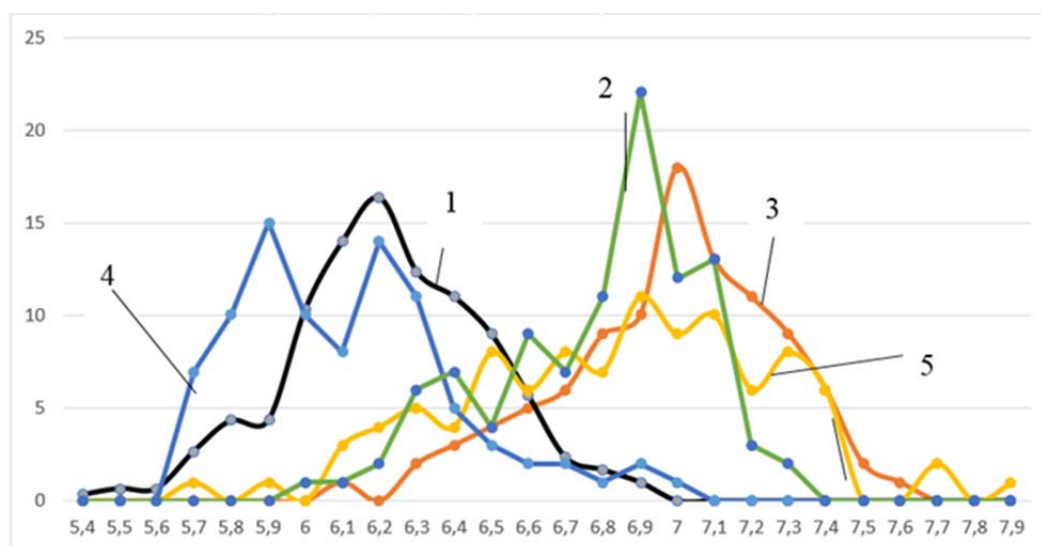
Рисунок 4 – Визначення геометричних розмірів зерен пшениці
Джерело: розроблено авторами

Таблиця 1 – Усереднені дані значень геометричних розмірів зерна українських сортів пшениці врожаю 2024 р.

Сорт пшениці	Довжина, мм			Ширина, мм			Товщина, мм		
	мін.	макс.	сер.	мін.	макс.	сер.	мін.	макс.	сер.
Краєвид	5,4	6,9	6,15	2	3,9	2,95	2,1	3,7	2,9
Зорепад БЦ	6,0	7,3	6,65	2,9	3,8	3,35	2,4	3,9	3,15
Либідь	6,1	7,6	6,85	2,6	3,5	3,05	2,2	3,3	2,7
Романтика	5,7	7,0	6,35	2,6	3,7	3,15	2,3	3,4	2,85
Щедра Нива	5,7	7,9	6,8	2,4	4,0	3,2	2,0	3,5	2,75
Царівна	5,4	6,9	6,15	2	3,9	2,95	2,1	3,7	2,9

Джерело: розроблено авторами

За отриманими даними було побудовано графіки розподілу довжини окремих насінин за частотою їх повтору в відібраному зразкові на рис. 5.

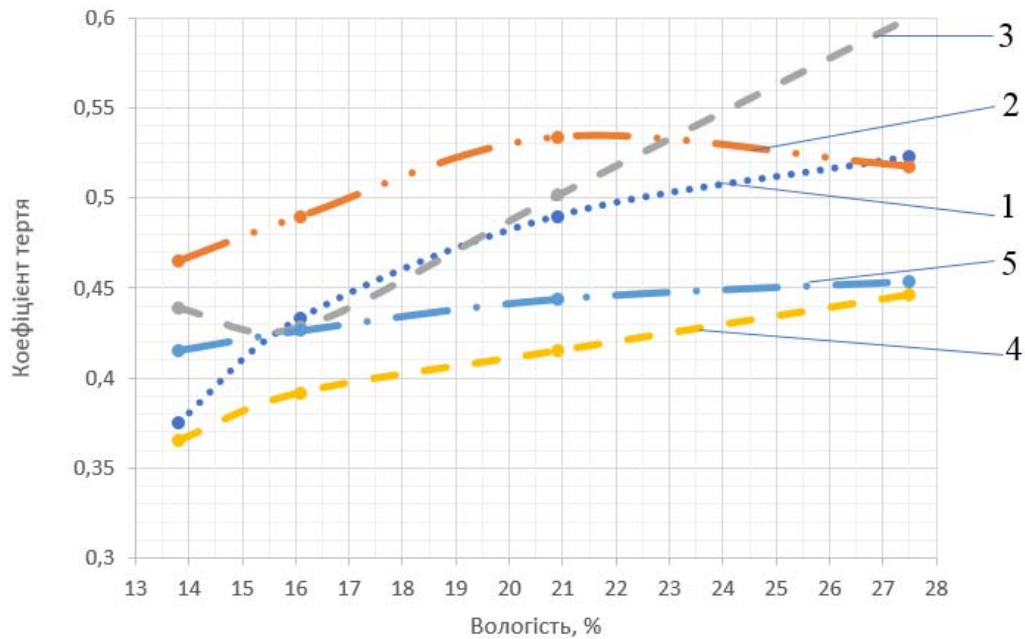


1 – Краєвид; 2 – Либідь; 3 – Зорепад Білоцерківський; 4 – Царівна; 5 – Відрада; 6 – Щедра Нива

Рисунок 5 – Криві розподілу довжини зерен різних сортів пшениці

Джерело: розроблено авторами

Зміна коефіцієнта тертя зерна та продуктів його очищення по сталевій перфорованій поверхні представлена на рис.6. Спостерігається зростання коефіцієнта тертя зі збільшенням вологості. У діапазоні вологості 15–16,5% приріст значення коефіцієнта тертя майже не спостерігається, а при подальшому збільшенні вологості його підвищення відновлюється.



1 – дерево; 2 – пластик; 3 – гума; 4 – сталь; 5 – решето

Рисунок 6– Вплив вологості оброблюваного матеріалу W на значення коефіцієнта тертя руху f по різних поверхнях

Джерело: розроблено авторами

На рис.7 показані залежності, які демонструють зміну кута природного схилу для зерна та продуктів очищення з ростом вологості. Дослідження виявило, що з підвищенням вологості зменшується рухливість, а отже, і здатність до перерозподілу. Як і в випадку з коефіцієнтом тертя, при вологості матеріалу 15–17% спостерігається уповільнення зростання кута природного схилу, яке відновлюється при подальшому збільшенні вологості.

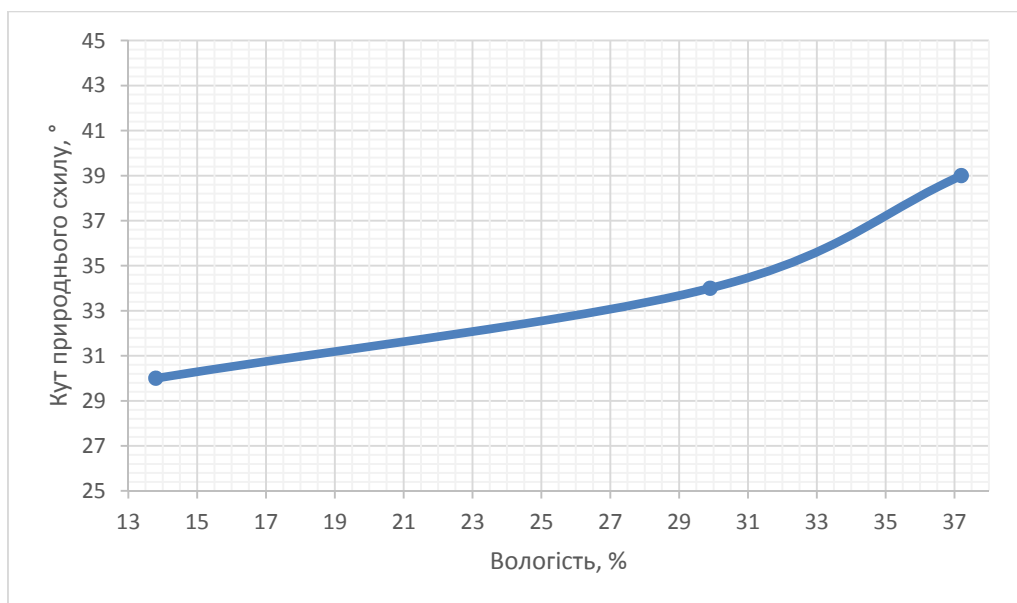
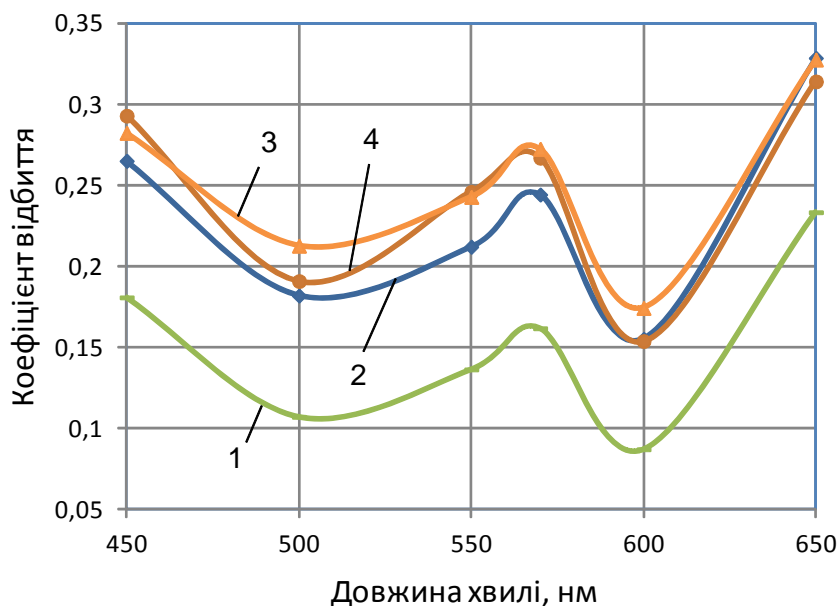


Рисунок 7– Залежність кута природного схилу ψ від вологості W сорту пшениці Краєвид

Джерело: розроблено авторами

На рис. 8 показані залежності, які демонструють зміну значення спектральних коефіцієнтів відбиття світлових промінів від зернових матеріалів пшениці.



1 – зерно пшениці кондиційне; 2 – зерно подрібнене; 3 – солома; 4 – солома подрібнена

Рисунок 8 – Залежності спектральних коефіцієнтів відбиття випромінювання видимого діапазону від зернати домішок пшениці

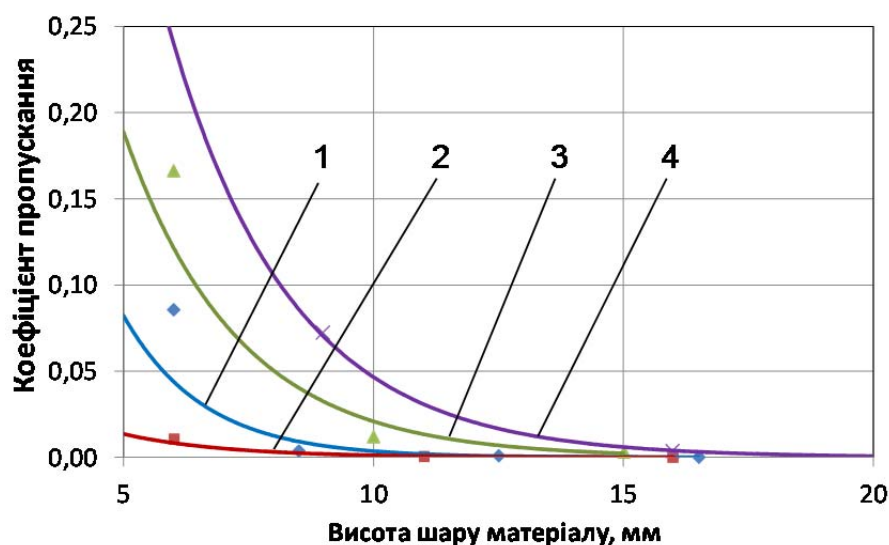
Джерело: розроблено авторами

Дослідження виявило схожий характер залежності спектральних коефіцієнтів відбиття випромінювання видимого діапазону від зернових матеріалів. Встановлено, що кондиційне зерно характеризується значно меншими усередненими значеннями спектральних коефіцієнтів відбиття порівнянні як із подрібненим зерном, так із домішками. Це подає надію ефективного процесу ідентифікації повноцінного зерна в зернових сумішах методами машинного зору.

Залежності спектральних коефіцієнтів відбиття подрібненого зерна, соломи та полови близькі між собою та перетинаються, тому для їх ідентифікації крім колірних слід використовувати відмінності в морфологічних характеристиках: розміри, форма, тощо.

На рис. 9 приведені залежності, які демонструють зміну коефіцієнтів пропускання світлового випромінювання з довжиною хвилі 550 нм в залежності від висоти шару зернових матеріалів.

Дослідження виявило, що зі збільшенням висоти шару зернових матеріалів до 10–15 мм значення коефіцієнта пропускання світлового випромінювання прямує до нуля. Тобто можна вважати, що зерно за висоти шару понад 10 мм та зернові домішки за висоти шару понад 15–20 мм стають оптично непрозорими матеріалами. В такому випадку вираз (5) можна записати у вигляді: $\alpha_{\lambda} = 1 - \tau_{\lambda}$.



1 – зерно пшениці кондиційне; 2 – зерно подрібнене; 3 – солома; 4 – солома подрібнена

Рисунок 9–Залежності коефіцієнтів пропускання світлового випромінювання з довжиною хвилі 550 нм від висоти шару зернових матеріалів

Джерело: розроблено авторами

Висновки. В результаті проведеного дослідження експериментально були отримані залежності основних фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу пшениці від його вологості: коефіцієнта тертя по перфорованій сталевій поверхні, коефіцієнта внутрішнього тертя, кута природного схилу.

Встановлені спектральні коефіцієнти поглинання та відбиття світлових променів від зерна пшениці та домішок слугуватимуть для ідентифікації матеріалів за оптичними характеристиками.

Отримані значення можуть бути використані для теоретичного визначення конструктивних параметрів приладу ідентифікації оброблюваного зернового матеріалу, при різній вологості зерна, яке підлягає обробці.

Список літератури

1. Adamchuk, V., Bulgakov, V., Ivanovs, S., Holovach, I., Ihnatiev, Y. Theoretical study of pneumatic separation of grain mixtures in vortex flow. *Engineering for Rural Development*. 2017. Vol. 20/2021. P. 657–664. DOI: 10.22616/ERDev.2021.20.TF139
2. Aliiev, E., Gavrilchenko, A., Tesliuk, H., Tolstenko, A., Koshul'ko, V. Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface. *Acta Periodica Technologica*. 2019. Vol. 50.P. 12-22. DOI: 10.2298/apt1950012a
3. Mykhailov, Y., Zadosna, N., Postnikova, M., Pedchenko, G., Khmelovskyi, V., Bondar, M., Ionichev, A., Kozdęba, M., Tomaszewska-Górecka, W. Energy Assessment of the Pneumatic Sieve Separator for Agricultural Crops. *Agricultural Engineering*. 2021. Vol. 25(1). P. 147–156. DOI: 10.2478/agriceng-2021-0012
4. Piven, M., Volokh, V., Piven, A., Kharchenko, S. Research into the process of loading the surface of a vibrosieve when a loose mixture is fed unevenly. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologie*. 2018. Vol. 6, № 1(96). P. 62–70. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.149739
5. Rogovskii, I., Titova, L., Trokhaniak, V., Trokhaniak, O., Stepanenko, S. Experimental study of the process of grain cleaning in a vibro-pneumatic resistant separator with passive weeders. *Series II: Forestry Wood Industry Agricultural Food Engineering*. 2020. Vol. 13(62), № 1. P. 117–128. DOI: 10.31926/but.fwiafe.2020.13.62.1.11

6. Tishchenko, L., Kharchenko, S., Kharchenko, F., Bredykhin, V., & Tsurkan, O. Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 2, № 7(80). P. 63–69. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.65920
7. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I. Theoretical research of separation process grain mixtures. *Machinery & Energetics*. 2019. Vol. 10, № 4. P. 137–143. DOI: 10.31548/machenergy2019.04.137
8. Horoshaylo Y. E., Yarmak I. N., Efimenko S. A. The device for measuring colour. *Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Сер. : Електроенергетика та перетворювальна техніка*. 2018. № 8 (1284). С. 14–17.
9. Petit, H. A., Paulo, C. I., Cabrera, O. A., Irassar, E. F. Modelling and optimization of an incline dplane classifier using CFD-DPM and the Taguchi method, *Applied Mathematical Modelling*. 2020. Vol. 77(1), P. 617–634. DOI: 10.1016/j.apm.2019.07.059
10. Піваров О.А., Ковальова О.С., Кошулько В.С. Інноваційні методи визначення показників якості зерна : навчальний посібник. Дніпро : ДДАЕУ, 2023. 325 с.
11. Єфименко С.А. Аналіз впливу невизначеності результатів вимірювань на достовірність колориметричного контролю. *Метрологія та прилади*. Харків, 2020. № 6.(86) С. 52–58.
12. Білинський Й. Й., Скалецька М. О. Аналіз методів та засобів вимірювання вологості сипких продуктів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2023. № 2. С. 25–134. DOI: 10.31649/1997-9266-2023-167-2-125-134
13. Станкевич Г.М., Кац А.К., Васильєв С.В., Гапонюк О.І. Характеристика фізико-механічних властивостей зерна спельти. *Scientific Works*, 2019. Т. 83, вип. 2. С. 50–56. DOI:10.15673/swonaft.v2i83.1539
14. Царенко О.М., Войтюк Д.Г., Швайко В.М. та ін. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів. Київ: Мета, 2003. 448 с.
15. ДСТУ 2422-94. Зерно заготівельне і постачальне. Терміни та визначення. Вид. офіц. Уведено вперше; чинний від 1995–01–01. Київ: Держспоживстандарт України, 1995. 26 с.
16. Методика проведення кваліфікаційної експертизи сортів рослин на придатність до поширення в Україні. Методи визначення показників якості продукції рослинництва / за ред. С. О. Ткачик. Вінниця : Корзун Д. Ю., 2016. 158 с.
17. Білуха М. Т. Методологія наукових досліджень : підручник. Київ : АБУ, 2002. 480 с.

References

1. Adamchuk, V., Bulgakov, V., Ivanovs, S., Holovach, I. & Ihnatiev, Y. (2021). Theoretical study of pneumatic separation of grain mixtures in vortex flow. *Engineering for Rural Development*, 20/2021, 657-664. DOI: 10.22616/ERDev.2021.20.TF139
2. Aliiev, E., Gavrilchenko, A., Tesliuk, H., Tolstenko, A., & Koshul'ko, V. (2019). Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface. *Acta Periodica Technologica*, 50, 12-22. DOI: 10.2298/apt1950012a
3. Mykhailov, Y., Zadosna, N., Postnikova, M., Pedchenko, G., Khmelovskiy, V., Bondar, M., Ionichev, A., Kozdęba, M. & Tomaszewska-Górecka, W. (2021). Energy Assessment of the Pneumatic Sieve Separator for Agricultural Crops. *Agricultural Engineering*, 25(1), 147-156. DOI: 10.2478/agriceng-2021-0012
4. Piven, M., Volokh, V., Piven, A. & Kharchenko, S. (2018). Research into the process of loading the surface of a vibrosieve when a loose mixture is fed unevenly. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/1 (96), 62–70. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.149739
5. Rogovskii, I., Titova, L., Trokhaniak, V., Trokhaniak, O. & Stepanenko, S. (2020). Experimental study of the process of grain cleaning in a vibro-pneumatic resistant separator with passive weeders. *Series II: Forestry Wood Industry Agricultural Food Engineering*, 13(62(1)), 117–128. DOI: 10.31926/but.fwiafe.2020.13.62.1.11
6. Tishchenko, L., Kharchenko, S., Kharchenko, F., Bredykhin, V. & Tsurkan, O. (2016). Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/7 (80), 63–69. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.65920.
7. Stepanenko, S. P. & Kotov, B. I. (2019). Theoretical research of separation process grain mixtures. *Machinery & Energetics*, 10(4), 137–143. DOI: 10.31548/machenergy2019.04.137
8. Horoshaylo Y. E., Yarmak I. N. & Efimenko, S. A. (2018). The device for measuring colour. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika*, 8 (1284), 14–17.

9. Petit, H. A., Paulo, C. I., Cabrera, O. A. & Irassar, E. F. (2020). Modelling and optimization of an inclined plane classifier using CFD-DPM and the Taguchi method, *Applied Mathematical Modelling*, 77(1), 617–634. DOI: 10.1016/j.apm.2019.07.059
10. Pivovarov O.A., Kovalova O.S. & Koshulko, V.S. (2023). *Innovative methods of determining grain quality indicators*. Dnipro: DDAEU [in Ukrainian].
11. Yefimenko, S.A. (2020). Analysis of the influence of the uncertainty of measurement results on the reliability of colorimetric control. *Metrology and devices*, 6(86), 52–58 [in Ukrainian].
12. Bilinskyi J.Y. & Skaletska, M.O. (2023). Analysis of methods and means of measuring the moisture content of sticky products. *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, 2, 25–134 [in Ukrainian]. DOI: 10.31649/1997-9266-2023-167-2-125-134
13. Stankevich, G., Kats, A., Vasiliev, S. & Gaponuk, O. (2019). Characteristics of physical and mechanical properties of spelled grain. *Scientific Works*, 83(2), 50–56 [in Ukrainian]. DOI: 10.15673/swonaft.v2i83.1539
14. Tsarenko O.M., Voytiuk D.G. & Shvayko, V.M. (2003). Mechanical and technological properties of agricultural materials. Kyiv: Meta [in Ukrainian].
15. Derzhstandart Ukrainy. (1997). Grain procurement and supply. Terms and definitions. (ДСТУ 2422-94). Kyiv [in Ukrainian].
16. Tkachyk, S. O. (Ed.). (2016). *Methodology for the qualification examination of plant varieties for suitability for distribution in Ukraine. Methods of determining quality indicators of crop production*. Vinnytsia: D. Yu. Korzun [in Ukrainian].
17. Bilukha, M. T. (2002). *Methodology of scientific research*. Kyiv: ABU [in Ukrainian].

Serhii Stepanenko, Senior Researcher, DSc., **Alvian Kuzmych**, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Andriy Borys**, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Viktor Dnes'**, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Daryna Volyk**, Post-graduate

Institute of Mechanics and Automation of Agricultural Production, Hlevakha, Ukraine

Anna Kuzmych, Master's Student

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Study of Physical-mechanical and Optical Characteristics of Grain Materials

The purpose of the study is to experimentally study the dependence of the physical and mechanical parameters of wheat grain on the moisture level and optical characteristics: the coefficient of friction on the perforated surface, the angle of natural slope and the coefficient of internal friction, the coefficient of absorption and reflection of light rays from the grain. The study is based on experimental data on the main physical and mechanical characteristics of wheat and its husks. The method of determining the physical and mechanical characteristics of wheat grain is presented, and the conditions of the experiments are described. The work presents a structural and functional scheme and a description of the device for determining the optical characteristics of grain materials.

According to the results of the research, the values of the studied properties of the material at different levels of humidity were obtained. The conducted analysis showed that with an increase in humidity, the investigated indicators also increase: the coefficient of friction against the surface, the angle of natural slope and the coefficient of internal friction. In the humidity range of 15–17%, the increase in the values of all indicators is almost not observed and is restored only with a further increase in humidity. The values of the spectral reflection coefficients of visible radiation from grain materials and the radiation transmission coefficients from the height of the grain material layer were obtained. In the humidity range of 15–16.5%, there is almost no increase in the value of the coefficient of friction, and with a further increase in humidity, its increase is restored. The study found that with an increase in the height of the layer of granular materials to 10–15 mm, the value of the light radiation transmission coefficient goes to zero. That is, it can be assumed that grain with a layer height of more than 10 mm and grain impurities with a layer height of more than 15–20 mm become optically opaque materials.

The obtained results can be used for the theoretical calculation of the design parameters and modes of the device for determining the optical characteristics of grain materials, as well as for determining the kinematic elements of the movement of the working surface and the processed material at different levels of moisture of the grain entering the express processing.

wheat, grain, coefficient of friction, moisture, optical characteristics

Одержано (Received) 26.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 27.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

УДК 621.9.048.4

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.47-54>

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

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

Удосконалення електроерозійної головки розмірної обробки дугою стрижнів на базі настільного свердлувального верстата

Запропонована нова електроерозійна головка розмірної обробки дугою стрижнів на базі настільного електроерозійного верстата, що постачається підкладною плитою, через яку робоча рідина, разом з продуктами ерозії, вилучається із зони обробки. Показано, що використання даної головки покращує її експлуатаційні характеристики та дозволяє вилучати продукти ерозії із зони обробки без застосування ручної праці.

електроерозійна головка, продукти ерозії, розмірна обробка дугою, гідродинаміка, настільний свердлувальний верстат

Постановка проблеми. На сучасних підприємствах застосовується різне обладнання для виготовлення стрижнів:

- гідравлічні преси для прямого видавлювання. Для забезпечення пластичності матеріалу, заготовку перед видавлювання, як правило, нагрівають, що потребує додаткового обладнання та коштів;

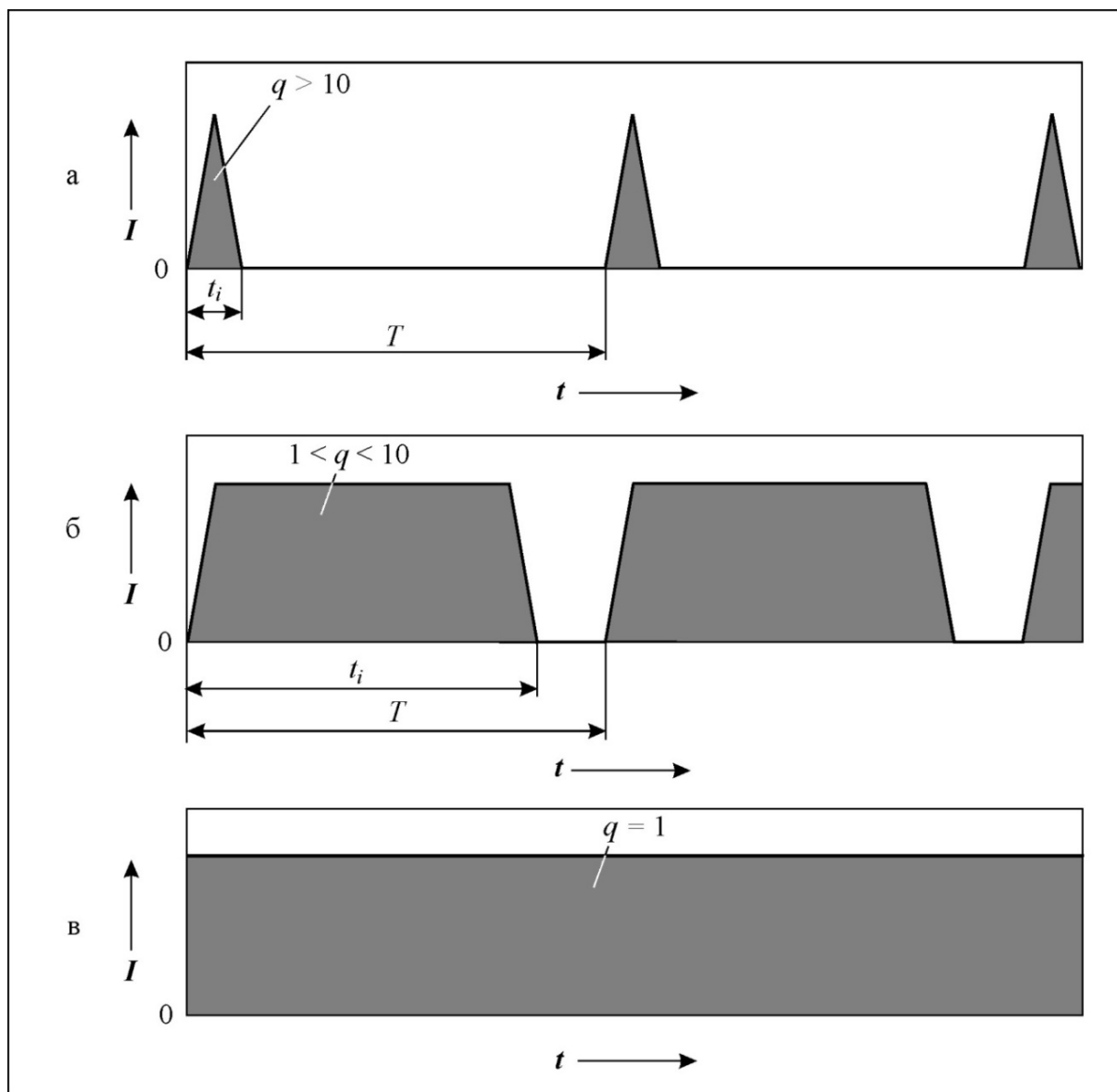
- металорізальні верстати. Так, токарні верстати використовують для обробки стрижнів круглого перерізу, а фрезерні – для фасонного. Однак, металорізальні верстати практично не застосовуються для виготовлення стрижнів із важкооброблюваних матеріалів, наприклад, сталі Г13, загартованих сталей, твердих сплавів.

В цьому зв'язку, певний практичний інтерес являють електроерозійні верстати, як більш універсальні та надійні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До електроерозійних верстатів, які можуть застосовуватися сьогодні для виготовлення стрижнів, відносяться електроіскрові верстати, електроімпульсні верстати та верстати для розмірної обробки електричною дугою (РОД – розмірна обробка дугою).

Сучасні електроіскрові верстати [1, див. центральну кольорову вставку між сторінками 48-49] мають безазорні високоточні двигуни руху електродів, забезпечують дзеркальні технології обробки, мають систему нанозносу електродів-інструментів та власні системи комп'ютерних програм. Вони дуже досконалі, але використовують в якості джерел живлення RC -генератори [2, с. 6]. Дані генератори забезпечують обробку виключно іскровими розрядами з енергією W_i від 0,0003 до 2 Дж та тривалістю t_i від 10^{-4} до 10^{-5} с. Електрична енергія вводиться в робочу зону невеликими порціями (дискретно) зі шпаруватістю $q > 10$ (рис. 1, а). Саме тому продуктивність електроіскрової обробки дуже низька та не перевищує декілька сотень $\text{мм}^3/\text{хв.}$ на чорнових режимах. Процес виготовлення стрижня на електроіскровому верстаті здійснюється у ванні без прокачування робочої рідини через центральний отвір

в електроді-інструменті, або при слабкому прокачуванні (статичний тиск рідини не перевищує 0,1 МПа). Продукти ерозії електродів осаджуються у ванну, накопичуються там та періодично вилучаються.



а – електроіскрова обробка; б – електроімпульсна обробка; в – розмірна обробка дугою;
 I – сила струму; t – час; T – період розряду; t_i – час існування (тривалість) розряду;
 q – шпаруватість введення енергії

Рисунок 1 – Схеми осцилограм різних способів електроерозійної обробки

Джерело: розроблено авторами

Більш продуктивними є електроімпульсні верстати, які в якості джерел живлення використовують спеціальні генератори імпульсів [2, с. 6, 7]. Вони ведуть обробку стрижнів короткочасними іскродуговими та дуговими розрядами з тривалістю імпульсу t_i від 10^{-2} до 10^{-4} с та шпаруватістю $1 < q < 10$, тобто із значно меншими паузами (рис 1, б). Продуктивність електроімпульсної обробки досягає декілька тисяч $\text{мм}^3/\text{хв}$. Але наявність пауз в підведенні енергії в зону обробки свідчить про те, що продуктивність електроімпульсної обробки не є найбільшою.

За роботами [3–8] відомі верстати, що реалізують спосіб РОД, які можуть бути застосовані для виготовлення стрижнів. Процес обробки стрижня здійснюється електричною дугою, яка безперервно (без пауз) горить між графітовим електродом-інструментом та електродом-заготовкою в поперечному потоці робочої рідини. В якості джерел живлення постійним технологічним струмом використовуються звичайні зварювальні випрямлячі. Вони дозволяють безперервно вводити в зону обробки великі потужності технологічного струму і тим самим позитивно впливають на продуктивність обробки. Так, продуктивність процесу РОД стрижня може у 8–0 разів перевищувати продуктивність електроімпульсної обробки. Отже, порівняно з електроімпульсними верстатами, час обробки стрижня на верстаті, що реалізує спосіб РОД, значно менший.

Однак, відомі верстати для РОД стрижнів мають велику вартість та займають велику площу, а тому не можуть бути застосовні на ремонтних заводах та майстернях.

Відомі електроерозійні головки розмірної обробки дугою для металорізального обладнання [2, с. 277]. Вони мають невелику вартість та займають невелику площу, але не забезпечують якісну і точну обробку стрижнів. Це пов'язано з тим, що робоча рідина разом з продуктами ерозії рухається в торцевому міжелектродному зазорі за напрямком від периферії до центру електрода-інструмента – зворотне прокачування. Як наслідок цього, бічний міжелектродний зазор в напрямку течії рідини безперервно збільшується, бічна поверхня стрижня формується конусоподібною, а її шорсткість зростає.

За роботою [1, с. 187-189] відома електроерозійна головка розмірної обробки дугою на базі настільного свердлувального верстата (рис. 2). При обробці стрижнів вона переналагоджується зі зворотнього на пряме прокачування, при якому робоча рідина в торцевому міжелектродному зазорі рухається за напрямком від центру до периферії електрода-інструмента. В наслідок того, що продукти ерозії не попадають в бічний міжелектродний зазор, стрижень формується циліндричної форми, а шорсткість обробленої бічної поверхні помітно зменшується.

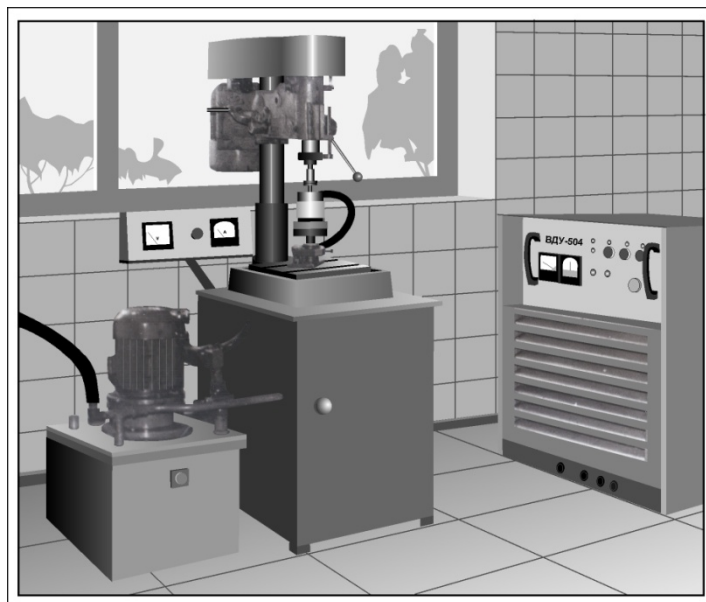


Рисунок 2 – Електроерозійна прошивна головка, що створена на базі настільного свердлувального верстата

Джерело: розробка автора Бокова В. М.

Однак при експлуатації відомої електроерозійної головки продукти ерозії не вилучаються із герметичної камері, а накопичуються в ній. Останнє пов'язано з тим, що рівень забору робочої рідини разом з продуктами ерозії в герметичній камері головки знаходиться значно вище рівня торцевого міжелектродного зазору і продуктам ерозії для вилучення необхідно рухатись вгору. На частку в герметичній камері головки діє, з одного боку, сила ваги G , що спрямована вниз, а з другого – сила гідродинамічного тиску F_v та сила Архімеда N , що спрямовані вгору (рис. 3).

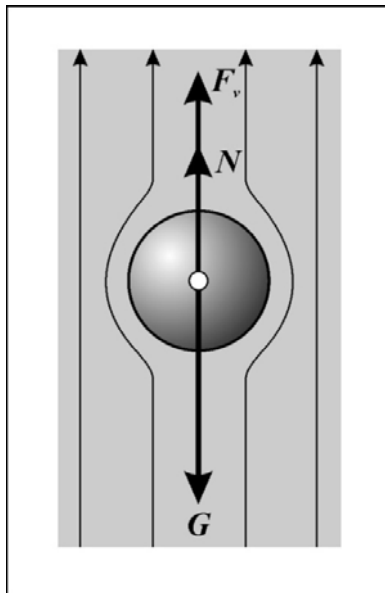


Рисунок 3 – Схема сил, що діють на металеву частку в герметичній камері електроерозійної головки при РОД стрижня

Джерело: розроблено авторами

Рівновага цих сил визначається умовою (1):

$$F_v = G - N. \quad (1)$$

Як бачимо, для того, щоб частка рухалася в камері у напрямку знизу вгору, треба перебороти силу ваги силою гідродинамічного тиску F_v . В свою чергу, гідродинамічний тиск потоку в каналі характеризується швидкістю робочої рідини. Отже, існує така критична швидкість робочої рідини $V_{кр}$, нижче якої продукти ерозії не вилучаються із герметичної камери. За даними роботи [2], критичну швидкість можна визначити за формулою (2)

$$V_{кр} = \sqrt{\frac{8Rg}{3C_x} \left(\frac{K_n \rho_n}{\rho_{жс}} - 1 \right)}, \quad (2)$$

де R – радіус частки, м;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

ρ_n – густина компактного матеріалу, із якого отримано частку, кг/м³;

$\rho_{жс}$ – густина робочої рідини, кг/м³;

C_x – коефіцієнт лобового опору частки;

K_n – коефіцієнт, що враховує зміну густини частки.

В роботі [7] показано, що в широкому діапазоні зміни вихідних параметрів, критична швидкість робочої рідини складає 0,5 м/с. Однак, в герметичній камері головки робоча рідина рухається із значно меншою швидкістю, тобто гідродинамічна складова руху частки в камері відсутня. Тому, після обробки кожного стрижня оператору необхідно очищувати герметичну камеру від продуктів ерозії, що дуже незручно та займає багато часу.

Постановка завдання. Із викладеного вище виходить, що для покращення експлуатаційних характеристик відомої електроерозійної головки розмірної обробки стрижнів дугою на базі настільного свердлувального верстата, треба створити такі умови обробки, при яких продукти ерозії вилучались би з герметичної камери автоматично (без застосування ручної праці), тобто забезпечити головку такою можливістю. Така головка не була об'єктом дослідження.

Метою дослідження є покращання експлуатаційних характеристик електроерозійної головки при розмірній обробці дугою стрижнів за рахунок створення умов для вилучення продуктів ерозії із зони обробки.

Для досягнення поставленої мети необхідно запропонувати нову конструкцію електроерозійної обробки для РОД стрижнів на базі настільного свердлувального верстата та описати принцип її роботи.

Виклад основного матеріалу. Нова електроерозійна головка (рис. 4) розмірної обробки дугою стрижнів 1 на базі настільного свердлувального верстата постачається підкладною плитою 8, через яку робоча рідина, разом з продуктами ерозії 16, вилучаються із зони обробки.

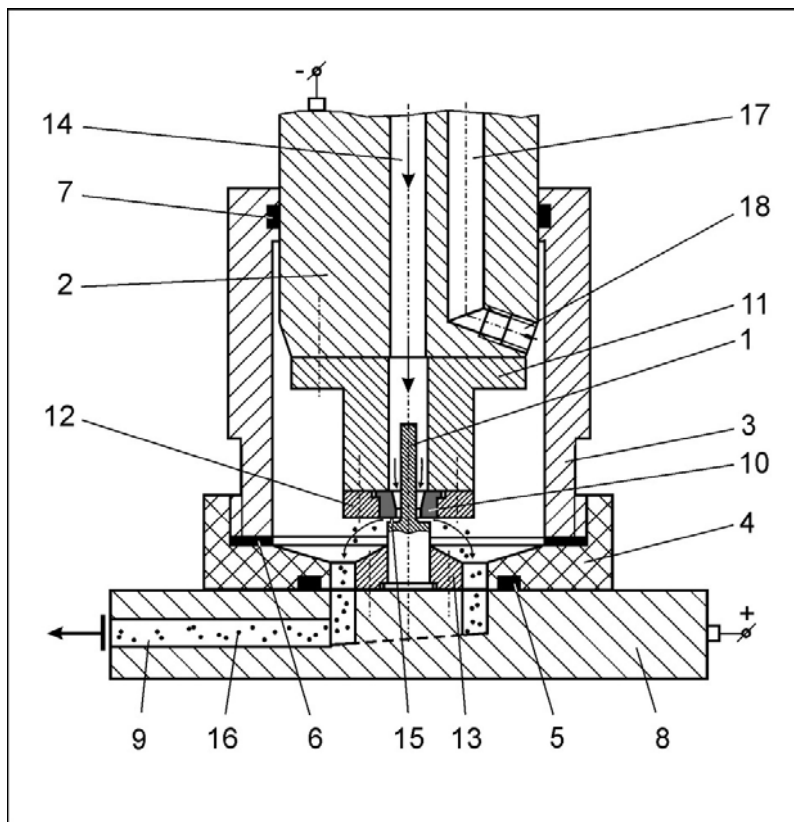


Рисунок 4 – Схема розмірної обробки дугою стрижня на електроерозійній головці, що пропонується

Джерело: розроблено авторами.

Головка включає в себе електродотримач 2, рухому герметичну камеру 3, електроізолятор 4, ущільнення 5, 6, 7 та підкладну плиту 8 з каналом 9 для вилучення робочої рідини, разом з продуктами ерозії, із зони обробки, тобто із герметичної камери 3. Для обробки стрижня 1 герметичну камеру 3 руками піднімають вгору та на електродотримачі 2 закріплюють графітовий електрод-інструмент 10 за допомогою плити 11 та тримача 12. На підкладній плиті 8 закріплюють заготовку стрижня 1 за допомогою тримача 13, позиціонують заготовку відносно електрода-інструмента 10 та закріплюють підкладну плиту 8 відносно стола верстата (стіл не показано). Далі камеру 3 руками переміщують вниз до контакту електроізолятора 4 з горизонтальною поверхнею підкладної плити 8. Включають насос подачі робочої рідини у внутрішню порожнину камери 3 через отвір 14 в електродотримачі 2, джерело живлення постійним технологічним струмом (звичайно зварювальний випрямляч) та ведуть обробку стрижня 1 з використанням ручної подачі електрода-інструмента 10 (механізм подачі не показано).

В процесі обробки електрична дуга 15, що стиснута потужним поперечним потоком робочої рідини, безперервно горить між торцевими поверхнями електрода-інструмента 10 та стрижня 1, а гідродинамічний потік вилучає продукти ерозії із зони обробки. Під дією сили тяжіння продукти ерозії 16 (металевий порошок) падають вниз та через канал 9, в якому швидкість потоку достатня, повністю вилучаються із головки в фільтр, а очищена робоча рідина повертається в бак.

Слід відмітити, що канал 17 головки, який призначено для подачі робочої рідини в герметичну камеру 3 при зворотному прокачуванні, попередньо закривають пробкою 18.

Висновки. Запропоновано нову конструкцію електроерозійної головки для РОД стрижнів на базі настільного свердлувального верстата та описано принцип її роботи. Показано, що її використання покращує експлуатаційні характеристики та дозволяє вилучати продукти ерозії із зони обробки без застосування ручної праці.

Список літератури

1. Боков В. М. Технологія розмірної обробки дугою. Історичний нарис, верстати. Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2020. 316 с.
2. Боков В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою: монографія. Кіровоград : Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2002 300 с.
3. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.07 / НТУУ «КПІ» Київ, 1999. 36 с.
4. Боков В. М., Попова М. І. Обробка отворів електричною дугою: монографія. Кіровоград : Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2014 160 с.
5. Боков В. М., Сіса О. Ф. Оброблюваність матеріалів електричною дугою : монографія. Кіровоград : Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2013. 172 с.
6. Боков В. М. Фізичні процеси спец технологій. Експериментальні дослідження. Збірник статей: навчальний посібник . Кропивницький : Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2022. 625 с.
7. Боков В. М. Розмірна обробка електричною дугою кувальних штампів : монографія. Кіровоград : Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс. ЛТД», 2012. 178 с.

References

1. Bokov, V. M. (2020). *Technology of dimensional arc processing. Historical essay, machine tools*. Kropivnitskiy: PP «Eksklyuziv-Sistem» [in Ukrainian].
2. Bokov, V. M. (2002). *Dimensional shaping of surfaces by electric arc*. Kirovograd: Poligrafichno-vidavnicхий tsentr TOV «Imeks LTD» [in Ukrainian].
3. Nosulenko, V. I. (1999). *Dimensional processing of metals by electric arc*. Extended abstract of candidate's thesis. NTUU «KPI» Kiyiv [in Ukrainian].
4. Bokov, V. M. & Popova, M. I. (2014). *Processing of holes by electric arc*. Kirovograd: Poligrafichno-vidavnicхий tsentr TOV «Imeks LTD» [in Ukrainian].
5. Bokov, V. M. & SIsa, O. F. (2013). *Machinability of materials by electric arc*. Kirovograd: Poligrafichno-vidavnicхий tsentr TOV «Imeks LTD» [in Ukrainian].
6. Bokov, V. M. (2022). Physical processes of special technologies. Experimental studies. *Zbirnik statey: navchalnyi posibnik*. Kropivnitskiy: Poligrafichno-vidavnicхий tsentr TOV «Imeks LTD» [in Ukrainian].
7. Bokov, V. M. (2012). *Rozmlrna obrobka elektrichnoyu dugoyu kuvalnih shtamplv*. Kirovograd: Poligrafichno-vidavnicхий tsentr TOV «Imeks – LTD» [in Ukrainian].

Anton Serheiev, post-graduate, **Viktor Bokov**, Prof., PhD tech. sci., **Vitaly Shmelov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Improvement of the EDM Head for DIMENSIONAL Treatment of Rods with an Arc on the Basis of a Desktop Drilling Machine

Modern enterprises use various equipment for the production of rods, for example, hydraulic presses for direct extrusion and metal cutting machines. However, this equipment is not used for the production of rods from hard-to-process materials. In this regard, EDM machines are of some practical interest, as they are more universal and reliable.

Electroerosion machines that can be used for the manufacture of rods include electric spark machines, electric pulse machines and machines for dimensional processing by electric arc (ROD - dimensional processing by arc). It is shown that the most productive machines are those implementing the ROD method. However, known machines for ROD rods have a high cost and occupy a large area, and therefore cannot be applied in repair factories and workshops.

There are well-known electroerosion heads for dimensional treatment with an arc for metal-cutting equipment. They have a low cost and occupy a small area, but do not provide high-quality and accurate processing of rods. This is due to the fact that the working fluid together with erosion products moves in the end interelectrode gap in the direction from the periphery to the center of the electrode-tool - reverse pumping. As a result of this, the lateral interelectrode gap in the direction of the liquid flow continuously increases, the lateral surface of the rod is shaped like a cone, and its roughness increases.

A well-known electroerosion head for dimensional processing with an arc based on a desktop drilling machine. When processing rods, it is adjusted from reverse to direct pumping, in which the working fluid in the end interelectrode gap moves in the direction from the center to the periphery of the electrode-tool. As a result of the fact that the erosion products do not fall into the lateral interelectrode gap, the rod is formed in a cylindrical shape, and the roughness of the treated side surface is noticeably reduced. However, during operation of the known EDM head, the erosion products are not removed from the sealed chamber, but accumulate in it. The latter is due to the fact that the level of intake of the working fluid together with the erosion products in the sealed chamber of the head is much higher than the level of the end interelectrode gap and the erosion products must move upwards. Since there is no hydrodynamic component of upward movement of the particle in the hermetic chamber, after processing each rod, the operator must clean the chamber from erosion products, which is very inconvenient and time-consuming.

The purpose of the study is to improve the operational characteristics of the EDM head during ROD of rods due to the creation of conditions for the removal of erosion products from the processing zone.

The proposed new EDM head for dimensional treatment of rod arcs on the basis of a table-top drilling machine is supplied with a backing plate through which the working fluid, together with the erosion products, are removed from the treatment zone. Under the influence of gravity, erosion products (metal powder) fall down, and through a channel in which the flow rate is sufficient, are completely removed from the head to the filter, and the purified working fluid is returned to the tank. It is shown that the use of such a head improves

operational characteristics and allows the removal of erosion products from the processing area without the use of manual labor.

EDM head, erosion products, arc dimensional processing, hydrodynamics, desktop drilling machine

Одержано (Received) 25.05.2024

Прорецензовано (Reviewed) 26.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК633.522:664.3.032

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.55-62>**В.О. Шейченко**, проф., д-р техн. наук*Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна**e-mail: vsheychenko@ukr.net***Д.О. Петраченко**, канд. техн. наук*Відокремлений структурний підрозділ Глухівський агротехнічний фаховий коледж**Сумського національного аграрного університету, м. Глухів, Україна**e-mail: dpetrachenko@i.ua*

Обрушування насіння промислових конопель механізмами з підвищеною продуктивністю

В статті наведено результати дослідження технологічного процесу обрушування насіння промислових конопель. Метою роботи є підвищення продуктивності технологічного процесу обрушування за умов збереження якості ядер насіння конопель. Розроблено та досліджено експериментальний зразок відцентрового механізму обрушування, здатного працювати з насінням, що не потребує попереднього калібрування. Встановлено раціональні параметри відцентрового обрушувача: частота обертання робочого колеса 6200 ± 200 об./хв., швидкість подачі – 100 кг/год., вологість сировини – в межах 8,8-11,5%. Зазначені параметри уможливили збільшити вихід конопляних ядер до максимально можливих показників. За результатами проведених досліджень збільшено пропускну спроможність пристрою від 30 кг/год. до 100 кг/год. За результатами проведеного багатофакторного експерименту отримано математичні моделі процесу та встановлено залежність ефективності обрушування від обраних параметрів. Отримані результати мають практичне значення для галузі переробки конопель і можуть бути застосовані для вдосконалення існуючих технологічних рішень.

обрушування насіння, конопля, відцентровий механізм, продуктивність, оптимізація, технологічні параметри, ефективність

Постановка проблеми. Зростання попиту на натуральні та корисні харчові продукти стає стимулом для розроблення нових технологічних рішень у переробці насіння промислових конопель. Сьогодні особливий інтерес викликає продукт, який отримують в результаті обрушування насіння – конопляні ядра. Конопляним ядрам притаманний високий вміст необхідних для організму людини елементів, зокрема, білка, жирних кислот, вітамінів тощо [1, с.10-12]. Крім того, конопляні ядра мають приємний смак, що сприяє їх популярності як самостійного продукту, а також як інгредієнта для різноманітних страв та напоїв [2].

Процес обрушування, який раніше розглядався лише як технологічний етап підготовки насіння до подальшого вичавлення олії [3], набуває сьогодні нового значення. Відділення оболонки від ядер підвищує не тільки якість кінцевого продукту, але й його поживну цінність. Звільнені від лушпиння ядра конопель мають більшу біодоступність поживних речовин в порівнянні з цілим насінням, завдяки чому корисні компоненти легше засвоюються організмом [4].

Незважаючи на очевидні переваги використання обрушеного насіння конопель у харчовій промисловості, процес обрушування все ще потребує додаткового наукового обґрунтування. Існує брак наукових досліджень, які б повною мірою висвітлювали

оптимальні технологічні прийоми та режими обрушування насіння промислових конопель. Це створює певний інформаційний вакуум, який обмежує впровадження нових техніко-технологічних рішень у виробництво. Вивчення найбільш раціональних підходів до процесу дозволить не лише підвищити якість харчових продуктів на основі конопляного ядра, але й сприятиме більш ефективному використанню ресурсів коноплярства загалом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відокремлення оболонки насіння від ядра є складним процесом, для якого використовують різноманітні методи та механізми. Вибір методу обрушування залежить від біологічних особливостей насіння та його фізико-механічних властивостей [5]. Це пов'язано з тим, що насіння і його компоненти демонструють значну розбіжність характеристик не лише між різними видами, але й всередині одного сорту. Для руйнування зовнішньої оболонки насіння використовують розрізування [6], фрикційне [7] та абразивне [8] тертя, багаторазовий удар [9], одноразовий орієнтовний удар [10].

Відзначимо, що обрушування кожного виду насіння вимагає власного підходу до процесу та адаптованого механізму його реалізації. Підтвердженням цьому є результати роботи [7], в якій представлено спробу розробки універсального механізму для обрушування насіння різних культур. Для відокремлення зовнішньої оболонки насіння спелти та емеру використовували обрушувачі, які призначені для обробки інших культур, таких як ячмінь, овес, соняшник. Для цього проводили модернізацію і налаштування обладнання, оскільки кожен вид насіння має свої специфічні особливості, які потребують регулювання під час обробки. Проте створення універсального механізму виявилось складним завданням, оскільки вимагало значних компромісів, що не завжди забезпечували оптимальні умови для обрушування кожного виду насіння. Зазначено, що навіть під час обробки різних видів насіння спелти доводилося змінювати налаштування механізму.

Аналіз існуючих досліджень показує, що існує потреба в спеціалізованих механізмах для обрушування насіння промислових конопель. Існуючі методи не забезпечують повної відповідності вимогам обробки цього типу насіння, що зумовлено його унікальними морфологічними особливостями та неоднорідними фізико-механічними характеристиками. Зокрема, насіння конопель має нерівномірну форму і різний ступінь твердості складових, що значно ускладнює процес його обрушування.

У зв'язку з цим проведено дослідження різних способів обрушування [11] насіння конопель. Результати показали, що для насіння промислових конопель найкращим є метод орієнтовного одноразового удару. Оскільки даний метод дозволяє досягти високого рівня відокремлення ядра від оболонки при мінімальних втратах продукту. Це є важливою перевагою в порівнянні з іншими методами, які вимагають попередньої підготовки насіння.

Подальші дослідження [12] дозволили розробити конструкцію відцентрового механізму, який здатний обрушувати насіння без необхідності попередньої підготовки. Ця особливість значно спрощує процес обробки, оскільки зникає потреба в попередньому калібруванні насіння та нормуванні його вологості перед обрушуванням. За результатами випробувань, даний механізм забезпечує отримання 30–35% конопляного ядра, при цьому рівень засміченості кінцевого продукту не перевищує 1%. Це є важливим досягненням, яке свідчить про ефективність механізму та його потенціал для застосування у виробничих умовах.

Однак розроблений механізм має суттєвий недолік – низьку продуктивність, яка обмежується пропускнуною спроможністю по сировині на рівні 30 кг/год. Цей показник є низьким для використання в промислових умовах, де вимагається значно вища

продуктивність. Таким чином, подальші дослідження повинні бути спрямовані на вдосконалення цього аспекту, зокрема на збільшення пропускної спроможності та підвищення загальної ефективності процесу обрушування.

З огляду на це, розробка нових технічних рішень для підвищення ефективності механізмів обрушування насіння промислових конопель є нагальним завданням. Досягнення в цьому напрямку можуть мати значний вплив на розвиток галузі, сприяючи підвищенню якості кінцевого продукту та розширенню можливостей його використання у різних сферах виробництва. Впровадження інноваційних підходів дозволить вирішити наявні проблеми та забезпечити високу ефективність роботи механізмів без втрати якості продукції.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення ефективності коноплевиробництва завдяки обрушуванню насіння промислових конопель механізмами з підвищеною продуктивністю.

Виклад основного матеріалу дослідження. На основі проведених досліджень розроблено експериментальний зразок відцентрового обрушувача, призначеного для обрушування насіння конопель (рис. 1). Конструкція пристрою включає бункер 1, патрубок 2, робоче колесо 3, відбійну деку 4, вивантажувальний лоток 5 і електродвигун 6.

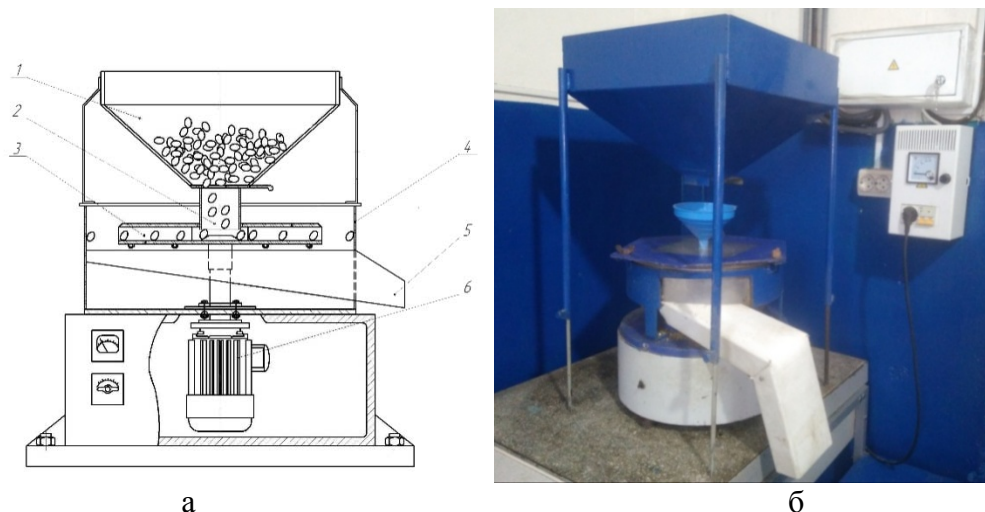


Рисунок 1 – Експериментальний пристрій для обрушування насіння конопель:
а – функціональна схема, б – загальний вигляд

Джерело: розроблено авторами

Відокремлення ядер насіння від оболонки здійснюють завдяки орієнтовному удару насінини об відбійну деку. Механізм обрушувача дозволяє працювати з насінням конопель вологістю від 8,8 % до 13,0 %, вмістом органічних домішок у межах 3–15 %. Завдяки конструкційним особливостям, цей пристрій усуває потребу в поділі насіння на фракції за розміром перед обробкою, що значно полегшує процес і скорочує витрати часу й зусиль.

Принцип роботи механізму полягає в одноразовому орієнтованому ударі насінини об відбійну деку, що забезпечує точне відокремлення оболонки від ядра. Поєднання оптимальної кутової швидкості колеса з точною відстанню до деки виключає необхідність у попередній підготовці – ретельному сортуванні насіння. Проте після одного проходу через обрушувач залишаються недорושеними 41,2–76,4 % насіння, що потребує повторного оброблення. Повний цикл оброблення однієї партії включає три проходи, що уможливує виділити близько 35,0 % готових конопляних ядер.

Дослідження проводили на насінні промислових конопель української селекції без попереднього його калібрування. Змінними параметрами виступали налаштування обрешувача (частота обертання робочого колеса, подача сировини) і властивості насіння (вологість). Насіння подавалося в неорієнтованому сипучому стані на середину робочого диска. Повторність в досліджах – дев'ятиразова. Маса окремої наважки насіння для кожного з варіантів дослідження становила 1,0 кг. Одержану після пропускання через механізмрушанку розділяли на повітряно-решітній модернізованій зерноочисній машиніСМ-0,15 на чотири фракції: ядро – звільнені від насінневих оболонок цілі та зруйновані ядра; недоруш – цілі та пошкоджені насінини; січка – дрібно розрубане ядро; відходи – насінневі оболонки, дрібно розмелене насіння, масляний пил.Вагу кожної фракції визначали за допомогою терезів. Обробку експериментальних результатів проводили у програмному середовищі Microsoft Excel та Statistica10.0.

Як відомо, збільшення економічного ефекту при виробництві можливо досягти за рахунок зменшення витрат на одиницю виробництва продукції або збільшення виробництва при сталих витратах. Прагнення до підвищення рівня продуктивності є невід'ємною складовою будь-якого виробництва, що обумовлює необхідність вирішення даного питання. В нашому випадку одним з можливих варіантів підвищення ефективності процесу обрешування є збільшення пропускної спроможності розробленого механізму.

За результатами досліджень встановлено[12], що частота обертання робочого колеса істотно впливає на кількість вільного від оболонки насінневого ядра в рушанці. Оптимальною частотою обертання робочого колеса, за якої процес обрешування протікає задовільно, є 2000 об/хв. При цьому пропускна спроможність обрешувача складає 30 ± 1 кг/год. Якщо перерахувати на 8-годинний робочий день, то за умови безперервного виробництва продуктивність складе близько 240 кг за зміну. Якщо ж провести паралель із розробленою[3] технологією переробки насіння на олію, то її продуктивність становить до 800 кг за зміну. Як бачимо, продуктивність процесу обрешування потребує істотного підвищення, тому роботу направлено на пошук шляхів збільшення пропускної спроможності обрешувача. За орієнтир було обрано продуктивність технології перероблення насіння на олію – 800 кг/зм.

Для визначення можливих шляхів рішення даного питання проведено багатофакторний експеримент (ПФЕ³). Умови проведення дослідження та фактори, які вивчались в процесі експерименту, визначено з урахуванням отриманих результатів. В процесі проведення ПФЕ³ досліджуваними факторами виступали: частота обертання робочого колеса (N), швидкість подачі насіння (F), вологість насіння (W) (табл. 1).

Таблиця 1 – Рівні факторів та їх натуральні значення

Фактор	Натуральне позначення	Інтервал варіювання	Натуральні рівні варіювання		
			верхній (+)	нульовий	нижній (-)
Частота обертання, об/хв.	N	2000	6000	4000	2000
Швидкість подачі насіння, кг/год.	F	45	120	75	30
Вологість насіння, %	W	1,4	11,5	10,2	8,8

Джерело: розроблено авторами

За умов підвищення продуктивності слід пам'ятати, що ефективність роботи обрешувача (вихід ядер) повинна залишатись, як мінімум, незмінною, а в кращому

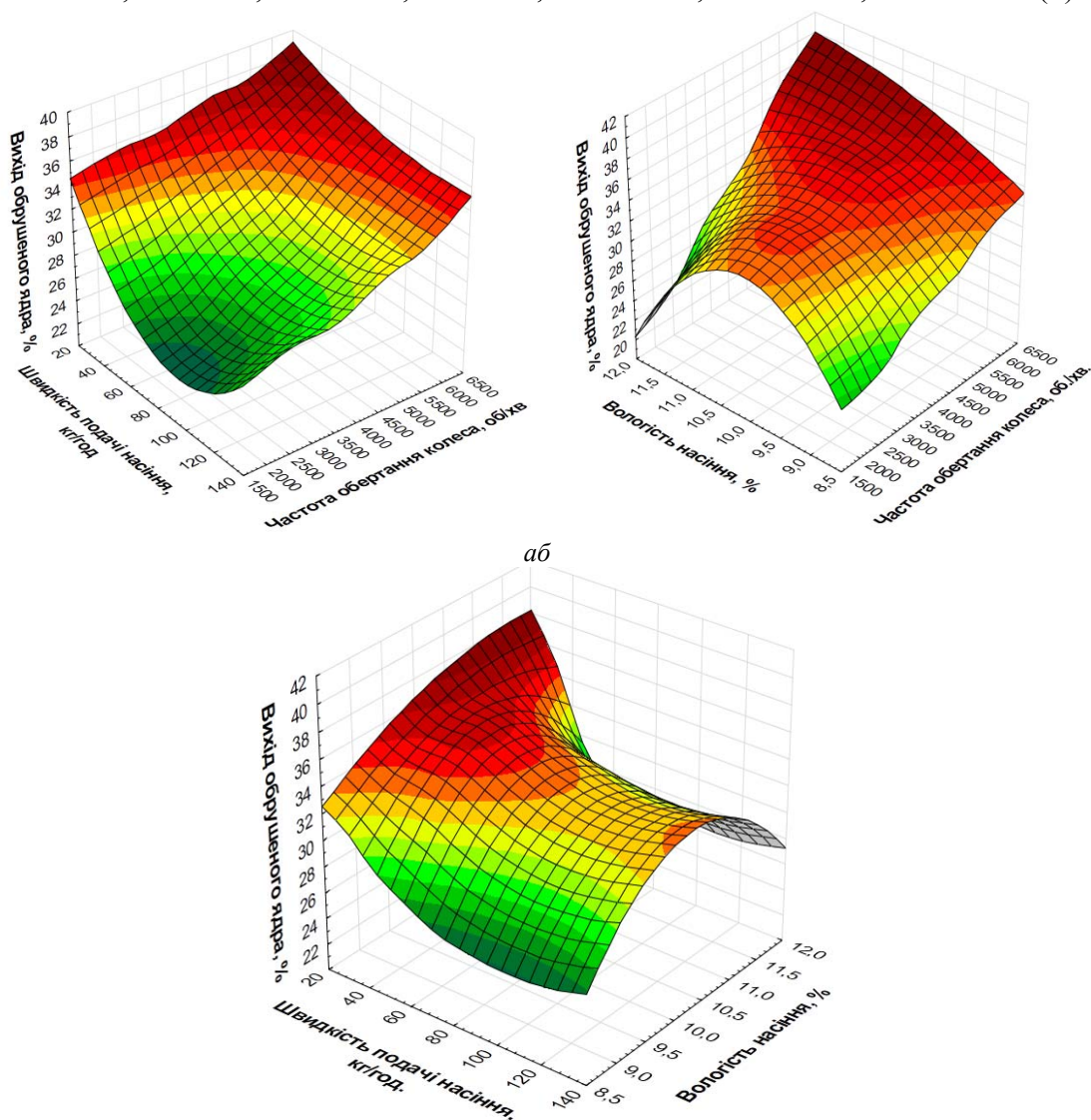
випадку – підвищитись. Тому за параметр оптимізації було обрано кількість отриманого в процесі обрушування ядра. Даний показник враховував загальний % виділених ядер. Кількість пропусків недорученого насіння через обрушувач становила три рази. Експеримент проводили відповідно до матриці планування згідно до методичних рекомендацій [13].

За результатами оброблення експериментальних даних програмним забезпеченням Statistica 10.0 отримано рівняння регресії (1), (2), (3) та побудовано графічні залежності (рис. 2).

$$R = 37,1227 + 0,0002N - 0,249F + 1,2778 \times 10^{-7} N^2 + 6,6468 \times 10^{-6} NF + 0,0011F^2 \quad (1)$$

$$R = -146,8232 - 0,0038N + 35,9342W + 1,2778 \times 10^{-7} N^2 + 0,0004NW - 1,8306W^2 \quad (2)$$

$$R = -155,3035 + 38,0888W - 0,1602F - 1,8306W^2 - 0,0061WF + 0,0011F^2 \quad (3)$$



6

а – частота обертання – швидкість подачі; б – вологість насіння – частота обертання;
в – швидкість подачі – вологість насіння.

Рисунок 2 – Поверхні відгуку ефективності обрушування насіння конопель в залежності від досліджуваних факторів

Джерело: розроблено авторами

На основі аналізу отриманих результатів зазначено наступне. Збільшення частоти обертання робочого колеса та швидкості подачі насіння нелінійно впливає на вихід обрушених ядер. За умов збільшення частоти обертання до певного оптимального рівня, вихід ядер зростає. Проте після певного порогу починає знижуватись через перевищення швидкості подачі.

Підвищення вологості насіння позитивно впливає на вихід ядер лише в межах оптимальної частоти обертання. За надмірного збільшення частоти обертання вихід зменшується, що може бути викликано зміненням характеристик подрібнення.

За оптимальних значень швидкості подачі та вологості насіння досягають високого виходу ядер. Проте за значного збільшення вологості або швидкості подачі над оптимальними значеннями відбувається зниження ефективності, що пов'язано з підвищеним навантаженням на механізм та підвищеним дробленням насіння.

Оптимальні параметри кожного фактору дозволяють досягти максимального виходу ядер за умов збереження їх якості. Усі три фактори (частота обертання, швидкість подачі та вологість насіння) мають складний вплив на ефективність обрушування. Відхилення від оптимальних умов зменшує ефективність процесу. Зазначене важливо враховувати під час налаштування механізму.

Виходячи із графічного відображення результатів (рис. 2), зазначимо, що за умов підвищення подачі насіння до 120 кг/год. оберти робочого колеса необхідно збільшувати до 6000–6500 об./хв. При збільшенні частоти обертання робочого колеса до 6500 об./хв. вплив вологості оброблюваного насіння на вихід ядра зменшується. За частоти обертання колеса 6000–6500 об./хв. можливо одержати максимальний вихід ядер в дослідженому діапазоні вологості насіння (8,8–11,5%). При частоті обертання колеса 6000–6500 об./хв. спостерігається стабільність процесу обрушування при подачі насіння 80–120 кг/год.

За результатами досліджень встановлено раціональні значення параметрів роботи механізму: швидкість подачі насіння 120 кг/год., частота обертання робочого колеса 6000 об./хв. На підставі експертного оцінювання отриманих результатів зменшили швидкість подачі до 100 кг/год. Частота обертання колеса визначалася діапазоном 6200 ± 200 об./хв. Кінцеве значення частоти обертання залежить від вологості оброблюваного насіння та регулюється по фактичним результатам роботи пристрою. В результаті проведених досліджень пропускну спроможність механізму вдалося збільшити більш, ніж в 3 рази: від 30 кг/год. до 100 кг/год.

Подальші дослідження доцільно зосередити на вдосконаленні механізму з метою підвищення стабільності його продуктивності за змінних значень вологості насіння. Зазначене уможливить підвищити ефективність виробництва та стабільно отримувати продукцію високої якості в умовах промислового використання.

Висновки. Відзначено, що для насіння промислових конопель найбільш ефективним методом обрушування є метод орієнтовного однократного удару.

За результатами експериментальних досліджень встановлено раціональні параметри процесу обрушування: частота обертання робочого колеса 6200 ± 200 об./хв., швидкість подачі 100 кг/год., вологість насіння 8,8–11,5%. Зазначені параметри уможливили підвищити пропускну спроможність пристрою від 30 кг/год. до 100 кг/год.

Відзначено, що підвищення подачі насіння до 120 кг/год. призводить до відповідного збільшення обертів робочого колеса (6000–6500 об./хв). За таких умов вплив вологості оброблюваного насіння на вихід ядер зменшується. За частоти обертання колеса 6000–6500 об./хв. одержано максимальний вихід ядер в дослідженому діапазоні вологості насіння (8,8–11,5%).

Список літератури

1. Коноплярство: наукові здобутки і перспективи / Вировець В.Г та ін.; за ред. І.О. Маринченко. Суми, 2018. 158 с.
2. Presa-Lombardi J., García F., Gutierrez-Barrutia M.B., Cozzano S. Hemp seed's (*Cannabis Sativa* L) nutritional potential for the development of snack functional foods. *OCL-Oilseeds and Fats Crops and Lipids*. 2023. Vol. 30. <https://doi.org/10.1051/ocl/2023025> (дата звернення 20.10.2024)
3. Петраченко, Д., Коровченко, С., Сова, Н. Олія промислових конопель: властивості, особливості, виробництво. *Наукове забезпечення розвитку коноплярства у XXI столітті*. 2024. С.156–177. <https://doi.org/10.48096/monograph.2024.156-177> (дата звернення 20.10.2024)
4. Schultz C., Lim W., Khor S., Neumann K., Schulz J., Ansari O., Skewes M., Burton R. Consumer and health-related traits of seed from selected commercial and breeding lines of industrial hemp, *Cannabis sativa* L. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2020. Vol. 2, 100025. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2020.100025> (дата звернення 20.10.2024)
5. Lindström L.I., Franchini M.C., Nolasco S.M. Sunflower fruit hullability and structure as affected by genotype, environment and canopy shading. *Annals of Applied Biology*. 2022. №180 (3), P. 338–347. <https://doi.org/10.1111/aab.12735> (дата звернення 20.10.2024)
6. Junyan Zhang. Design of the gordon euryale seed automatic shelling machine. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1423/1/012053> (дата звернення 20.10.2024)
7. Brian Baker. Dehulling Ancient Grains: Economic Considerations and Equipment. 2015. URL: <https://eorganic.org/node/13028> (дата звернення 20.10.2024)
8. Manjunath M. Ullegaddi, N.C. Mahandra Babu, Abdul Rahman Faisal, Miraz Mohammad, M.S. Shreenidhi, Syeda Anjum. Design and development of compact Foxtail millet deshelling machine, *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 42, Part 2, Pages 781-785, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.314> (дата звернення 20.10.2024)
9. Установка для обрушування насіння та виготовлення паливних пелетів (брикетів): пат. 81263 Україна: МПК: В30В 9/02, В30В 11/22. № у 2012 15165; заявл. 29.12.2012; опубл. 25.06.2013, Бюл.№ 12
10. Пристрій для обрушування насіння соняшника: пат. 94419 Україна: МПК: В02В 3/08, А01F 12/28. № а200803082; заявл. 11.03.2008; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 9
11. Петраченко Д.О., Коровченко С.П. Дослідження конструкції механізму для обрушування насіння промислових конопель. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2019. №2, Ч.2. С. 167–171
12. Sheichenko V., Petrachenko D., Koropchenko S., Rogovskii I., Gorbenko O., Volianskyi M., Sheichenko D. Substantiating the rational parameters and operation modes for the hemp seed centrifugal dehuller. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. № 2 (1 (128)), P. 34-48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300174> (дата звернення 20.10.2024)
13. Хайліс Г.А., Коновалюк Д.М. Основи проектування і дослідження сільськогосподарських машин. Київ : НМК ВО, 1992. 320 с.

References

1. Vyrovets, V., Laiko, I. Myhal M. «et al.». (2018). Hemp cultivation: scientific achievements and prospects. Sumy [in Ukrainian].
2. Presa-Lombardi, J., García, F., Gutierrez-Barrutia, M.B. & Cozzano, S. (2023). Hemp seed's (*Cannabis Sativa* L) nutritional potential for the development of snack functional foods. *OCL-Oilseeds and Fats Crops and Lipids*, Volume 30. <https://doi.org/10.1051/ocl/2023025>
3. Petrachenko, D., Koropchenko, S. & Sova, N. (2024). Industrial hemp oil: properties, features, production. *Scientific support for the development of hemp growing in the 21st century*. p.156–177. <https://doi.org/10.48096/monograph.2024.156-177> [in Ukrainian].
4. Schultz, C., Lim, W., Khor, S., Neumann, K., Schulz, J., Ansari, O., Skewes, M., & Burton, R. (2020). Consumer and health-related traits of seed from selected commercial and breeding lines of industrial hemp, *Cannabis sativa* L. *Journal of Agriculture and Food Research*, Volume 2, 100025. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2020.100025>
5. Lindström, L.I., Franchini, M.C. & Nolasco, S.M. (2022). Sunflower fruit hullability and structure as affected by genotype, environment and canopy shading. *Annals of Applied Biology*, 180 (3), 338–347. <https://doi.org/10.1111/aab.12735>
6. Junyan Zhang. (2019). Design of the gordon euryale seed automatic shelling machine. *Journal of Physics: Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1423/1/012053>

7. Brian Baker. (2015). Dehulling Ancient Grains: Economic Considerations and Equipment. Retrieved April 15, 2024, from <https://eorganic.org/node/13028>
8. Manjunath M. Ullegaddi, N.C. Mahandra Babu, Abdul Rahman Faisal, Miraz Mohammad, M.S. Shreenidhi, & Syeda Anjum, (2021). Design and development of compact Foxtail millet deshelling machine, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 42, Part 2, Pp. 781–785, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.314>
9. Kaliuzhnyi V.V., Yeromina N.V. & Levanichev A.V. (2013). Patent of Ukraine 81263. Plant for crushing seeds and making fuel pellets (briquettes). Kyiv: SE «Ukrainian Institute of Intellectual Property».
10. Hrosul L.H., Haponiuk O.I., Pystsov B.O., Hrosul O.L., Yatskova T.I., & Kudashev S.M. (2011) Patent of Ukraine 94419. A device for crushing sunflower seeds. Kyiv: SE «Ukrainian Institute of Intellectual Property».
11. Petrachenko, D. & Koropchenko, S. (2019). Study of the design of the mechanism for crushing the seeds of industrial hemp. Academic notes of the Tavri National University named after V.I. Vernadskyi. Series: Technical sciences. №2, Vol.2. P. 167-171. [in Ukrainian].
12. Sheichenko, V., Petrachenko, D., Koropchenko, S., Rogovskii, I., Gorbenko, O., Volianskyi, M. & Sheichenko, D. (2024). Substantiating the rational parameters and operation modes for the hemp seed centrifugal dehuller. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (128)), 34–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300174>
13. Khailis H.A. & Konovaliuk D.M. (1992). Basics of design and research of agricultural machines. Kyiv: NMK VO, 320 p. [in Ukrainian].

Viktor Sheichenko, Prof., DSc.

State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Dmytro Petrachenko, PhD tech. sci.

Separate Structural Unit of the Hlukhiv Agrotechnical Vocational College of Sumy National Agrarian University, Hlukhiv, Ukraine

Dehulling of Industrial Hemp Seeds with High-Performance Mechanisms

The article presents the results of a study on the technological process of dehulling industrial hemp seeds. The aim of the study is to increase the productivity of the dehulling process while maintaining the integrity of the seed kernels. To achieve this goal, an experimental prototype of a centrifugal dehuller was developed, capable of processing seeds without the need for preliminary calibration or moisture normalization, significantly simplifying the raw material preparation process.

The study investigated the influence of key operating parameters of the mechanism on dehulling efficiency, including the rotational speed of the working wheel, feed rate, and seed moisture content. A multifactorial experiment was conducted, the results of which allowed for the identification of optimal parameter values to achieve maximum productivity and dehulling quality. The optimal parameters of the centrifugal dehuller were established as follows: working wheel rotational speed of 6200 ± 200 rpm, feed rate of 100 kg/h, and raw material moisture content within 8.8–11.5%. Under optimal conditions, the throughput capacity of the mechanism was increased from 30 kg/h to 100 kg/h, ensuring a high yield of quality kernels.

Mathematical models of the dehulling process were developed to determine the dependence of the mechanism's efficiency on the selected parameters. It was found that significant deviations from the optimal parameter values negatively affect the efficiency of the process due to increased seed fragmentation.

The obtained results have significant practical importance for the industrial hemp processing sector, as the developed mechanism can be utilized to improve existing technological solutions. Further research is recommended to focus on enhancing the stability of the mechanism's operation under variable seed moisture conditions and increasing productivity, which will ultimately improve the efficiency of hemp production as a whole.

seed dehulling, hemp, centrifugal mechanism, productivity, optimization, technological parameters, efficiency

Одержано (Received) 29.10.2024

Прорецензовано (Reviewed) 26.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

УДК 631.3

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.63-76>**Е.Б. Алієв**, проф., д-р техн. наук, ст. дослідник, **О.А. Черній**, ст. викл.,**Є.В. Калганков**, ст. викл.*Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна**e-mail: aliev@meta.ua*

Експериментальна перевірка якості еластомерних ущільнень типу O-ring сучасних автотракторних двигунів внутрішнього згорання

Досліджувались еластомерні кільця типу O-ring. При їх стисканні в лабораторній установці до 35% деформації, сила стиску зразків кільця аналога показала більш стрімке зменшення протягом 24 годин, ніж така залежність визначена для оригінальних кілець. При витримці досліджуваних кілець в моторній оливі 168 год, релаксація напруження в матеріалі кільця аналога більш нестабільна. При вимірюванні геометричних параметрів кілець, краща відповідність до стандартних розмірів відмічена в оригінальних кільцях.

двигун внутрішнього згорання, ущільнювальні кільця, фторкаучук, якість виготовлення еластомерних кілець, релаксація напруження, залишкова деформація

Постановка проблеми. Дослідивши та проаналізувавши тенденції зміни структури машинно-тракторних господарств сільськогосподарських підприємств в Україні, було відмічено, що наразі все більше господарі купують техніку закордонного виробництва, як нову так і бувшу у використанні. Такі зразки техніки часто потребують особливого підходу до проведення їх технічного сервісу. Перед власниками все частіше стоїть питання, чи купувати запчастини оригінального виробництва, чи придбати такі ж деталі, що виготовленні іншими виробниками. Особливо слід відмітити, що економічні затрати характеризуються дуже великою різницею. Тому результати досліджень по якості запчастин мають дати власникам господарств підґрунтя для прийняття ним рішень, що сприяли б в результаті підвищенню надійності відремонтованої техніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Забезпечення герметичності з'єднань в машинобудуванні все частіше досягається за рахунок постановки між деталями прокладок, виконаних з еластомерних матеріалів. А так як еластомери схильні до зміни своїх реологічних параметрів в часі, все більш актуальним є дослідження поведінки ущільнень в конкретних конструкціях машин, для підвищення їх показників надійності.

Явище релаксації напруження в еластомерному ущільнювальному кільці виконаного з гідрогенізованого нітрил бутадієнового каучуку, досліджувалось в праці [1]. Автори представили результати експериментальних досліджень поведінки матеріалу кільця, встановивши в нього тензодатчик. Також проведено моделювання в сервісі COMSOL Multiphysics version 5.2a поведінки контактної тиску в дослідному зразку кільця залежно від часу. Моделювання показало вигляд епюр напруження в матеріалі кільця при його стисканні та після витримки в стисненому стані протягом 168 годин. Отримані експериментальні та модельовані залежності зміни значення контактної тиску (бар) від часу витримки стиснутого кільця (год). При витримці 72 год, контактний тиск в кільці зменшується на 15% від початкового. Автори відмічають, що для підвищення узгодженості дослідних та експериментальних даних, потрібно удосконалювати методику моделювання.

Дослідження релаксації напруження в еластомері з торговою назвою «Vamac» представлені в роботі [2]. Досліджувались кільця прямокутного перерізу та шайби вирізані з даного еластомеру, які характеризувались різним масштабним фактором. Для кілець масштабний фактор становив $SF=0,5; 0,69; 1,25$. Для шайб – $SF=0,5; 0,74; 1,47$. Стискання зразків проводилось до значень відносної деформації 15%, 25%, 35%. При моделюванні релаксації напруження в матеріалі зразків використано програмне забезпечення NL FEA (MSC.Marc). Зміна значення сили стискання зразків при 24-годинному випробуванні описується законом $Y = 1796.9 (x)^{-0.0334}$. Встановлено, що при збільшенні величини масштабного фактора, при всіх значеннях відносної деформації зразків, сила притискання зразків зростає. Також встановлено, що найбільшу силу притискання при витримці 1 рік зберігають зразки типу шайба при відносній деформації 25%. Використовуючи дані досліджень, можна розрахувати довговічність еластомерних деталей та спрогнозувати їх надійність.

В роботі [3] представлено результати випробування зразків з еластомеру фторкаучук (FKM), з торговою назвою «Viton». Проводились такі механічні випробування при температурах $-8^{\circ}\text{C}, 0^{\circ}\text{C}, 23^{\circ}\text{C}, 80^{\circ}\text{C}, 100^{\circ}\text{C}$: циклічні навантажувальні випробування; релаксаційні тести; багатоступеневі тести на релаксацію. При циклічному розтягу та стиску зразків відмічена деяка асиметрія петлі гістерезису: при стискуванні напруження в зразку мало більші числові значення ніж при його розтягу. В дослідження на релаксацію напруження при стисканні зразків з відносною деформацією 30% відмічено, що зі збільшенням температури зразків зменшується величина падіння напруження до рівноважного значення (при 100°C напруження знизилось за 900 с на 5%, а при -8°C – на 60%). Багатоступеневі тести на релаксацію показали, що при стискуванні зразків рівноважне значення напруження в матеріалі менше залежить від температури зразків, ніж при розтягу. Числове значення рівноважного напруження при розтягу збільшується зі збільшенням температури зразків. Модель поведінки матеріалу було реалізовано в програмі кінцевих елементів під назвою Herezh++. Використовуючи дослідні дані, розраховані параметри моделі Максвела: в'язкість, час релаксації та модуль пружності для матеріалу «Viton», який випробували при різних температурах.

Випробування фланцевих ущільнюючих прокладок, виготовлених з еластомерів Nitrile, Nitrilecork, Viton®, Viton® A401C, Viton® GFLT600, NanoViton® A401C, та Kalrez®, представлено в роботі [4]. Експерименти на прискорене старіння в умовах циклічних навантажень при стискуванні (кількість циклів зміни навантажень $2 \cdot 10^5$) та температури 100°C , показали, що ущільнюючі кільця з прямокутним поперечним перерізом мають менше числове значення показника залишкової деформації, ніж кільця з круглим перерізом. Затиснувши зразки кілець з дослідних еластомерів з відносною деформацією 20% та витримавши їх в мінеральному мастилі та повітрі при температурі 100°C протягом 144 год, отримано в результаті найменшу величину відносної деформації зразків (в повітрі – 5,04 %, в мастилі – 7,6 %) виготовлених з еластомеру марки Viton® A401C. В тестах на релаксацію напруження при відносній деформації зразків 25%, витримці 144 год при температурі 100°C в повітрі, найменше зниження напруження (близько 76% від початкового) показали зразки з еластомеру марки Viton®. При цьому в зразків з нітрильного каучуку, при вказаних умовах падіння напруження складало до 43% від початкового його значення. Результати дослідження вказують, що для виготовлення ущільнюючих кілець, що працюють в мастилі з високою температурою, найбільше підходить фторкаучук з торговою назвою «Viton».

Використовуючи програмне забезпечення ANSYS Workbench 16.2, автори в роботі [5] змоделивали поведінку ущільнюючого кільця типу O-ring виготовленого з

бутадієнакрилонітрильного каучука (NBR) з поперечним перерізом 3,53 мм, встановленого в канавку деталі. Модель показала, що найбільше зміщення кільця становить 0,44 мм близько до зазору в спряжених деталях при витримці кільця в часі 5402 с під тиском 50 бар, а максимальний тиск кільця на поверхню деталі становив 6,54 МПа. Найбільше значення напружень виникає по краям кільця в місцях, де під тиском матеріал кільця заповнює зазор між деталями. Отже, основним фактором швидкого руйнування кілець типу O-ring, автори називають наявність та величину зазору між поверхнями ущільнюючих деталей, шорсткість поверхні деталей та наявність змазки на поверхні кільця.

В роботі [6] пропонується метод моделювання деталей, виконаних з еластомерних матеріалів. Автори довели, що потрібно вводити в конститутивні моделі розрахунку еластомерів параметри об'ємного стиску, такі як об'ємний модуль стиску. Удосконалення моделі Муні-Рівлена при визначенні напружено-деформованого стану еластомерних кілець типу O-ring, збільшує точність аналітичних розрахунків міцності та довговічності кілець.

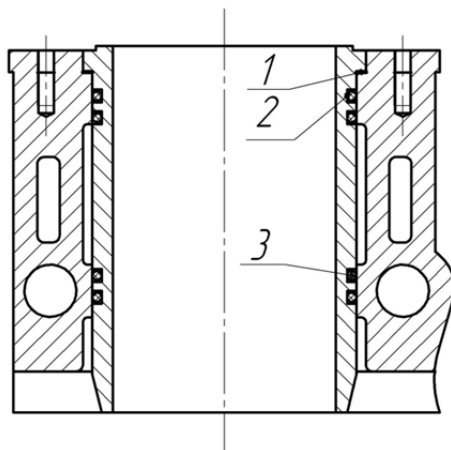
В монографії професора Дирди В.І. представлено наукові здобутки по проектуванню деталей, виготовлених з гуми. А результати дослідження їх зміни фізико-механічних властивостей у часі та при дії агресивних середовищ, є основою при виготовленні деталей з еластомерів і в теперішній час.

В роботі [7] висвітлено результати випробувань на величину релаксації напруження та залишкової деформації матеріалів сучасної рецептури виготовлення, призначених для захисту робочих поверхонь складових частин машин від шкідливого впливу абразивних частинок, з якими вони перебувають в контакті. Досліджувались термопластичний поліуретан та футерувальна гума. Відносна деформація зразків становила 40 %. Поліуретан марки «Desmopan» мав менші показники зміни напруження в матеріалі в порівнянні з зразками, що були виготовлені з гуми. Але при цьому значення модуля пружності поліуретану є більшими ніж в гумових зразках. Дослідники відмітили, що негативною характеристикою поліуретану є його, порівняно з гумою, більші показники залишкової деформації. Також порівнювались характеристики зразків, що виготовлені з нової гуми та гуми, що має напрацювання 9300 годин. В результаті відмічено, що зі збільшенням напрацювання гуми, відбуваються перетворення в її внутрішній структурі, що є причиною зміни її реологічних характеристик.

Дослідження експлуатаційної надійності гумових ущільнень передніх ведучих мостів сільськогосподарських тракторів JohnDeere висвітлено в роботі [8]. Результати показали, довірчий інтервал напрацювання сальників, при якому відбувається їх вихід з ладу становить 381,75 мото-год. – 547,2 мото-год. Довірча ймовірність становила 80 %. Таким чином, заміна цих ущільнень при проведенні регламентних технічних робіт до настання визначеного інтервалу, надасть змогу контролювати надійність трактора.

Зміну реологічних параметрів в часі гуми 2959 віброізоляторів вібраційних живильників, досліджено в роботі [9]. Експеримент показав, що за 24000 год роботи вібраційного живильника, завдяки старінню гуми 2959 віброізоляторів, амплітуда коливань робочого органу віброживильника зменшилась з 5,2 мм до 3,7 мм. Це призвело до суттєвого зменшення продуктивності конвеєра.

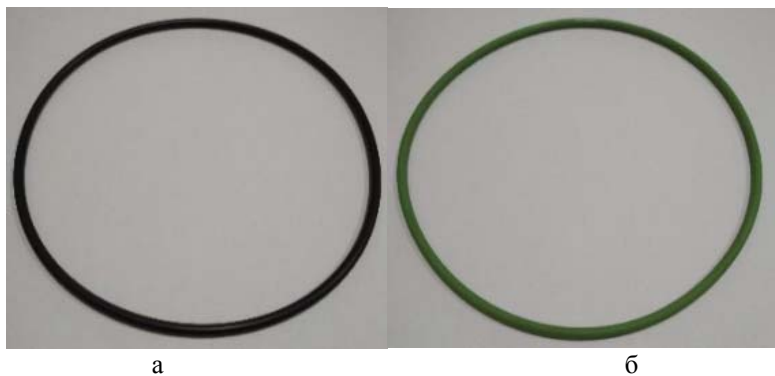
Постановка завдання. У дослідженні прийняті кільця еластомерні стандартного розміру 144×152×4. Такі деталі призначаються для герметизації посадки гільзи мокрої в посадкових місцях в блоці-картері двигуна внутрішнього згоряння. Зважаючи на інтенсивний їх нагрів та взаємодію з агресивним середовищем (моторна олива, охолоджуюча рідина) їх якість повинна бути на високому рівні.



1 – металеве кільце-підкладка; 2 – ущільнювальні еластомерні кільця типу O-ring верхнього поясу гільзи; 3 – ущільнювальні еластомерні кільця типу O-ring нижнього поясу гільзи

Рисунок 1 – Схема ущільнення мокрої гільзи двигуна внутрішнього згорання

Джерело: розроблено на підставі [12]



а

б

а – оригінальне; б – аналог

Рисунок 2 – Досліджувані ущільнювальні кільця типу O-ring

Джерело: розроблено авторами

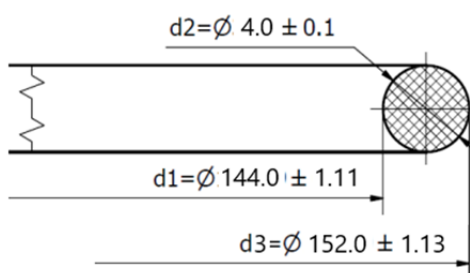


Рисунок 3 – Розміри досліджуваних ущільнювальних кілець типу O-ring згідно з ISO 3601-1

Джерело: розроблено авторами

Ще однією причиною, що вказує на велику увагу до цих деталей, є те, що при несправності еластомерних кілець, двигун повинен бути зупинений та поставлений на не плановий ремонт. А так як роботи по заміні кілець потребують розбирання двигуна, включаючи зняття головки блока циліндрів та демонтаж гільз, то часто поточний ремонт двигуна переходить в капітальний. Змінюючи при цьому і економічні витрати і час простою техніки. Для сучасних зразків сільськогосподарської техніки такі простоти

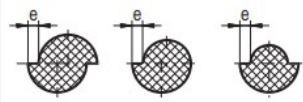
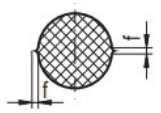
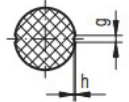

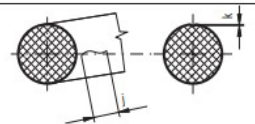
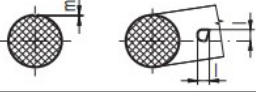
просто недопустимі. Партію кілець, що випробовувались, взято у офіційного постачальника запасних частин, і також придбано партію у неофіційних постачальників запасних частин. Кільця аналоги інших виробників не розглядались, так як доля їх використання при технічному сервісі є невеликою. Важливим є те, що ціни на такі запчастини дуже суттєво різняться. Отже, виникає питання щодо різниці якості цих кілець.

Відповідно до каталогів виробників еластомерних ущільнень, на сьогодні в якості сировини для виготовлення ущільнень для двигунів внутрішнього згорання, використовується синтетичний фторкаучук FPM 75 (скорочена назва FKM). Цей матеріал має запатентовані торгові назви (Наприклад Viton). Стійкість до мінеральних та синтетичних моторних олів, синтетичних охолоджувальних рідин та високих експлуатаційних температур є основною характеристикою цього конструкційного матеріалу.

Виклад основного матеріалу. В плані досліджень зовнішній огляд та зняття фактичних розмірів дослідних кілець стояло на першому місці. Тому зразки кілець оглянуті на мікроскопі, а також сучасними електронними вимірювальними приладами проведено їх визначення основних розмірів.

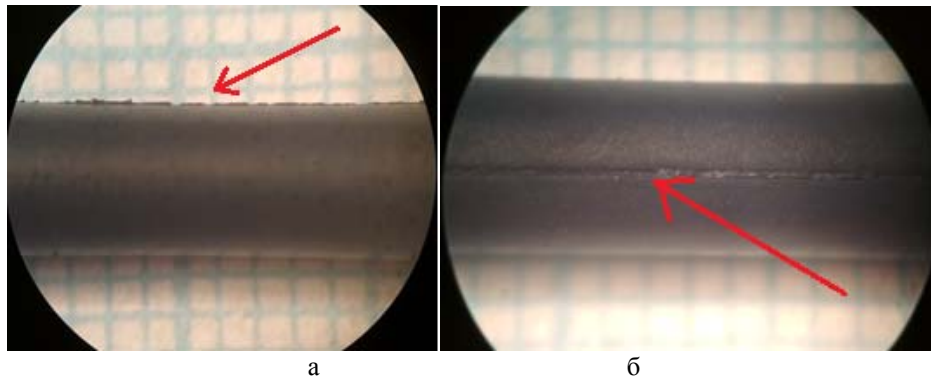
За основу при перевірці кілець використано вимоги чинних стандартів якості: ISO 3601-3. Fluidpower systems — O-rings — Part 3: Quality acceptance criteria та ISO 3601-1. Fluidpower systems — O-rings — Part 1: Inside diameters, cross-sections, tolerances and designation codes. В таблиці 1 наведено основні види відхилень, що контролюються при оцінці якості при виготовленні кілець з еластомерів.

Таблиця 1 – Види відхилень при виготовленні еластомерних кілець типу O-ring за ISO 3601-3

Вид відхилення	Схематичне зображення	Позначення	Максимальне значення, мм				
			для d_s				
			1,8	2,65	3,55	5,3	7
Зміщення		e	0,08	0,1	0,13	0,15	0,15
Випресовка кромки		f	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18
Втягнута кромка		g	0,18	0,27	0,36	0,53	0,7
		h	0,08	0,08	0,1	0,1	0,13
Відхилення від круглості		-	Відхилення від круглого перерізу допустимі, якщо неправильна форма плавно переходить в кругову частину та діаметр кільця знаходиться в допустимих межах				
Підвищення та заглиблення на поверхні		j	0,05 x d_i				
		k	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Недопресовка, локальні заглиблення		l	0,6	0,8	1	1,3	1,7
		m	0,08	0,08	0,1	0,1	0,13

Джерело: розроблено на підставі ISO 3601-3

Відповідно до вказаних стандартів, у дослідних зразках кілець виявлено такі дефекти: В деталях взятих у офіційного постачальника: проявляється дефект «випресовка кромки» (фото показане на рис. 3, а) (допустиме значення по ISO становить 0,14 мм), дефект «втягнута кромка» (фото показане на рис. 3, б) (допустиме значення по ISO становить 0,36 мм).

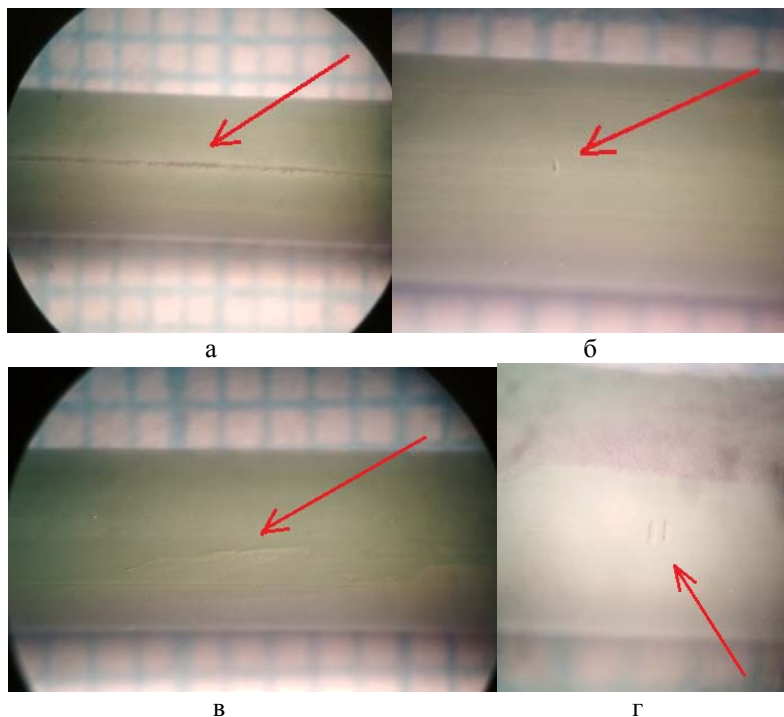


а – прояв дефекту «випресовка матеріалу», б – прояв дефекту «втягнута кромка»
(на фоні зображень підкладено міліметровий папір)

Рисунок 3 – Відхилення при виготовленні оригінального кільця:

Джерело: розроблено авторами

Оглянувши зразки не оригінального виробництва, відмічено такі дефекти: дефект «втягнута кромка» (фото показане на рис. 4, а), дефект «недопресовка» (допустиме значення по ISO становить 1,0 мм) (рис. 4, б), дефект «підвищення та заглиблення поверхні» (фото показане на рис. 4, в) (допустиме значення по ISO становить 6,5 мм), локальні заглиблення назовнішній поверхні деталі (рис. 4, г).



а– дефект «втягнута кромка», б– дефект «недопресовка», в– дефект «підвищення та заглиблення поверхні», г– виявлені риси на поверхні деталі

Рисунок 4 – Відхилення виготовлення кільця аналога

Джерело: розроблено авторами

Результати дослідження по виявленню видимих дефектів наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати дослідження кілець на видимі зовнішні дефекти

Дослідні деталі	Результати вимірювання					
	Фактичний діаметр кільця в поперечному перерізі, мм	Номинальний діаметр кільця в поперечному перерізі згідно з ISO 3601-1, мм	Фактичний внутрішній діаметр кільця, мм	Номинальний внутрішній діаметр кільця згідно з ISO 3601-1, мм	Фактичний зовнішній діаметр кільця, мм	Номинальний зовнішній діаметр кільця згідно з ISO 3601-1, мм
1. Оригінальне кільце	4,00±0,09	4,0±0,1	144,51±0,98	144,0±1,11	152,02±1,12	152,0±1,13
2. Кільце аналог	3,94±0,07		143,02±0,85		151,01±0,86	

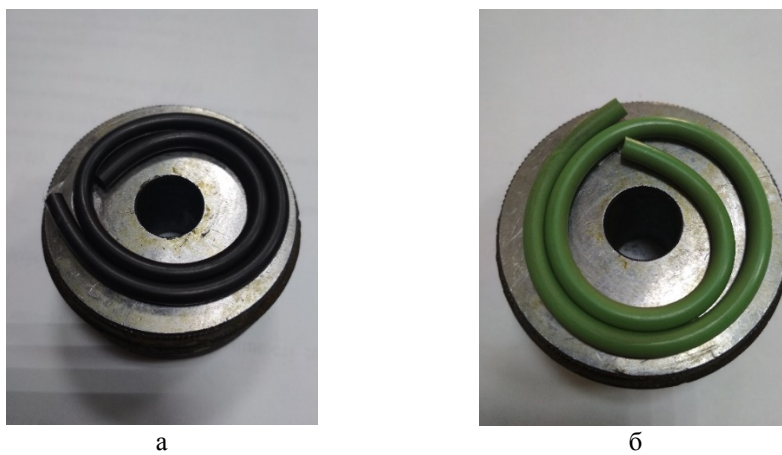
Джерело: розроблено авторами

Важливою реологічною характеристикою еластомерного матеріалу є релаксація напруження при сталій відносній деформації. Випробування дослідних зразків виготовлених з гуми та поліуретану на релаксацію регламентується стандартами ASTM D6147, ISO 3384. Прояв зменшення напруження в матеріалі при його деформації є результат складної молекулярної будови еластомерів. Якщо ущільнення будуть виготовлені з матеріалу, що має значні прояви релаксаційних процесів, це призведе до розгерметизації спряження деталей, а отже, і до відказу двигуна в цілому. Тому при оцінці якості кілець для ущільнення, важливо перевіряти їх на схильність до релаксації при сталій деформації.

Теоретичною базою в експериментах на релаксацію були стандарти: ISO 3384 «Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of stress relaxation in compression — Part 1: Testing at constant temperature» [10], ДСТУ ISO 815-1:2019 (ISO 815-1:2014, IDT) «Гума вулканізована чи термопластична. Визначення залишкової деформації після стискання. Частина 1. Випробування за стандартної чи підвищеної температури [11].

Були підготовлені дослідні зразки кілець. Для дослідження виготовлені зразки з нових кілець та з кілець, які витримані в моторній оливі при кімнатній температурі протягом 168 годин. Схема встановлення дослідних зразків показана на рис. 5. В дослідженнях було задіяно лабораторне обладнання: ручний прес ДМ-30М поз.1 (рис. 6), кільцевий динамометр з номінальною силою стиску 20кН, пристосування ДМ-22М поз.2. По мостовій схемі на поверхню стержня центрального болта пристосування ДМ-22М змонтовано чотири тензодатчика. Обладнання, що входить в вимірювальну апаратуру (позиції 3 та 4 на рис. 6), приймало та оброблювало сигнали від тензодатчиків. Паспортна точність фіксації сили стискання регламентовано в 1 Н. Індикатори годинникового типу використовувались для оцінки деформації стиску зразків. Відхилення від шорсткості поверхонь притискних пластин відповідало параметру Ra 0,4. Дослідні зразки кілець були стиснуті болтовим з'єднанням пристрою 2 до встановлення значення відносної деформації в межах 35 %. Фіксація показників релаксації напруження в матеріалах кілець проводилась способом зняття показань з тензодатчиків через встановлені відрізки часу. Часові межі були такими: перша точка дорівнювала 30с після початку стиску; рівномірними послідовними часовими точками були 10, 15, 60, 100, 150 хв. Загальний час стискання зразків кілець становив 24 ± 0,5 години. Контрольна температура при якій проводилось випробування дорівнювала 22 ± 1 °С. Залишкову відносну деформацію зразків визначали шляхом їх обміру після 30±3 хвилин перебування їх без навантаження після перевірки на

релаксацію. Також проводились заміри залишкового значення діаметра кільця в напрямку його стискання електронним штангенциркулем з точністю 0,01 мм з тиском губок на вимірювану поверхню не більше 0,01 МПа.



а – кільце оригінал; б – кільце аналог

Рисунок 5 – Зразки дослідних кілець, підготовлені до стискання

Джерело: розроблено авторами



1 – ручний гвинтовий прес ДМ-30М; 2 – пристосування ДМ-22М; 3 – мультиметр; 4 – комп'ютер

Рисунок 6 – Загальний вигляд дослідної установки

Джерело: розроблено авторами

Результати дослідження матеріалу кілець представлено в таблиці 3. Визначено значення таких параметрів як: твердість матеріалу кілець по Шору, од; вагу кілець, г; швидкість релаксації напруження, К; залишкову деформацію після стискання, δ , %; рівноважний модуль, $E_{\text{рівн}}$, МПа; величину падіння напруження до рівноважного значення, Δ , %.

Таблиця 3 – Результати випробування ущільнювальних кілець

Дослідні кільця	Показники випробування					
	Твердість, од.	Фактична вага, г	Швидкість релаксації напруження, К	Значення величини падіння напруження, Δ , %	Модуль пружності рівноважного стану, $E_{\text{рівн}}$ МПа	Значення залишкової деформації, δ , %
1. Кільце-оригінал	75–77	10,170 ±0,093	0,060 ±0,012	18,0 ±0,2	11,20 ±0,12	1,4 ±0,1
2. Кільце аналог	73–75	12,400 ±0,082	0,110 ±0,009	31,0 ±0,3	8,60 ±0,13	4,3 ±0,2
3. Оригінальне кільце (витримка в моторній оливі 168 год)	75–77	–	0,061 ±0,011	19,3 ±0,2	11,26 ±0,14	2,9 ±0,1
4. Кільце аналог (витримка в моторній оливі 168 год)	74–77	–	0,200 ±0,012	33,5 ±0,3	6,63 ±0,09	3,6 ±0,1

Джерело: розроблено авторами

Провівши комплекс експериментів, отримані експериментальні графіки залежностей зміни сил стиску зразків від часу їхньої витримки при сталій відносній деформації 35%. Їхні видипредставлено на рис. 7.

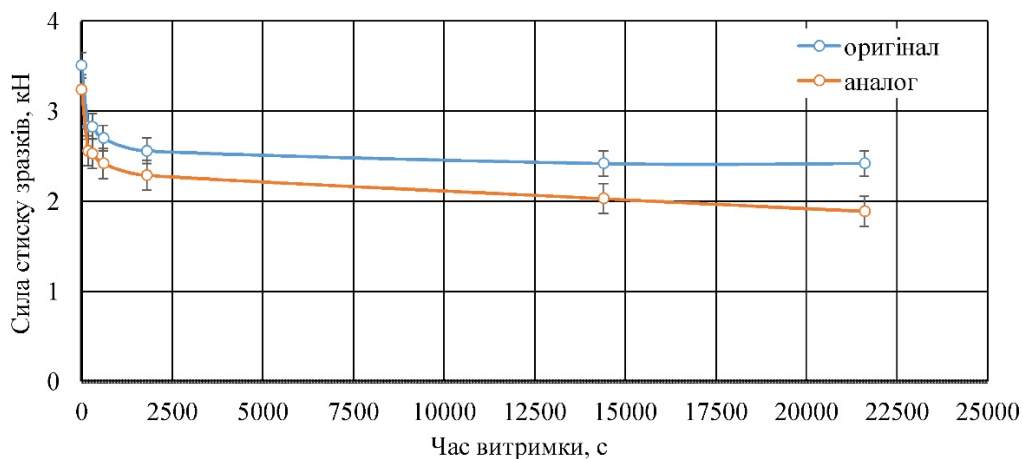


Рисунок 7 – Отримані дослідні залежності зміни сили стискування зразків кілець залежно від часу (відносна деформація зразків становила 35%)

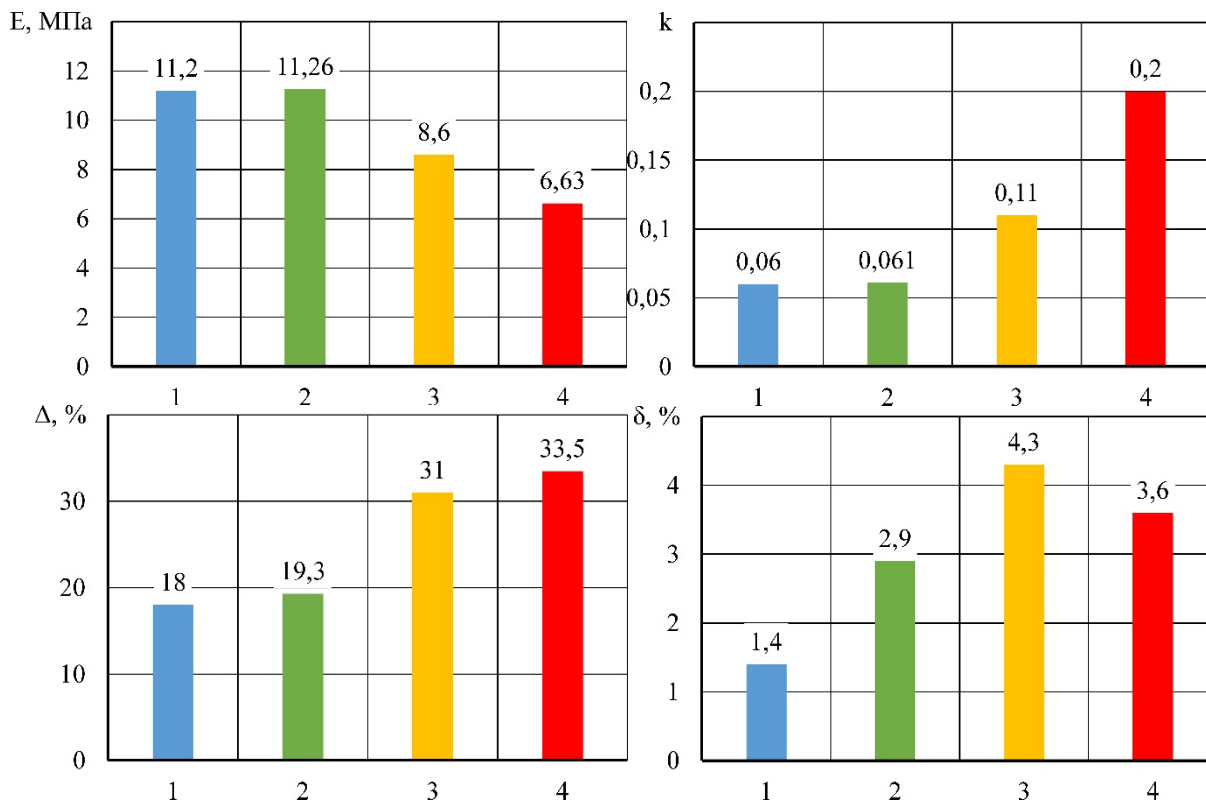
Джерело: розроблено авторами

При моделюванні поведінки деталей, виготовлених з еластомерів при їх деформації, найчастіше використовують модель Максвела та модель Фохта-Кельвіна.

Паралельне з'єднання пружного та в'язкого елементів описується моделлю Фохта-Кельвіна, а функціональний зв'язок між напруженням та деформацією має вигляд $\sigma = E(\varepsilon + \tau\dot{\varepsilon})$, в якій ε – значення відносної деформації, $\dot{\varepsilon}$ – значення швидкості деформації, $\tau = \frac{3\eta}{E}$ – дослідний час затримки деформації, η – дослідний коефіцієнт в'язкості. Пружинним середовищем в стані спокою буде, коли $\varepsilon = 0$. З постійною деформацією ($\varepsilon = \text{const}$) напруження в ньому будуть залишатися незмінними ($\sigma = E\varepsilon$). Залежність деформації від часу при сталому напруженні ($\sigma = \text{const}$), описується законом

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

де σ_0 – початкове напруження.



1 – оригінальне кільце; 2 – оригінальне кільце (витримка в моторній оливі 168 год); 3 – кільце аналог; 4 – кільце аналог (витримка в моторній оливі 168 год); k – параметр швидкості релаксації напруження; Δ – параметр величини падіння напруження до рівноважного значення, %; $E_{\text{рівн}}$ – модуль пружності при рівноважному стані, МПа; δ – параметр залишкової деформації після стискування, %

Рисунок 8 – Дослідні діаграми показників випробування зразків ущільнювальних кілець

Джерело: розроблено авторами

Для моделі в'язко-пружного матеріалу Максвелла, при сталому діючому напруженні ($\sigma = \text{const} = \sigma_0$), в початковий період часу $t = 0$, система отримує миттєву пружну деформацію σ_0/E , й в подальшому деформація буде протікати з постійною швидкістю. При незмінній деформації в часі (наприклад, гумовий зразок стиснутий або розтягнутий, й кінці його зафіксовані), при $t = 0$ та $\varepsilon = \text{const}$, напруження зменшується по залежності

$$\sigma(t) = E_0 \varepsilon_0 + \sum_{i=1}^n E_i \varepsilon_0 e^{-\frac{t}{\tau_i}}, \quad (2)$$

де n – кількість механічних елементів;

τ_i – час релаксації i -го реологічного елементу, що описує час необхідний для зменшення напруження до величини $1/e$ від його початкового значення;

E_0 – рівноважний модуль пружності після релаксації;

E_i – модуль пружності i -го реологічного елементу;

ε_0 – величина відносної деформації;

t – час (змінна величина).

Для зручності перетворимо залежність напруження в матеріалі від часу на залежність сили нормальної стиску на зразок від часу, припускаючи, що площа дії сили в часі не змінюється.

$$F(t) = F_0 + \sum_{i=1}^n F_i e^{-\frac{t}{\tau_i}}, \quad (3)$$

Ця математична модель описує процес релаксації напруження ряду матеріалів, деформація яких постійна в часі за швидкістю.

Так, провівши обробку експериментальних даних, було визначено теоретичні функціональні залежності зміни нормальної сили тиску еластомерних кілець на поверхні деталей спряження залежно від часу. При дослідженні на релаксацію напруження в оригінальному кільці, значення часу релаксації становить $\tau_1=60$ с, $\tau_2=3000$ с. Апроксимована функція має вигляд:

$$F(t) = 2,29 + 1,22e^{\frac{-t}{60}} + 0,45e^{\frac{-t}{3000}}, \text{кН} \quad (4)$$

Графіки експериментальних та теоретичних залежностей зміни сили притискання від часу оригінального кільця представлено на рис. 9.

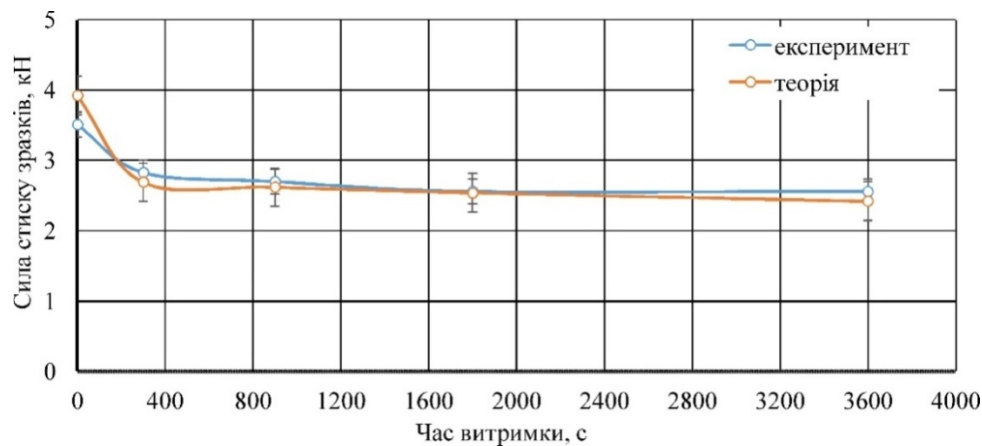


Рисунок 9—Експериментальна та теоретична криві зміни сили стискування оригінальних кілець залежно від часу витримки (до 3500 с) (відносна деформація зразків кільця оригіналу 35%)
Джерело: розроблено авторами

При дослідженні на релаксацію напруження в кільці аналога значення часу релаксації становить $\tau_1=80$ с, $\tau_2=2700$ с. Апроксимована функція має вигляд:

$$F(t) = 1,76 + 1,48e^{\frac{-t}{80}} + 0,7e^{\frac{-t}{2700}}, \text{кН} \quad (5)$$

Графіки експериментальних та теоретичних залежностей зміни сили притискання від часу кільця аналога представлено на рис. 10.

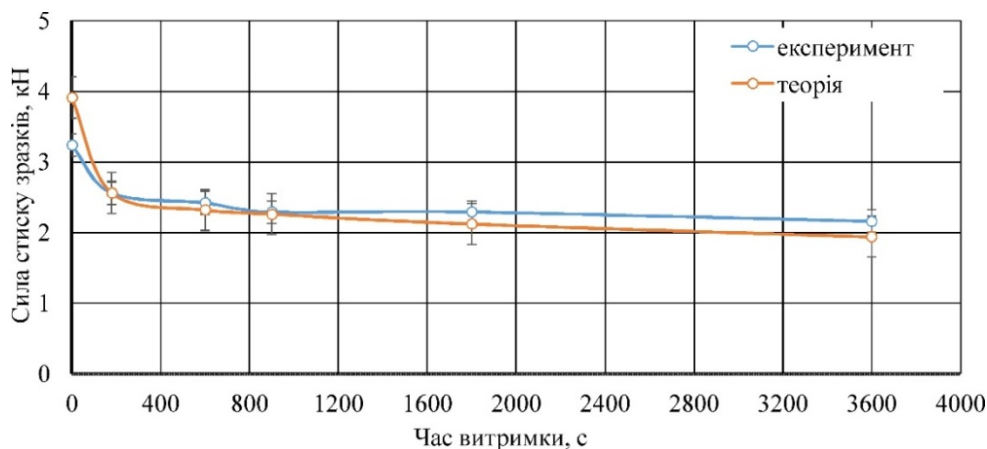


Рисунок 11 – Експериментальна та теоретична криві зміни сили стискування кільця аналога залежно від часу витримки (до 3500 с) (відносна деформація зразків кільця аналога 35%)
Джерело: розроблено авторами

Висновки. Проведено дослідження параметрів якості виготовлення і ефекту релаксації напруження та значення залишкової деформації кілець типу O-ring, що використовуються для герметизації спряження мокрої гільзи та посадкового поясу блока циліндрів в сучасних двигунах внутрішнього згоряння. Випробувано кільця оригінального виробництва та замітника (аналога). Випробування показали, що хоча кільця обох виробників мають видимі дефекти на їхніх поверхнях, утворені при виробництві, проте, кільця аналога мають більшу кількість дефектів різних видів ніж кільця оригіналу. При вимірюванні геометричних параметрів кілець, краща відповідність до стандартних розмірів відмічена в оригінальних кільцях. Зафіксовано також, що, при порівняно однакових розмірах кілець, вага кільця аналога є більшою за кільце оригінала на 22%. Це може вказувати, що матеріали кілець відрізняються. При їх стисканні до відносної деформації 35% та витримці в часі, зафіксовано експериментальні дані зміни напруження в матеріалі кілець.

Крива падіння сили стиску зразків кільця аналога показує більш стрімке зменшення сили стиску при витримці протягом 24 годин ніж така залежність визначена для оригінальних кілець. Це вказує на те, що є висока ймовірність того, що встановивши при ремонті двигуна не оригінальні кільця, з часом спряження може втратити герметичність. А якщо враховувати, що посадочні місця кілець на блоках циліндрів ще пошкоджені й іншими факторами, такими як корозія, то ймовірність появи відказу спряження зростає ще більше.

Аналізуючи, розраховані за експериментальними даними параметри процесу релаксації напруження в матеріалах кілець, можна стверджувати, що матеріал оригінального кільця характеризується меншою швидкістю релаксації напруження, меншою величиною падіння напруження до рівноважного значення та меншою залишковою деформацією після стискання, ніж матеріал кільця аналога. Також відмічено, що при витримці досліджуваних кілець в моторній оливі протягом 168 год та подальшому їх стисканні, параметри релаксації напруження в матеріалі кільця аналога характеризуються більшою нестабільністю.

Використавши теоретичні залежності еластомерної моделі Максвела, та експериментальні дані, створені теоретичні залежності, що описують релаксаційні процеси в матеріалах кілець оригінального та неоригінального виробництв.

Отже, хоча великою перевагою кілець аналога є їх порівняно невелика ціна на ринку, але дослідні дані вказують на те, що оригінальні еластомерні кільця мають кращі механічні та реологічні характеристики та якість виготовлення. Стабільність механічних параметрів еластомерів в часі – запорука високої експлуатаційної надійності конструкцій, в яких вони використовуються.

Результати дослідження можуть бути використані при виборі запасних частин при технічному сервісі сучасної сільськогосподарської техніки та розрахунках на роботоздатність та надійність еластомерних деталей для ущільнення спряжень.

Список літератури

1. Gräbner D., Zahn R., Schotzko T., Giese U., Lang W. Condition Monitoring of O-Ring Seals with Integrated Strain Gauges and Finite Element Analysis Assisted Signal Evaluation. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 52. Pp. 56–60. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.11.011>
2. Fong R. D., Sancaktar E. Compressive Stress Relaxation and Nonlinear Finite Element Analysis of Ethylene/Acrylic Vamac® Terpolymer Elastomer (AEM). *Design Engineering*. 2004. Pp. 261-269; <https://doi.org/10.1115/imece2004-60812>
3. Laurent H., Rio G., Vandenbroucke A., Ait Hocine N. Experimental and numerical study on the temperature-dependent behavior of a fluoro-elastomer. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2014. Vol. 18(4). Pp. 721–742. <https://doi.org/10.1007/s11043-014-9247-3>

4. Lunardi G., Serrano M., Tamez G. Long Lasting, High Reliability Gaskets for Leakage-free Oil Immersed Transformers. Conference: TechCon 2013. www.researchgate.net/publication/290391714_Long_Lastig_High_Reliability_Gaskets_for_Leakage-free_Oil_Immersed_Transformers
5. Szabó G., Váradii K. Large Strain Viscoelastic Material Model for Deformation, Stress and Strain Analysis of O-rings. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 62(2). Pp. 148–157, <https://doi.org/10.3311/ppme.11595>
6. Cassenti, B. N., & Staroselsky, A. Deformation and stability of compressible rubber O-rings. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2017. Vol. 12(1). <https://doi.org/10.1186/s40712-017-0072-8>
7. Пугач А.М., Черній О.А., Калганков Є.В. Дослідження ефекту релаксації напруження та залишкової деформації сучасних полімерних матеріалів для захисту поверхонь деталей від зношування. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. 8(39), ч.І. С. 76–84. [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.8\(39\).1.76-84](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.8(39).1.76-84)
8. Черній О. А. Деякі проблеми технічної надійності сільськогосподарських тракторів JOHN DEERE. Innovations and prospects of world science. Proceedings of the 7th International scientific and practical conference “Innovations and prospects of world science” (March 2-4, 2022). Perfect Publishing. Vancouver, Canada. 2022. Pp. 13-20. URL: <https://sci-conf.com.ua/vii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-innovations-and-prospects-of-world-science-2-4-marta-2022-goda-vancouver-kanada-arhiv/>.
9. Dynamics of heavy vibrating machines taking into account instability in time of their parameters. / Dyrda V. I., Lysytsia M. I., Lapin V. A. et al., *News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences*. 2020. Vol. 6. № 444 . Pp. 68 – 74. doi.org/10.32014/2020.2518-170X.132
10. ISO 3384 «Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of stress relaxation in compression – Part 1: Testing at constant temperature».
11. ДСТУ ISO 815-1:2019 (ISO 815-1:2014, IDT) Гума вулканізована чи термопластична. Визначення залишкової деформації після стискання. Частина 1. Випробування за стандартної чи підвищеної температури. Чинний з 01.09.2019 Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2019. 14 с.
12. MAN TGA з 2000 по 2020: Ремонт, обслуговування, електросхеми. «Моноліт», 2020. 796 с.

References

1. Gräbner, D., Zahn, R., Schotzko, T., Giese, U., & Lang, W. (2020). Condition Monitoring of O-Ring Seals with Integrated Strain Gauges and Finite Element Analysis Assisted Signal Evaluation. *Procedia Manufacturing*, 52, 56–60. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.11.011>. [in English].
2. Fong, R. D., & Sancaktar, E. (2004). Compressive Stress Relaxation and Nonlinear Finite Element Analysis of Ethylene/Acrylic Vamac® Terpolymer Elastomer (AEM). *Design Engineering*. <https://doi.org/10.1115/imece2004-60812>. [in English].
3. Laurent, H., Rio, G., Vandenbroucke, A., & Aït Hocine, N. (2014). Experimental and numerical study on the temperature-dependent behavior of a fluoro-elastomer. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 18(4), 721–742. <https://doi.org/10.1007/s11043-014-9247-3>. [in English].
4. Lunardi, G., Serrano, M., Tamez, G. (2013). Long Lasting, High Reliability Gaskets for Leakage-free Oil Immersed Transformers. Conference: TechCon 2013. www.researchgate.net/publication/290391714_Long_Lastig_High_Reliability_Gaskets_for_Leakage-free_Oil_Immersed_Transformers. [in English].
5. Szabó, G., & Váradii, K. (2018). Large Strain Viscoelastic Material Model for Deformation, Stress and Strain Analysis of O-rings. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. Vol. 62(2). 148–157 <https://doi.org/10.3311/ppme.11595>. [in English].
6. Cassenti, B. N., & Staroselsky, A. (2017). Deformation and stability of compressible rubber O-rings. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s40712-017-0072-8>. [in English].
7. Puhach, A., Chernii, O., & Kalhankov, Y. (2023). Study of the Effect of Stress Relaxation and Residual Deformation of Modern Polymer Materials to Protect the Surfaces of Parts From Wear. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 1(8(39)), 76–84. [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.8\(39\).1.76-84](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.8(39).1.76-84). [in Ukrainian].
8. Chernii O. A. . (2022). Деякі проблеми технічної надійності сільськогосподарських тракторів JOHN DEERE. *Innovations and prospects of world science*. Proceedings of the 7th International scientific and practical conference (March 2-4, 2022). Perfect Publishing. Vancouver, Canada. Pp. 13–20. URL: <https://sci-conf.com.ua/vii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-innovations-and->

- prospects-of-world-science-2-4-marta-2022-goda-vankuver-kanada-arhiv/. [in Ukrainian].
9. Dyrda V. I., Lysytsia M. I., Lapin V. A., Ahaltsov H. M., Kalhankov Ye. V., Tolstenko O. V., Chernii O. A. (2020). Dynamics of heavy vibrating machines taking into account instability in time of their parameters. *News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences*. Vol. 6, No. 444 (2020), 68 – 74. doi.org/10.32014/2020.2518-170X.132. [in English].
 10. ISO 3384 «Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of stress relaxation in compression — Part 1: Testing at constant temperature». [in English].
 11. Guma vulkanizovana chi termoplastichna. Vznachennya zalishkovoyi deformaciyi pislya stiskannya. Chastina 1. Viprobuvannya za standartnoyi chi pidvishenoyi temperaturi , 14 DSTU 815-1:2019 (ISO 815-1:2014, IDT) (2019) [in Ukrainian].
 12. MAN TGA z 2000 po 2020: Remont, obsluhovuvannya, elektroskhemy. «Monolit», 2020. 796 c. [in Russian].

Elchyn Aliiev, Prof., DSc., Senior Researcher

Olexandr Chernii, Senior Lecturer

Yevhen Kalhankov, Senior Lecturer

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Experimental Testing of the Quality of elastomeric Seals of the O-ring Type of Modernauto-Tractor Internal Combustion Engines

The purpose of the work is to study the manufacturing quality and stress relaxation during compression and determine the residual deformation of elastomeric sealing rings of the O-ring type, which are used in the technical service of modern agricultural machinery.

Experimental studies were carried out on a DM-30M laboratory unit. During the test, the dependence of the stress drop in compressed samples of materials on time, the rate of stress relaxation, the magnitude of the stress drop to the equilibrium value, the equilibrium modulus, and the residual deformation after the removal of the load were determined. An approximation of the dependences of changes in experimental data was carried out.

O-rings, used for sealing the coupling of the wet sleeve and the landing belt of the cylinder block in modern internal combustion engines, were tested. The rings of the original production and the substitute (analogue) were tested. Tests showed that although the rings of both manufacturers have visible defects on their surfaces, formed during production, however, the analog rings have a greater number of defects of various types than the rings of the original. The curve of the decrease in compressive strength of analog ring samples shows a more rapid decrease in compressive strength during exposure for 24 hours than such a dependence determined for the original rings. It was also recorded that, with relatively identical ring sizes, the weight of the analog ring is 22% greater than the original ring. This may indicate that the ring materials are different. It was noted that when the studied rings are kept in engine oil for 168 hours and their subsequent compression, the stress relaxation parameters in the analog ring material are characterized by greater instability.

This indicates that there is a high probability that by installing non-original rings during engine repair, the coupling may lose tightness over time. Especially with damaged ring seats.

internal combustion engine, sealing rings, fluororubber, manufacturing quality of elastomeric rings, stress relaxation, residual deformation

Одержано (Received) 21.10.2024

Прорецензовано (Reviewed) 27.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

УДК 631.816.3

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.77-83>

О.М. Кобець, доц., канд. техн. наук, **Н.О. Пономаренко**, доц., канд. техн. наук, **Є.І. Лепеть**, асп.

Дніпровський державний аграрний університет, м. Дніпро, Україна
e-mail: sadjem1990@gmail.com

Стан механізації внесення КАС в Україні

Одним з ключових способів підвищення врожайності є поліпшення живлення рослин за допомогою добрив. Стаття аналізує технічне забезпечення та ринок техніки для внесення карбамідо-аміачної суміші (КАС), яка є ефективним добривом у сільському господарстві. Обговорюються переваги та недоліки різних методів внесення КАС, включаючи використання культиваторів та обприскувачів. Зазначається, що необхідно ретельно враховувати усі фактори та контролювати процес внесення добрив для досягнення максимального результату.

КАС, добрива, методи внесення, розбризкувачі, культиватори

Постановка проблеми. З високим приростом населення Землі, основною проблемою для суспільства стане забезпечення продовольством. Щоб забезпечити потреби людства протягом наступних двох десятиліть, необхідно подвоїти кількість вироблених продуктів харчування. Однак обмеженість площ для сільськогосподарського виробництва вимагає пріоритету досліджень у напрямку підвищення продуктивності сільськогосподарських культур. Одним з найефективніших засобів збільшення врожаїв є покращення живлення рослин. Останніми роками продуктивність сільськогосподарських культур зросла завдяки використанню азотних добрив у 6,9 рази, фосфорних у 3,5 рази і збільшенню посівних площ лише в 1,1 рази. Прогнози показують, що використання добрив до 2030 року зросте до 200 млн тон, порівняно з 183 млн тон у 1993 році[1]. Однак надмірне використання добрив може негативно вплинути на навколишнє середовище.

Тому питання практичного використання добрив у контексті оптимізації живлення рослин та охорони навколишнього середовища стають все більш актуальними. Швидке зростання цін на енергоносії вимагає активного впровадження перспективних, енергоефективних технологій, без яких жорстка конкуренція на світовому ринку може призвести до непередбачуваних наслідків.

Аналіз основних досліджень та публікацій. У питанні внесення карбамідо-аміачної суміші (КАС) як добрива існує значна кількість наукових досліджень, що аналізують його вплив на продуктивність сільськогосподарських культур, а також оцінюють ефективність різних методів його застосування. Одним із ключових напрямів досліджень є оптимізація процесу внесення добрив для підвищення врожайності при мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище.

Аналіз проведених досліджень [1] свідчить про те, що в наш час значна увага приділяється технічним аспектам внесення добрив, зокрема машинам та обладнанню для внесення рідких добрив, таких як КАС. Ці дослідження підкреслюють важливість використання сучасних технологій та пристроїв для досягнення високої рівномірності розподілу добрива, що значно підвищує його ефективність.

Ряд досліджень також стосується методів і способів внесення КАС, серед яких позакореневе та підкореневе підживлення. У публікаціях [2,3] розглядаються практичні аспекти внесення КАС та можливості його інтеграції з іншими системами удобрення.

Зокрема, приведені результати досліджень [3] свідчать про те, що ефективність використання КАС залежить не лише від обраного способу внесення, але й від погодних умов та фаз вегетації культури [2].

Таким чином, дослідження у сфері застосування КАС свідчать про важливість правильного вибору обладнання та методів внесення, що дозволяє досягти високих показників урожайності при мінімізації негативного впливу на довкілля.

Постановка завдання. Мета даного дослідження полягає в аналізі сучасного стану технічного забезпечення для внесення карбамідо-аміачної суміші (КАС) у сільськогосподарському виробництві України та виявленні найбільш ефективних способів її використання для підвищення врожайності сільськогосподарських культур.

Для досягнення мети необхідно розв'язати наступні завдання:

1. Дослідити та проаналізувати існуючі технології та технічні засоби для внесення КАС у різних агрокліматичних умовах України.

2. Оцінити ефективність застосування культиваторів, обприскувачів та інших механізмів для внесення КАС на різних етапах вегетації рослин.

3. Виявити переваги та недоліки різних методів внесення КАС, враховуючи вплив на продуктивність культур та екологічні ризики.

4. Проаналізувати ринок техніки для внесення КАС, зокрема вітчизняних виробників, та оцінити їх відповідність сучасним вимогам сільськогосподарських підприємств.

Вирішення зазначених завдань дозволить не лише підвищити ефективність використання КАС як добрива, але й сприяти загальному поліпшенню технічного забезпечення аграрної галузі України.

Виклад основного матеріалу. Карбамідо-аміачна суміш (КАС) часто використовується в сільському господарстві як добриво.

Будь які добрива, в тому числі і КАС, мають свої переваги та недоліки.

До переваг при внесенні КАС можна віднести:

- можливість використання в будь-яких кліматичних зонах;
- висока рівномірність та точність внесення;
- можливість використання на різних стадіях вегетації;
- швидке проникнення в ґрунт, що дає можливість застосовувати при технології mini-till та no-till;
- має пролонговану дію;
- рідка форма має нижчу вартість порівняно з гранульованими формами.

Хоч КАС має велику кількість переваг, але також має і свої недоліки:

- ризик опіків рослин, обумовлений нормою внесення, фазою, особливістю вегетації культури та погодними умовами;
- особливі умови транспортування та зберігання;
- залежність від спеціальної техніки для внесення.

Враховуючи ці переваги та недоліки, вважаємо, що КАС є ефективним добривом для сільськогосподарських господарств, якщо його застосування відбувається з урахуванням усіх факторів та ретельним контролем.

Карбамідо-аміачна суміш може вноситись різними способами[2]:

- 1) позакореневе підживлення (листоове);
- 2) підкореневе підживлення;
- 3) внесення разом з оранкою та передпосівною культивацією.

Дослідимо технічне забезпечення та ринок техніки в Україні для кожного із способів внесення.

ПрАТ «Богуславська сільгосптехніка» виробляє серійний культиватор КУ-3А (рис. 1), який забезпечує внесення КАС разом з обробіткою ґрунту. Окрім ґрунтообробної складової даного культиватора на нього встановлюють ємність та спеціальні труби-живильники, через які добриво потрапляє на глибину обробітку [4].

Під час оранки можна регулювати норму внесення від 30 до 70 і більше кілограмів на 1 га по азоту. Це залежить від культури, ґрунту, тощо.



Рисунок 1 – Культиватор КУ-3А з обладнання для внесення КАС (Богуславська сільгосптехніка)

Джерело: на підставі [4]

Окрім внесення КАС під час основного обробітку ґрунту, не виключено його внесення і під час міжрядного. Виробник сільськогосподарської техніки ТМ «ДЕМЕТРА» виробляє культиватор КРН-5,6-0,5 з системою для внесення рідких мінеральних добрив (рис. 2). При внесенні КАС культиватором-підживлювачем досягається високий ефект – аерація ґрунту, знищення бур'янів, підживлення рослин в кореневій зоні [5].

За такого способу внесення застосовується нерозбавлений КАС-32 у дозуванні 30–60 кг азоту на 1 га, або 70–150 л КАС-32 на 1 га.



Рисунок 2 – Культиватор просапний КРН-5,6-0,5 з системою для внесення рідких мінеральних добрив ТМ «ДЕМЕТРА»

Джерело: на підставі [5]

Проте, на сьогодні найчастіше вносять КАС за допомогою обприскувачів. Їх можна використовувати для листового та підкореневого підживлення рослин.

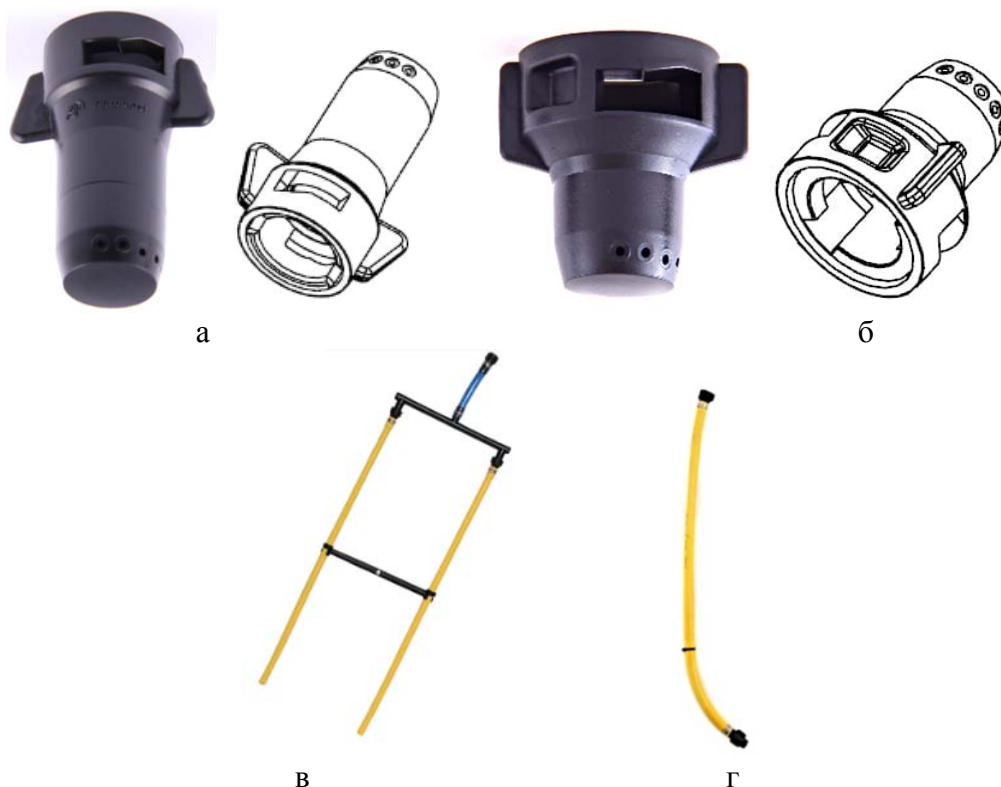
При листовому внесенні використовують так звані струминні розбризкувачі (рис. 3).

ТОВ «АГРОПЛАСТ ЮА» є одними з найбільших виробників допоміжного обладнання до обприскувачів для внесення КАС в Україні [6]. До нього можна віднести розбризкувачі, шланги одинарні та подвійні, фільтри, насоси, тощо (рис. 4)



Рисунок 3 – Струминні розбризкувачі КАС

Джерело: на підставі [6]



а – розбризкувач КАС довгий на 7 отворів; б – розбризкувач КАС короткий на 7 отворів;
в – шланг КАС подвійний; г – шланг КАС одинарний

Рисунок 4 – Допоміжне обладнання до обприскувачів для внесення КАС
ТОВ «АГРОПЛАСТ ЮА»

Джерело: на підставі [6]

ТОВ «АгроМОДУЛЬ» виробляє розбризкувачі добрив для внесення КАС. Лінійка даних розбризкувачів має великий вибір по витраті [7]. На рис. 5 зображено розбризкувач RD.05.SD5-b, який має 5 отворів у корпусі, дросель 1,5 мм та забезпечує наступну витрату: 150-260 л/га при тиску 1-3 атм (рис.5).



Рисунок 5 – Розбризкувач RD.05.SD5-b ТОВ «АгроМОДУЛЬ»

Джерело: на підставі [7]

Проте головним недоліком розбризкувачів є те, що після потрапляння на рослину краплини КАС, ударяючись об її поверхню, відскакують від неї, після чого попадають на ґрунт. Це насамперед спричинює негативний вплив на рослину, що проявляється небажаними опіками її надземної частини. Часткове вирішує цю проблему система Drogleg, яка забезпечує підлисткове обприскування польових та овочевих культур (рис. 6). Система розроблена і представлена на ринку в 2010 році спільно компаніями Amazone, Lechler і Syngenta.



Рисунок 6 – Система Drogleg від Amazone, Lechleri Syngenta

Джерело: на підставі [8]

Система Dropleg складається із пластикових трубок, на які знизу, залежно від виду обробки, встановлюють різні розбризкувачі або розпилювачі: для підлисткового обприскування чи внесення рідких мінеральних добрив. Трубки Dropleg вільно переміщуються під час руху обприскувача міжряддя. Систему Dropleg можна дуже легко налаштувати на будь-яке міжряддя.

В цілому будь-який обприскувач може бути переобладнаний під внесення КАС. Але при цьому, щоб КАС не зруйнував передчасно робочі деталі обприскувача, необхідно:

1) замінити деталі з кольорових металів на нержавіючі або з хімічностійкого пластику;

2) для першої позакореневої обробки застосовувати не щілинні розпилювачі, а дефлекторні (400 мкм). Дефлекторні розбризкувачі дають крупнокраплинний розчин, і великі краплі скочуються вниз змочивши лист;

3) у друге та третє підживлення уже необхідно використовувати щілинні розпилювачі з розміром краплі 200 мкм, щоб повністю обробити куш;

3) для роботи у вітряну погоду слід використовувати подовжувачі шланги з додатковими вантажами або Dropleg.

Висновки. Внесення КАС є перспективним напрямком в сільському господарстві України. Ринок представлений різноманітною технікою, яка забезпечує внесення добрива різними способами: підґрунтове за допомогою ґрунтообробних агрегатів (культиватори, плуги); поверхневе за допомогою обприскувачів з різними розпилювачами. При цьому, враховуючи особливості дії КАС, перспективним є розробка пристроїв для одночасного внесення цих добрив на листову поверхню і в ґрунт.

Список літератури

1. Машини і обладнання для приготування та внесення добрив : посібник / [Колектив авторів]; за ред. В.І. Кравчука; М-во аграр. політики та прод-ва України; УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. Дослідницьке : УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, 2011. 152 с.
2. Сушина А. Методи та способи застосування КАС на практиці. *Пропозиція. Спецвипуск. Сучасна техніка для захисту с.-г. культур*. 2017. С. 22–25.
3. Економічна ефективність використання карбамід-аміачних сумішей (КАС) в сучасних системах удобрення сільськогосподарських культур / С.М. Крамарьов та ін. Дніпро : Нова ідеологія, 2020. 195 с.
4. Культиватор універсальний КУ-3А. *Аграрний портал*: веб-сайт. URL: <https://agrodello.com.ua/tehnika/kultivator-universalnyj-ku-3a.html> (дата звернення: 06.09.2024)
5. Культиватор просапний КРН-5,6-05 з системою внесення рідких мінеральних добрив (8-рядковий). *DEMETRA виробник с/г техніки*: веб-сайт. URL: <https://demetra-site.com.ua>
6. Обладнання для КАС. *Agroplast*: веб-сайт. URL: https://agroplast.ua/uk_UA/c/Обладнання-для-КАС/75 (дата звернення: 06.09.2024)
7. Розбризкувач RD.05.S5. *ТОВ «Агро модуль»*: веб-сайт. URL: <http://www.agromodul.com.ua/ua/products/rd.05.s5> (дата звернення: 11.09.2024)
8. Nozzles for Fertilizer Applications. *Lechler Company*: веб-сайт. URL: <https://www.lechler.com/de-en/products/product-range/agriculture/nozzles-for-fertilizer-applications> (дата звернення: 14.09.2024)

References

1. Authors' team. (2011). Machines and equipment for the preparation and application of fertilizers: posibnyk . V.I. Kravchuka (Ed.); M-vo ahrar. polityky ta prod-va Ukrainy; UkrNDIPTVT im. L. Pohoriloho. Doslidnytske: UkrNDIPTVT im. L. Pohoriloho [in Ukrainian].
2. Sukhina, F. (2017). Methods and methods of applying UAC in practice. *Spetsvypusk zh. Propozytsiia. Suchasna tekhnika dlia zakhystu s.-h. kultur*. 22-25 [in Ukrainian].
3. Kramarev, S.M. “et al.” (2020). *Economic efficiency of using urea-ammonia mixtures (UAC) in modern systems of fertilization of agricultural crops*. Dnepr : Novaya ideologiya [in Ukrainian].

4. Kultyvator universalnyi KU-3A [Universal cultivator KU-3A]. *Ahrarnyi portal*. <https://agrodello.com.ua/tehnika/kultivator-universalnyj-ku-3a.html> [in Ukrainian].
5. Cultivator KPN-5,6-05 with a system for applying liquid mineral fertilizers (8-row). *DEMETRA*. <https://demetra-site.com.ua> [in Ukrainian].
6. Equipment for UAS. https://agroplast.ua/uk_UA/c/Обладнання-для-КАС/75 [in Ukrainian].
7. Sprayer RD.05.S5. *TOV «Ahromodul»* <http://www.agromodul.com.ua/ua/products/rd.05.s5> [in Ukrainian].
8. Nozzles for Fertilizer Applications. *Lechler Company*. <https://www.lechler.com/de-en/products/product-range/agriculture/nozzles-for-fertilizer-applications> [in English].

Oleksandr Kobets, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Natalia Ponomarenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yevhen Lepet**, post-graduate

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

The State of Machinery for UAN in Ukraine

The purpose of this article is to analyze the current state of technical equipment used for the application of Urea-Ammonium Nitrate Solution (UAN) in agriculture in Ukraine. The study aims to identify the most efficient methods of UAN application that can enhance crop productivity. Additionally, the research evaluates the market of equipment for UAN application, examining the advantages and disadvantages of different methods while determining the optimal conditions to maximize fertilization results.

In this article, various methods of UAN application, including the use of cultivators, sprayers, and other specialized equipment, are reviewed. The analysis highlights the benefits of UAN, such as high distribution uniformity and penetration efficiency across different stages of crop growth. However, it also identifies challenges, including risks of plant burns, special storage requirements, and the need for dedicated machinery. The research provides a detailed overview of the available technologies on the Ukrainian market, such as cultivators produced by local manufacturers, and evaluates their effectiveness in different agricultural zones. Furthermore, the study examines the latest advancements, like the Dropleg system, which offers a solution for minimizing leaf damage during fertilization.

In conclusion, the research emphasizes the potential of UAN as a promising solution in Ukrainian agriculture, provided its application is carefully controlled and optimized. The article suggests that future improvements in equipment design, particularly devices capable of simultaneously applying UAN to both the leaf surface and the soil, could further enhance the efficiency of fertilization. The findings contribute to a deeper understanding of UAN application technology and its role in modern agriculture.

UAN, fertilizers, application methods, sprayers, cultivators

Одержано (Received) 15.10.2024

Прорецензовано (Reviewed) 25.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

УДК 631.362

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.84-93>**О.В. Козаченко**, проф., д-р техн. наук*Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна***Е.Б. Алієв**, проф., д-р техн. наук, ст. дослідник*Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна**e-mail: aliev@meta.ua***Є. О. Піх**, здобувач науково ступеня доктора філософії*Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна*

Рух насінневої суміші по гвинтовій поверхні живильника віброфрикційного сепаратора

Виконано фізико-математичне модулювання процесу руху насінневої суміші по обґрунтованій гвинтовій поверхні живильника віброфрикційного сепаратора. Визначена залежність сумарної площі перекриття розподілу компонентів по ширині гвинтової пластини від фракційного вмісту компонентів і швидкості подачі.

віброфрикційний сепаратор, насіннева суміш, гвинтовий живильник, траєкторія руху, швидкість подачі насінневого матеріалу

Постановка проблеми. Сучасні технології післязбирального обробітку насінневого вороху сільськогосподарських культур передбачають застосування широкого спектру ефективних технічних засобів, що забезпечують його розділення за фізико-механічними властивостями компонентів та одержання цільового насінневого матеріалу із заданими показниками якості [1, 2]. При цьому актуальними залишаються питання конструктивного удосконалення машин та наукове обґрунтування раціональних параметрів на основі сучасного математичного апарату для моделювання технологічних процесів сепарації насінневих сумішей. Вирішенню цієї проблеми присвячена значна кількість наукових робіт вітчизняних і зарубіжних вчених [3, 4, 5, 6, 7].

Важливим етапом технологічного процесу, що визначає його ефективність, слід вважати подачу вихідної насінневої суміші на робочі органи насіннеочисних машин. Для цього використовують живильні пристрої, що встановлюють в бункерах або безпосередньо в зоні робочих органів машин. Їх основне призначення полягає в забезпеченні неперервної і заданої рівномірної подачі вихідної суміші на робочі органи відповідного пристрою для наступної сепарації насіння за фізико-механічними властивостями компонентів [8, 9, 10].

Для віброфрикційних сепараторів, які застосовують у технологічних лініях післязбирального обробітку насіння, подача насінневої суміші має визначальний характер, що пов'язано із забезпеченням переміщення компонентів насінневих сумішей на робочих фрикційних поверхнях машин моношаром [11, 12]. При цьому важливим є раціональний вибір швидкості введення вихідного матеріалу та питомого навантаження на робочі поверхні сепаратора, оскільки при зменшенні швидкості введення зростає товщина потоку насіння, що має негативний вплив на ефективність сепарації та обмежує продуктивність процесу. Тому вивчення процесу попередньої сепарації насінневої суміші на гвинтовому живильнику із застосуванням математичного моделювання слід вважати актуальним науковим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З метою підвищення ефективності сепарації насінневих сумішей проводяться дослідження впливу параметрів сепараторів та характеристик вихідного матеріалу на процес їх розділення за обраними ознаками поділу. Зокрема, в [13] висвітлені питання руху зернового матеріалу по гравітаційній напрямній кривій живильного пристрою пневмосепаратора з метою визначення її раціональних параметрів при забезпеченні заданої швидкості введення зерна в канал. Авторами одержані експериментальні залежності, які дозволяють обґрунтувати основні параметри напрямної поверхні живильного пристрою. Математичний опис руху зернівок у складі компонентів зернового матеріалу по поверхні ступінчастого віброживильника при введенні в аспіраційний канал сепаратора розглянуто в [14]. Авторами обґрунтовано траєкторії руху зерен по робочій поверхні вібраційного живильника з різними розмірними характеристиками, надана оцінка абсолютної швидкості руху зернового матеріалу на ступінчастій поверхні живильника при введенні в аспіраційний канал сепаратора.

Аналіз досліджень процесу сепарації на віброфрикційних сепараторах при точковому завантаженні насінневого матеріалу на робочі поверхні виявив основний їх недолік – вони не забезпечують розосередження маси до рівня моношару в зоні подачі, що зумовлює взаємозахоплення та відхилення з належних траєкторій переміщення компонентів насінневого матеріалу та знижує ефективність процесу сепарації [15, 16]. Усунення цього недоліку досягається попереднього розділення компонентів насінневої суміші на обґрунтованій гвинтовій поверхні живильника віброфрикційного сепаратора [17, 18]. В [19] виконано чисельне моделювання процесу попередньої сепарації як окремих частинок насінневої суміші на гвинтовому живильнику та отримано візуалізацію процесу переміщення їх основних компонентів (насіння основної культури, насіння бур'янів і рослинних домішок) від прийнятих факторів досліджень (крок витка гвинтової пластини H_f , кут нахилу гвинтової пластини α_f , радіус точки інжекції насіння r_f , кут повороту гвинтової пластини θ_f). За результатними розрахунку отримані рівняння регресії другого порядку залежності радіусу r_0 від початку координат до точки перетину траєкторії руху компонентів із лінією, яка знаходиться під певним кутом θ_f повороту гвинтової пластини, від факторів дослідження. В якості критерію оцінки прийнята умова розширення зони розподілу компонентів суміші, яка полягає в тому, що радіус для насіння основної культури r_n повинен бути найбільшим, а радіус для рослинних домішок r_d повинен бути найменшим. Вирішуючи математично задану умову методом ранжування функції і об'єднання у єдиний критерій отримані раціональні конструктивні параметри гвинтового живильника віброфрикційного сепаратора: $H_f = 0,192$ м, $\alpha_f = 14,7^\circ$, $r_f = 0,014$ м, $\theta_f = 96,2^\circ$. Отже є доцільним моделювання траєкторії руху потоку суміші компонентів по обґрунтованій гвинтовій пластині живильника віброфрикційного сепаратора.

Постановка завдання. Моделювання траєкторії руху потоку суміші компонентів по обґрунтованій гвинтовій пластині живильника віброфрикційного сепаратора.

Виклад основного матеріалу. Фізичні моделі чисельного моделювання обрані такі самі, як і в [19], на рис. 1 представлено конструктивно-технологічна схема (а) і 3D-модель (б) гвинтового живильника віброфрикційного сепаратора. Чисельне моделювання проведено у програмному пакеті Simcenter Star-CCM+. Розрахункова схема моделювання наведена на рис. 2.

Фізико-механічних властивостей компонентів насінневої суміші прийняті згідно табл. 1, однак враховані не середні їх значення, а діапазони їх змін з урахування нормального розподілу. В якості факторів досліджень прийнято фракційний вміст

компонентів в суміші – χ_n , χ_d , χ_b (табл. 1) і швидкість подачі суміші – Q (шт/с). При цьому повинна виконуватися умова:

$$\chi_n + \chi_d + \chi_b = 1. \quad (1)$$

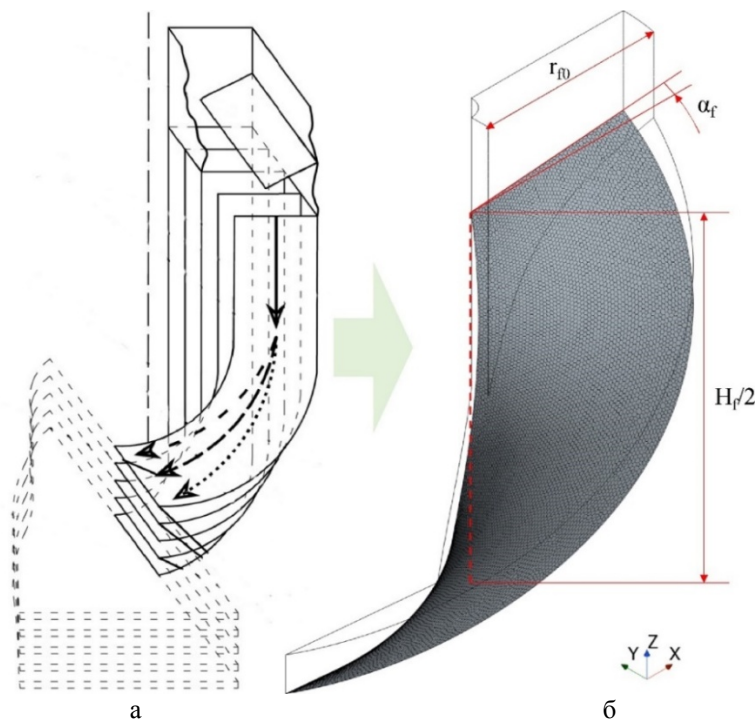


Рисунок 1 – Конструктивно-технологічна схема (а) і 3D-модель (б) гвинтового живильника віброфрикційного сепаратора

Джерело: розроблено авторами

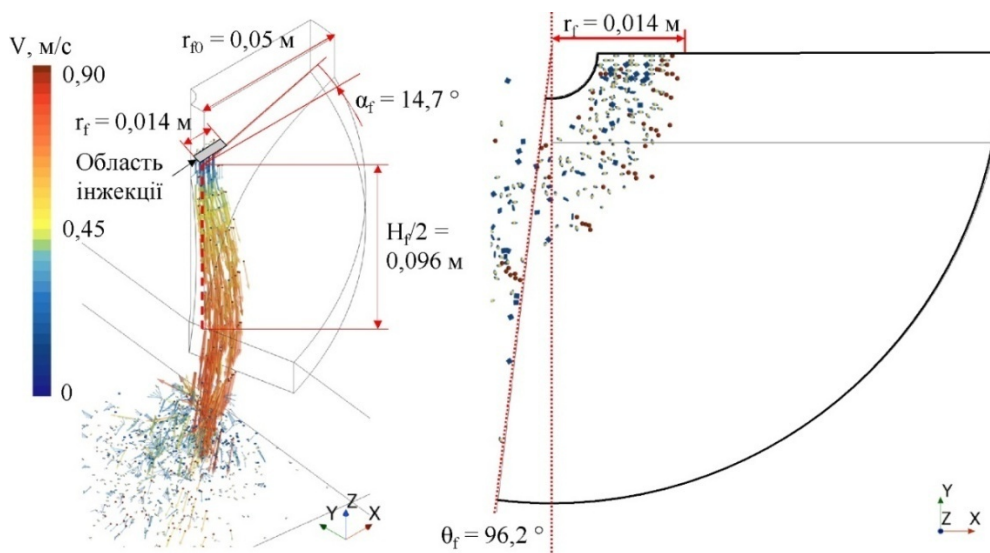


Рисунок 2 – Розрахункова схема чисельного моделювання гвинтового живильника віброфрикційного сепаратора

Джерело: розроблено авторами

Рух компонентів суміші по гвинтовій пластині живильника супроводжується їх розділенням по ширині. Розподіл кожного компонента по ширині пластини може бути представлений нормальним розподілом Гауса, характерними величинами якого є середнє значення μ і середньоквадратичне відхилення σ (рис. 3).

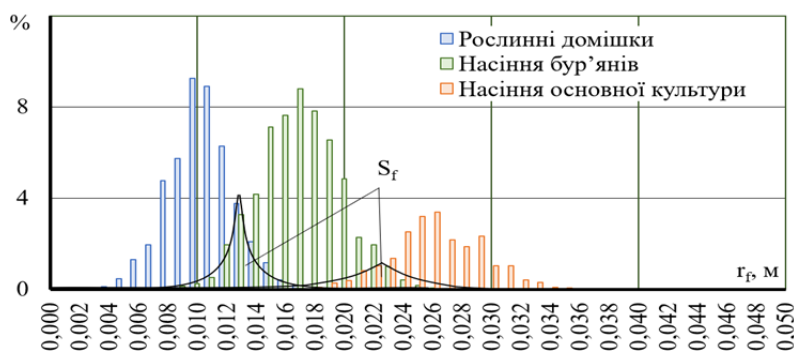


Рисунок 3 – Нормальний розподіл кожної фракції суміші по ширині гвинтової пластини живильника віброфрикційного сепаратора

Джерело: розроблено авторами

Аналізуючи гістограму рис. 3 видно, що зменшення сумарної площі S_f перекриття розподілу компонентів по ширині гвинтової пластини призводить до більш високої якості розділення. Тому в якості критерію виберемо саме S_f і розрахуємо його для кожного досліду згідно табл. 1.

Таблиця 1 – План дослідження чисельного моделювання гвинтового живильника віброфрикційного сепаратора

№	Вміст насіння основної культури		Вміст рослинних домішок		Вміст насіння бур'янів	
	x_5	$\chi_5, \%$	x_6	$\chi_6, \%$	x_7	$\chi_7, \%$
1	-1	0	0	50	0	50
2	0	50	-1	0	0	50
3	0	50	0	50	-1	0
4	0,2	60	-0,6	20	-0,6	20
5	-0,6	20	0,2	60	-0,6	20
6	-0,6	20	-0,6	20	0,2	60
7	-0,6	20	-0,4	30	0	50
8	-0,6	20	0	50	-0,4	30
9	-0,4	30	-0,6	20	0	50
10	-0,4	30	0	50	-0,6	20
11	0	50	-0,4	30	-0,6	20
12	0	50	-0,6	20	-0,4	30
13	-0,33	33,3	-0,33	33,3	-0,33	33,4
14	-1	0	-1	0	1	100
15	1	100	-1	0	-1	0
16	-1	0	1	100	-1	0
17	-0,4	30	0,4	70	-1	0
18	0,4	70	-0,4	30	-1	0
19	-1	0	0,4	70	-0,4	30
20	-1	0	-0,4	30	0,4	70
21	0,4	70	-1	0	-0,4	30
22	-0,4	30	-1	0	0,4	70

Джерело: розроблено авторами

Провівши аналіз отриманих даних в програмному пакеті Wolfram Cloud, отримано рівняння регресії залежності S_f від фракційного вмісту компонентів в суміші χ_n, χ_d, χ_b при швидкості подачі $Q = 100$ шт./с:

$$S_f = 0,00245064 - 0,00220809 x_5 - 0,00100382 x_5^2 - 0,00156842 x_6 + 0,00348766 x_5 x_6 - 0,00170857 x_6^2 - 0,00252848 x_7 + 0,0029476 x_5 x_7 + 0,00275697 x_6 x_7 - 0,000159834 x_7^2. \quad (2)$$

Статистична обробка отриманого рівняння регресії (2) наведена в табл. 2. Для 22 дослідів і 95 % довірчої ймовірності табличний коефіцієнт Стьюдента (t-statistic) складає 2,09.

Таблиця 2 – Статистична обробка рівнянь регресії (2)

Coef.	Standard Error	t-statistic	P-Value
a ₀₀	0,000902671	2,71488	0,018785
a ₅₀	0,000779903	-2,83124	0,015141
a ₆₀	0,000779903	-2,01105	0,0673363
a ₇₀	0,000779986	-3,2417	0,00706438
a ₅₆	0,00127175	2,74242	0,0178513
a ₅₇	0,00127171	2,31783	0,03892
a ₆₇	0,00127171	2,16793	0,0509833
a ₅₅	0,00159219	-0,630466	0,540211
a ₆₆	0,00159219	-1,0731	0,304334
a ₇₇	0,00159208	-0,100393	0,92169

Джерело: розроблено авторами

Виключаючи незначущі коефіцієнти регресії, тобто ті, у яких розрахований коефіцієнт Стьюдента (t-statistic) менший за табличний, і розкодовуючи рівняння (2), остаточно маємо:

$$S_f = 0,0179479 - 0,000156261 \chi_b - 0,000172867 \chi_d + 1,39507 \cdot 10^{-6} \chi_b \chi_d - 0,000164661 \chi_n + 1,10279 \cdot 10^{-6} \chi_b \chi_n + 1,17904 \cdot 10^{-6} \chi_d \chi_n. \quad (3)$$

Графічна візуалізація залежностей (3) наведена на рис. 4 у вигляді тривимірної тернарної діаграми.

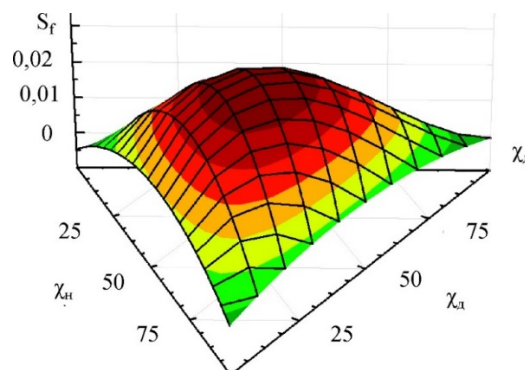


Рисунок 4 – Тернарна діаграма залежності сумарної площі S_f перекриття розподілу компонентів по ширині гвинтової пластини від фракційного вмісту компонентів в суміші χ_n, χ_d, χ_b

Джерело: розроблено авторами

Аналіз рис. 4 показує, що в середині тернарної діаграми спостерігається найбільше значення сумарної площі S_f на відміну від її країв. Це пов'язано із тим, що компоненти знаходяться в рівних співвідношеннях, що підвищує ймовірність їх взаємодії між собою при русі. Підвищення кількості взаємодій компонентів між собою значно змінює траєкторії їх руху на відміну від одиничного руху, який досліджувався на першому етапі моделювання.

Для обґрунтування раціонального значення швидкості подачі Q приймаємо фракційний вміст компонентів в суміші $\chi_n = 33,3\%$, $\chi_d = 33,3\%$, $\chi_b = 33,4\%$, при якому спостерігалась найбільша сумарна площа S_f . Швидкість подачі варіювали від 10 шт./с до 200 шт./с. В результаті чисельного моделювання отримана відповідна залежність (рис. 5):

$$S_f = -8 \cdot 10^{-8} Q^2 + 5 \cdot 10^{-5} Q + 0,0068, R^2 = 0,9757 \quad (4)$$

В якості критерію оцінки прийнята умова, що сумарна площа S_f повинна бути найменшою, а швидкість подачі Q – найбільшою. Математично її можна записати наступним чином:

$$S_f(Q) \rightarrow \min, \quad Q \rightarrow \max. \quad (5)$$

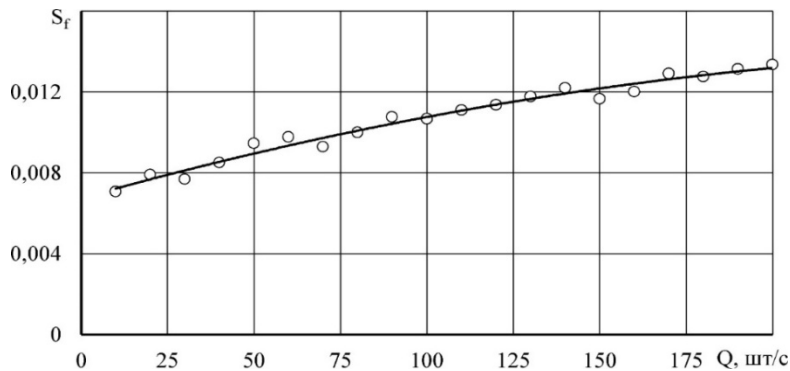


Рисунок 5 – Залежність сумарної площі S_f перекриття розподілу компонентів по ширині гвинтової пластини від швидкості подачі Q

Джерело: розроблено авторами

Вираз (5) можна перетворити шляхом ранжування функції і об'єднання у єдиний критерій (рис. 6):

$$X = \frac{\max[S_f(Q)] - S_f(Q)}{\max[S_f(Q)] - \min[S_f(Q)]} \times \frac{Q - \min[Q]}{\max[Q] - \min[Q]} \rightarrow \max. \quad (6)$$

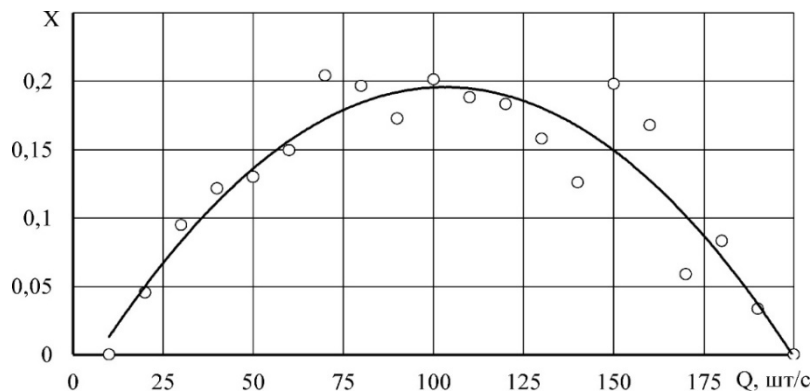


Рисунок 6 – Залежність критерію оптимізації X від факторів досліджень

Джерело: розроблено авторами

Вирішуючи рівняння (6) у програмному пакеті Wolfram Cloud, отримуємо наступне раціональне значення швидкості подачі $Q = 103$ шт/с.

Висновки. За результатами моделювання траєкторії руху потоку суміші компонентів по обґрунтованій гвинтовій пластині живильника віброфрикційного сепаратора визначена залежність сумарної площі S_f перекриття розподілу компонентів по ширині гвинтової пластини від фракційного вмісту компонентів в суміші χ_n, χ_d, χ_b і швидкості подачі Q . В якості критерію оцінки прийнята умова, що сумарна площа S_f повинна бути найменшою, а швидкість подачі Q – найбільшою. Вирішуючи математично задану умову методом ранжування функції і об'єднання у єдиний критерій, отримане раціональне значення швидкості подачі суміші $Q = 103$ шт/с.

Список літератури

1. Адамчук В.В., Прилуцький А. Н., Заришняк А. С., Степаненко С. П. Концепція комплексного вирішення проблеми післязбиральної обробки і зберігання зерна в сільськогосподарських підприємствах України. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2014. Вип. 99. С. 40–56.
2. Сухенко Ю., Сарана В. Аналіз зерноочисних сепараторів для сучасних елеваторів. *Пропозиція. Спецвипуск. Зерно: від поля до елеватора*. 2016. С. 16–20.
3. Алієв Е. Б. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС, 2019. 196 с.
4. Ольшанський В.П., Бредихін В.В., Лук'яненко В.М., Півень М.В., Сліпченко М.В., Харченко С.О. Теорія сепарування зерна: монографія. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2017. 802 с.
5. Степаненко С.П. Механіко-технологічне обґрунтування процесів і обладнання безрешітного фракціонування зернових матеріалів: автореф. дис. ...докт. техн. наук: 05.05.11, Глеваха, 2020. 48 с.
6. Харченко С.А. Концепція інтенсифікації процесів віброрешітного просіювання зернових сумішей: автореф. дис. ...докт. техн. наук: 05.05.11. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2017. 332 с.
7. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Очистка і сортування насіння. Т. III, розділ 7. Харків: Око, 2006. 407 с.
8. Нестеренко О.В. Обґрунтування параметрів пневмосепаруючого каналу з багаторівневим введенням зернового матеріалу: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.05.11. Кропивницький, 2017. 24 с.
9. Кюрчев С.В., Колодій О. С. Багатокритеріальний аналіз існуючих сепараторів насіння із різним робочим агентом. *Механізація сільськогосподарського виробництва*. Харків: ХНТУСГ, 2015. Вип. 156: Т. 1. С. 86–92.
10. Бойко А. І., Куликівський В. Л. Аналіз конструкцій гвинтових транспортерів та живильників зерноочисних машин. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка*. 2010. Вип. 93, Т. 1. С. 199–205.
11. Козаченко О.В., Алієв Е.Б., Бакум М.В., Михайлов А.Д., Кречот М.М. Обґрунтування ефективності використання віброфрикційного сепаратора при підготовці насінневого матеріалу гірчиці. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2021. 31. С. 142-151. DOI: 10.36710/іос-2021-31-13.
12. Козаченко О. В., Бакум М. В., Михайлов А. Д., Кречот М. М., Чала О. С., Завгородній О. І. Підвищення посівних властивостей насіння сафлору красильного на вібраційній насіннеочисній машині. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки: зб. наук. пр. Кропивницький: ЦНТУ, 2023. Вип. 7 (38). Ч. 2. С. 83–90. DOI: 10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.83-90*
13. Нестеренко О. В., Васильковський О. М., Петренко Д. І., Артеменко Д. Ю. Дослідження режимних характеристик гравітаційної напямної кривої живильного пристрою. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. Кропивницький: ЦНТУ, 2020. Вип. 50. С. 20–27. DOI: 10.32515/2414-3820.2020.50.20-27

14. Котов Б.І., Степаненко С.П., Рудь А.В., Замрій М.А. Теоретичні дослідження процесу руху зернового матеріалу на поверхні ступінчастого віброживильника. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 2(105). С. 25–32. DOI:10.37128/2306-8744-2022-2-3.
15. Лук'яненко В. М., Никифоров А. О., Галич І. В., Лук'яненко О. В., Петрик А. П. Сепарація насінневої суміші сої на мехатронній мультиплощинній вібраційній насіннеочисній машині. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства «Механізація сільськогосподарського виробництва»*. 2018. Вип. 190. С. 273-278.
16. Nykyforov A., Antoshchenkov R., Halych I., Kis V., Polyansky P., Koshulko V., Tymchak D., Dombrovska A., Kilimnik I. Construction of a regression model for assessing the efficiency of separation of lightweight seeds on vibratory machines involving measures to reduce the harmful influence of the aerodynamic factor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022. 2(1 (116), 24–34. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.253657.
17. Спосіб подачі сипкого матеріалу на робочі поверхні фрикційного сепаратора: пат. 15488 Україна: МПК G01F13/00 /Козаченко О. В, Бакум М. В, Піх С. О., Завгородній О. І., Михайлов А. Д. Крекот М. М. Заявник Державний біотехнологічний університет, №U202301838; заявл. 19.04.2023; опубл. 18.10.2023. Бюл. № 42.
18. Віброфрикційний сепаратор: пат. 155168 Україна:МПК B07B13/00 / Козаченко О. В., Бакум М. В., Піх С. О., Завгородній О. І., Михайлов А. Д., Крекот М. М.; Заявник Державний біотехнологічний університет, №U202302842; заявл. 12.06.2023; опубл. 24.01.2024, Бюл. № 4.
19. Kozachenko O., Aliiev E, Pikh Y. Numerical simulation of the process of preliminary separation of the seed mixture on the screw feeder of the vibro-friction separator. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2024. 2 (125): 36–46. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-2-4.

References

1. Adamchuk, V. V., Pryluts'kyi, A. N., Zaryshnyak, A. S., & Stepanenko, S. P. (2014). The concept of a comprehensive solution to the problem of post-harvest processing and storage of grain in agricultural enterprises of Ukraine. *Mekhanizatsiya ta elektryfikatsiya sil's'koho hospodarstva*. Hlevakha: NNTS «IMESH». Vyp. 99. S. 40–56. [in Ukrainian].
2. Sukhenko, Yu., & Sarana, V. (2016). Analysis of grain cleaning separators for modern elevators. *Propozytsiya. Spetsvypusk. Zerno: vid polya do elevatora* [in Ukrainian].
3. Tishchenko, L. N. (2004). *Intensification of grain separation: monograph*. Kharkov: KHNTUSG im. P. Vasilenka [in Russian].
4. Aliiev, E. B. (2019). *Physico-mathematical models of processes of precision separation of sunflower seed material: monograph*. Zaporizhzhya: STATUS [in Ukrainian].
5. Ol'shans'kyi, V. P., Bredykhin, V. V., Luk'yanenko, V. M., Piven', M. V., Slipchenko, M. V., & Kharchenko, S. O. (2017). *Theory of grain separation: monograph*. Kharkiv: KHNTUSH im. P. Vasylenka [in Ukrainian].
6. Stepanenko, S. P. (2020). *Mechanical and technological substantiation of the processes and equipment of sieveless fractionation of grain materials*. Extended abstract of doctor's thesis. Hlevakha [in Ukrainian].
7. Kharchenko, S. A. (2017). *The concept of intensification of the processes of vibro-sieve sieving of grain mixtures*. Extended abstract of doctor's thesis. Kharkiv: KHNTUSH im. P. Vasylenka [in Ukrainian].
8. Zayika, P. M. (2006). *Teoriya sil's'kohospodars'kykh mashyn. Ochystka i sortuvannya nasynnya* [Theory of agricultural machines. Seed cleaning and sorting]. T. III, rozdil 7. Kharkiv: Oko. 407 s. [in Ukrainian].
9. Nesterenko, O. V. (2017). *Obgruntuvannya parametriv pnevmoseparuyuchoho kanalu z bahatorivnevym vvedennyam zernovoho materialu: avtoref. dys. ...kand. tekhn.nauk: 05.05.11* [Justification of the parameters of the pneumatic separating channel with multi-level introduction of grain material: autoref. thesis ... candidate technical sciences: 05.05.11]. Kropyvnyts'kyi. 24 s. [in Ukrainian].
10. Kyurchev, S. V., & Kolodiy O. S. (2015). Bahatokryterial'nyy analiz isnuyuchykh separatoriv nasynnya iz riznym robochym ahentom [Multi-criteria analysis of existing seed separators with different working agents]. *Mekhanizatsiya sil's'kohospodars'koho vyrobnytstva*. Kharkiv: KHNTUSH. Vyp. 156: t. 1. S. 86–92. [in Ukrainian].
11. Boyko, A. I., & Kulykivs'kyi, V. L. (2010). Analysis of designs of screw conveyors and feeders of grain cleaning machines. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva im. P. Vasylenka*. Issue 93, Vol. 1, 199–205. [in Ukrainian].

12. Kozachenko, O. V., Aliiev, E. B., Bakum, M. V., Mykhaylov, A. D., & Krekot, M. M. (2021). Justification of the effectiveness of using a vibro-friction separator in the preparation of mustard seed material. *Naukovo-tehnichnyy byuletyn' Instytutu oliynykh kul'tur NAAN*, 31, 142-151. [in Ukrainian]. DOI: 10.36710/ioc-2021-31-13.
13. Kozachenko, O. V., Bakum, M. V., Mykhaylov, A. D., Krekot, M. M., Chala, O. S., & Zavorodniy, O. I. (2023). Increasing the sowing properties of safflower seeds using a vibrating seed cleaning machine. *Tsentrал'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky*. Issue 7 (38), part. 2, 83–90. [in Ukrainian]. DOI: 10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.83-90.
14. Nesterenko, O. V., Vasylyk, O. M., Petrenko, D. I., & Artemenko, D. Yu. (2020). Study of mode characteristics of the gravity guide curve of the feeding device. *Konstruyuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiya sil'skohospodars'kykh mashyn: zahal'noderzh.mizhvid.nauk.-tekhn. zb.* Issue 50, 20–27. [in Ukrainian]. DOI: 10.32515/2414-3820.2020.50.20-27
15. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P., Rud', A. V. & Zamriy, M. A. (2022). Theoretical studies of the movement of grain material on the surface of a stepped vibratory feeder. *Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh*. № 2(105). S. 25–32. [in Ukrainian]. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-2-3.
16. Luk'yanenko, V. M., Nykyforov, A. O., Halych, I. V., Luk'yanenko, O. V., & Petryk, A. P. (2018). Separation of soybean seed mixture on a mechatronic multiplane vibrating seed cleaning machine. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil'skoho hospodarstva «Mekhanizatsiya sil'skohospodars'koho vyrobnytstva»*. Issue. 190, 273-278 [in Ukrainian].
17. Nykyforov, A., Antoshchenkov, R., Halych, I., Kis, V., Polyansky, P., Koshulko, V., Tymchak, D., Dombrovska, A., & Kilimnik, I. (2022). Construction of a regression model for assessing the efficiency of separation of lightweight seeds on vibratory machines involving measures to reduce the harmful influence of the aerodynamic factor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 2(1 (116), 24–34. [in Ukrainian]. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.253657.
18. Kozachenko O. V, Bakum M. V, Pikh YE. O., Zavorodniy O. I., Mykhaylov A. D. Krekot M. M. Patent 15488 Ukrayina. G01F13/00. *The method of supplying loose material to the working surfaces of the friction separator*. Zayavnyk Derzhavnyy biotekhnolohichnyy universytet, U202301838; zayavl. 19.04.2023, opubl. 18.10.2023 r. Byul. № 42. [in Ukrainian].
19. Kozachenko, O. V., Bakum, M. V., Pikh, YE. O., Zavorodniy, O. I., Mykhaylov, A. D., Krekot, M. M.; Patent 155168 Ukrayina. B07B13/00. *Vibro-friction separator*. Zayavnyk Derzhavnyy biotekhnolohichnyy universytet, U202302842; zayavl. 12.06.2023, opubl. 24.01.2024 r. Byul. № 4. [in Ukrainian].
20. Kozachenko, O., Aliiev, E., & Pikh, Y. (2024). Numerical simulation of the process of preliminary separation of the seed mixture on the screw feeder of the vibro-friction separator. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. 2 (125): 36–46. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-2-4.

Oleksiy Kozachenko, Prof., DSc.

State Biotechnology University, Kharkiv, Ukraine

Elchyn Aliiev, Prof., DSc. Senior Researcher

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Yevhenii Pikh, recipient of the scientific degree of Doctor of Philosophy

State Biotechnology University, Kharkiv, Ukraine

The Movement of the Seed Mixture Along the Screw Surface of the Feeder of the Vibro-Friction Separator

The work involves physical and mathematical modeling of the process of seed mixture movement along a designed helical surface of a feeder and its preliminary separation based on the physical and mechanical properties of the components, followed by directing them to the working surfaces of a vibro-friction separator. This ensures the achievement of the main condition for the quality separation process on the friction surfaces of such machines: dispersing the seed mass to the level of a monolayer in the feeding zone, which reduces mutual entanglement and deviation from the intended trajectories of the seed material components, thereby enhancing the efficiency of the separation process. The aim of the theoretical research was to numerically model the trajectory of the component mixture flow along the designed helical plate of the vibro-friction separator feeder and to justify the seed material feeding speed. In the calculations, the physical and mechanical properties of the seed mixture components were considered as ranges of their average values, accounting for normal distribution. The fractional content of the components in the seed mixture – χ_n , χ_d , χ_b , and the mixture feeding speed Q (units per second) were taken as the research factors. Based on the numerical modeling results of the component

mixture flow trajectory along the designed helical plate of the vibro-friction separator feeder, the dependence of the total overlap area S_f of the component distribution across the width of the helical plate on the fractional content of the components in the mixture χ_n, χ_a, χ_b , and the feeding speed Q was determined. The evaluation criterion was that the total overlap area S_f should be minimal, and the feeding speed Q should be maximal. Solving the mathematically defined condition using the function ranking method and combining it into a single criterion allowed obtaining the optimal seed mixture feeding speed of $Q = 103$ units per second.

feed, pressing, compression, numerical modeling, laboratory research, mixing, pressure, parameters, physical and mechanical properties, efficiency

Одержано (Received) 16.10.2024

Прорецензовано (Reviewed) 25.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

УДК 631.362.32

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.93-105>

П.Г. Лузан, доц., канд. техн. наук, **А.Є. Грінчук**, асп., **Р.В. Кісільов**, доц., канд. техн. наук, **О.Р. Лузан**, канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: luzanpg@gmail.com

Теоретичне обґрунтування параметрів пруткового самоочисного решета

У статті наведено теоретичне обґрунтування параметрів пруткового самоочисного решета, яке використовується для очищення зернових мас. Розглянуто основні конструктивні особливості решета, його принцип роботи та механізм самоочищення. Розроблено математичну модель, яка дозволяє визначити оптимальні параметри конструкції залежно від властивостей зернового матеріалу, режимів роботи та вимог до якості очищення. Проведено аналіз впливу питомого навантаження, швидкості руху, діаметру прутків на повноту виділення компонентів зернової суміші різних розмірів та мінімізацію забивання решета. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення конструкції зерноочисного обладнання, підвищення його продуктивності та зниження енерговитрат.

пруткове решето, зернова маса, сепарація, зерноочисне обладнання, самоочисне решето, решітний сепаратор, сепарування зерна

Постановка проблеми. У 2021 році Україна досягла історичних рекордів у сільському господарстві, зібравши понад 106 млн тонн зернових, зернобобових та олійних культур, що значно перевищило попередні прогнози. Це досягнення стало абсолютним максимумом за весь період незалежності України, зокрема, було отримано понад 84 млн тонн зернових та зернобобових, а також 22,6 млн тонн олійних культур. Серед зернових культур найбільше зібрано пшениці – 32,4 млн тонн, кукурудзи – 40 млн тонн і ячменю – 10 млн тонн. Крім того, урожай гречки склав 110 тис. тонн, проса – 191 тис. тонн, гороху – 581,5 тис. тонн. У сегменті олійних культур найбільші показники були у соняшника – 16,3 млн тонн, сої – 3,4 млн тонн, а ріпаку – 2,9 млн тонн [1–3].

Однак 2022 рік став для України одним із найскладніших в аграрній галузі. Урожай зернових скоротився до трохи більше ніж 50 млн тонн, що стало найнижчим рівнем за останні п'ять років. Головними причинами цього стали широкомасштабна війна, яка обмежила доступ до значної частини посівних та збиральних площ, порушила логістичні ланцюги і створила дефіцит ресурсів для агровиробників. До цього додалися несприятливі погодні умови – дощове літо й осінь, які ускладнили процеси збору врожаю, а також недоліки в забезпеченні добривами та недостатня кількість елеваторів для якісного зберігання зерна [4].

Незважаючи на виклики, Україна продовжує працювати над відновленням аграрного сектору. За прогнозами Міністерства аграрної політики та продовольства, у 2024 році очікується покращення ситуації: прогнозується збір близько 74 млн тонн нового врожаю. У глобальному масштабі також очікується рекордний рівень виробництва зернових – 2854 млн тонн, що свідчить про стабільне зростання світового аграрного ринку. Україна залишається важливим гравцем у забезпеченні продовольчої безпеки на світовій арені, попри всі труднощі та виклики [5–7].

Дослідження показують, що навіть за найбільш несприятливих природно-кліматичних умов Україна здатна забезпечити врожай зернових у межах 50–100 млн тонн на рік. На глобальному рівні ці показники сягають близько 3000 млн тонн, що свідчить про значний потенціал аграрного сектору. Однак, такі обсяги врожаю ставлять перед сільськогосподарськими виробниками серйозні виклики, пов'язані з організацією зберігання та переробки зернових. Одним із ключових завдань є оперативне очищення зерна від смітних домішок, які можуть значно знижувати якість і спричиняти втрати під час навіть короткотермінового зберігання. Наявність домішок також негативно впливає на технологічні процеси подальшої переробки, що робить очищення невід'ємною складовою обробки врожаю.

З урахуванням широкого спектра сільськогосподарських культур, які вирощуються в різних регіонах України, науковці спільно з фахівцями машинобудівної галузі розробили десятки типів зерноочисних машин. Ці машини здатні ефективно очищати врожай і готувати його до тривалого зберігання або транспортування. Розробки базуються на використанні сучасних технологій і враховують специфіку різних культур, що дозволяє забезпечити високу якість обробки зерна [8–10].

Проте, сучасні виклики, пов'язані зі стрімким зростанням вартості енергетичних ресурсів, накладають додаткове фінансове навантаження на аграріїв. Енергозатрати зерноочисних машин є одним із чинників, що суттєво впливають на собівартість виробництва зерна. Таким чином, одним із пріоритетів у подальшій розробці сільськогосподарської техніки стає зниження рівня енергоспоживання машин без втрати їх продуктивності. Впровадження енергоефективного обладнання дозволить не лише зменшити витрати на виробництво, а й зробити аграрний сектор більш стійким до змін на ринку енергоресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для того, щоб досягти сталого розвитку виробництва сільськогосподарської продукції, важливо створювати принципово нову високопродуктивну техніку, яка б відповідала сучасним викликам та потребам. Така техніка має не лише забезпечувати зростання продуктивності праці, а й сприяти раціональному використанню ресурсів. Упровадження інноваційних технологій і технічних рішень є важливим кроком для забезпечення конкурентоспроможності галузі та зміцнення економічного потенціалу аграрного сектору. Особливу увагу слід робити на зниженні витрат матеріальних та енергетичних ресурсів, мінімізації впливу на навколишнє середовище та підвищенні ефективності виробничих процесів [9–10].

Аналіз свідчить, що найпоширенішим методом обробки зерна та продуктів його переробки є розділення, очищення і сортування за допомогою зерноочисних машин, обладнаних решетами різних типів і конструкцій. Широке застосування цього способу зумовлене різноманіттям форм, розмірів і фізико-механічних властивостей насіння сільськогосподарських культур [11].

У роботі [12] проведено аналіз конструкцій зерноочисних машин із коливальним рухом решітних станів. Автори зазначають, що, попри широке використання щіток для очищення решіт, вони мають суттєві недоліки, що підкреслює необхідність вдосконалення очисних пристроїв. Запропоновано для очищення решет використовувати скребкові та планчасті транспортери, і очищення вже виконувати в процесі транспортування, при цьому авторами відмічається вища ефективність та продуктивність роботи решета.

В роботах [13–17] авторами рекомендується для забезпечення якісного очищення в зерноочисних машинах використовувати вібрацію, що підвищує ефективність і дещо знижує енергетичні витрати.

Цікавою є ідея застосування решет з щілинами непостійного розміру [18, 19], однак вони, хоч і показали кращі результати роботи, але широкого впровадження у виробництво вони не отримали.

Постановка завдання. Метою роботи є зменшення витрат енергії на роботу машин для очищення зерна шляхом обґрунтування параметрів плоского самоочисного пруткового решета.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз конструкцій зерноочисних машин та основних типів решіт для очищення зернових культур, які в них застосовуються;
- обґрунтувати та запропонувати перспективну конструкцію решета для зерноочисних машин;
- розробити математичну модель процесу роботи запропонованого решета для визначення основних його параметрів.

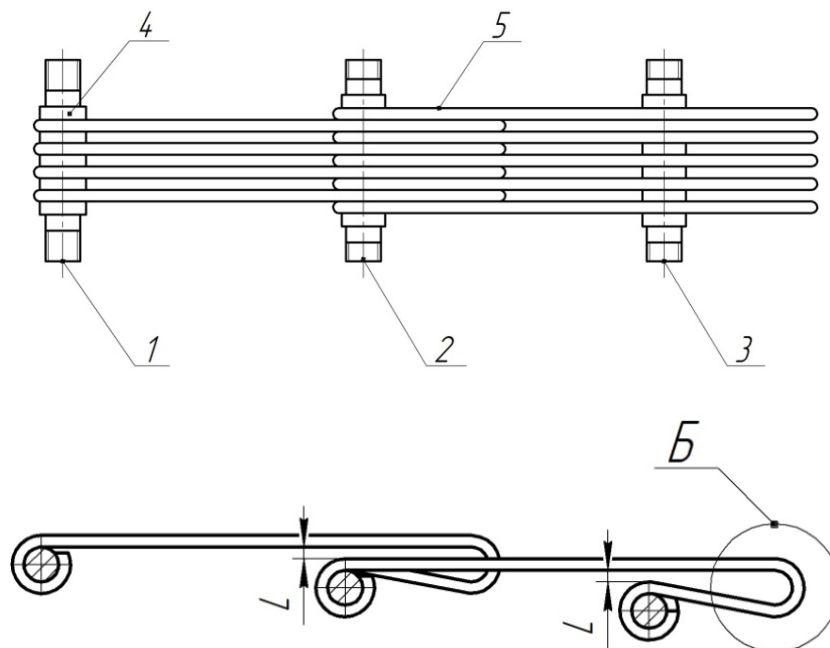
Виклад основного матеріалу. Проведений аналіз роботи сучасних конструкцій зерноочисних машин та решіт, які в них використовуються, показав, що велика кількість енергії витрачається на їх очищення від часток зерна, які застрягають в щілинах решета.

Для зниження енергетичних витрат під час обробки зернових матеріалів запропоновано використання пруткового самоочисного решета [20]. Основною особливістю цього решета є його конструкція, що забезпечує ефективне розділення частинок матеріалу з одночасним самоочищенням робочої поверхні. Решето виконано у вигляді набору поздовжніх стержнів, що утворюють кілька каскадів. Між цими каскадами створюються щілини, які розширюються у напрямку руху оброблюваного матеріалу. Розширення забезпечується спеціальним вигином стержнів у кінцевій частині, що створює розхил, необхідний для зміни ширини щілин (рис. 1).

Конструкція решета складається з кількох каскадів, кожен з яких формується поздовжніми прутками 5. Ці прутки мають вигин у кінцевій частині (ділянка **Б**) та скріплені між собою осями 1, 2, 3, з калібруючими шайбами 4. Завдяки наявності вигину, стержні можуть переміщуватися один відносно одного, що дозволяє змінювати ширину щілин у межах допустимого діапазону. При цьому максимальне розширення щілин **L** обмежується осями, що забезпечує стабільність роботи решета та запобігає перевищенню заданих параметрів.

Принцип роботи решета полягає у наступному. Матеріал, що підлягає розділенню, потрапляє на верхній каскад решета. Частинки зерна, розміри яких менші

за ширину щілин, проходять крізь них і потрапляють на наступні каскади, частинки, що не змогли пройти через жоден із каскадів, сходять з решета.



1, 2, 3 – осі; 4 – калібруючі шайби; 5 – стержні

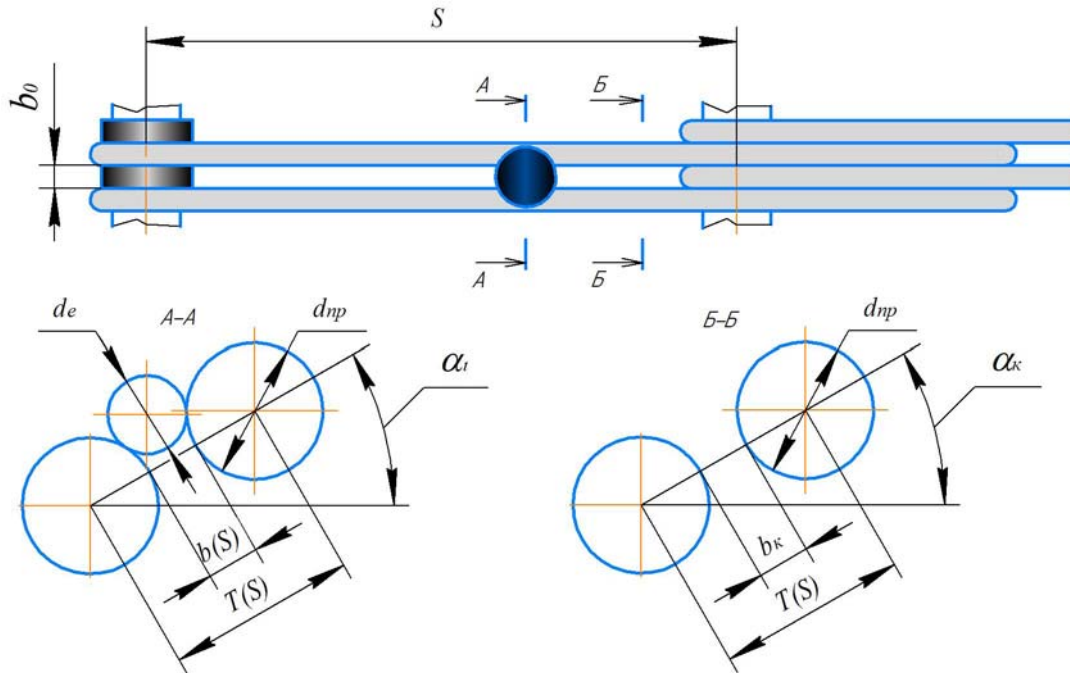
Рисунок 1 – Схема запропонованого решета

Джерело: розроблено авторами

Особливістю конструкції є здатність самоочищення. Під дією ваги оброблюваного матеріалу стержні, з яких складається решето, хаотично прогинаються у зоні згину **Б**. Це призводить до періодичного розширення щілин у напрямку руху матеріалу, що запобігає їх забиванню. Самоочищення забезпечує стабільну роботу решета протягом тривалого часу без необхідності ручного втручання або зупинки обладнання для очищення.

Таким чином, використання запропонованого пруткового самоочисного решета дозволяє не лише знизити енергетичні витрати, але й забезпечити високу ефективність процесу розділення матеріалу, зменшити витрати на обслуговування обладнання та підвищити його експлуатаційну надійність..

Для теоретичного обґрунтування конструктивних параметрів решета, його довжини – S , діаметра прутків – $d_{пр}$, кроку їх розміщення – T розглянемо рух часток зерна кулеподібної форми по його поверхні між двома поряд розташованими прутками, (рис. 2). При цьому припустимо, що зернова маса складається з часток зерна однакового розміру d_e , і вони рухаються по поверхні решета з постійною швидкістю, без відривання і переміщення між сусідніми елементарними шарами, а в той час, коли частки із нижнього шару проходять крізь щілини, частки із верхніх шарів займають їх положення. Початкове положення розміщення центра маси будь-якої із часток зерна в довільній точці ширини решета $T(s)$ має однакову імовірність. Вважатимемо частки зерна такими, що пройшли крізь щілини, в тому випадку, коли вони своїм центром опускаються нижче середини площини прутків решета.



S – довжина решета; b_0 , b_k – початкова й кінцева ширина щілини, відповідно; d_{np} – діаметр прутків;

T – крок розміщення прутків; d_e – діаметр частки зерна кулеподібної форми

Рисунок 2 – Схема руху часток зерна по решету між двома поряд розташованими прутками

Джерело: розроблено авторами

Розглянемо схеми положення зерна відносно прутків решета під час просіювання, (рис. 3). У випадку, коли центр тяжіння зернини розташований над прутком (рис. 3, а) проходження зерна крізь щілину не відбудеться. У випадку (рис. 3, б) зернина може пройти крізь щілину решета, але зернина нижнього шару ще не пройшла крізь неї. Коли розмір зерна більше розміру щілини, очевидно, що вона не зможе пройти (рис. 3, в). Враховуючи ці зауваження, проходження часток зерна крізь щілини решета можливе у випадку, коли центр їх маси буде знаходитися над щілиною решета, вона здатна пройти через щілину й щілина решета вільна від часток із нижніх шарів, які повинні пройти крізь неї.

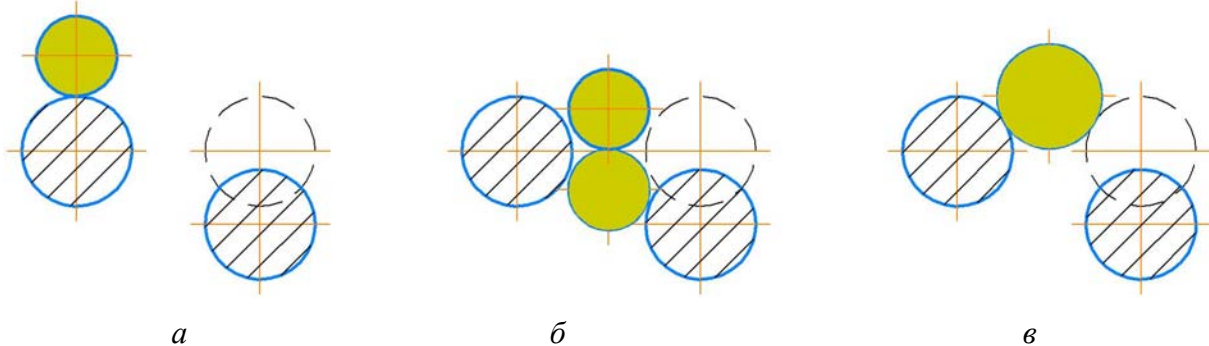


Рисунок 3 – Схеми положення часток зерна відносно прутків решета під час просіювання

Джерело: розроблено авторами

На ймовірність того, що центр маси частки зерна виявиться над щілиною решета, будуть впливати її геометричні параметри

$$P_1^i = \frac{b(s)_i}{T(s)_i}, \quad (1)$$

де $b(s)_i$ – ширина щілини решета для будь-якого i -го шару часток зерна, на деякій довжині решета S , (рис. 4).

$$b(s)_i = b_0 + \frac{2(b_k - b_0)S_i}{V_3}, \quad (2)$$

де $T(s)$ – відстань між поряд розташованими прутками, $T(s) = b(s) + d_{np}$;

V_3 – швидкість руху зерна по поверхні решета.

Ймовірність того, що частка зерна може пройти крізь щілину решета, буде залежати від співвідношення діаметра частки зерна d_e й ширини щілини решета $b(s)_i$.

$$P_2^i = \frac{b(s)_i - \frac{2}{\pi}d_e}{b(s)_i}. \quad (3)$$

Ймовірність того, що щілина решета вільна від часток із нижніх шарів, які повинні пройти крізь неї, визначається добутком ймовірності виділення через решето часток зерна нижніх шарів

$$P_3^i = \prod_{a=1}^{i-1} P_2^a. \quad (4)$$

Загальна ймовірність просіювання часток діаметром d_e із i -го елементарного шару буде рівна добутку ймовірностей всіх випадків

$$P^i = P_1^i P_2^i P_3^i. \quad (5)$$

З урахуванням попередніх зауважень для i -го елементарного шару, коли ($i > 1$), отримаємо

$$P^i = \frac{1}{T} \left(b(s)_i - \frac{2d_e}{\pi} \right) \prod_{a=1}^{i-1} \left(\frac{b(s)_a - \frac{2d_e}{\pi}}{b(s)_a} \right). \quad (6)$$

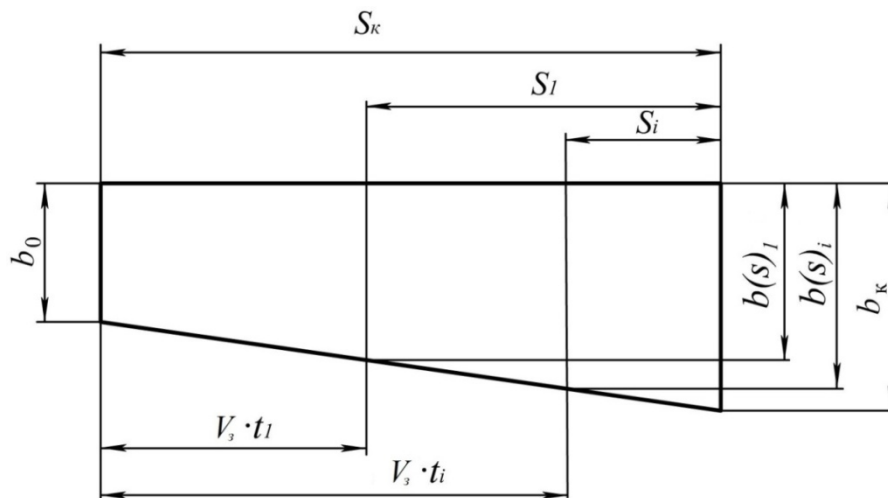


Рисунок 4 – Схема до визначення ширини клиноподібної щілини

Джерело: розроблено авторами

З аналізу (6) випливає, що ймовірність виділення часток зерна з будь-якого i -го шару можна звести до визначення оптимальної ширини щілини для кожного окремого елементарного шару. Це означає, що процес виділення часток залежить від фізичних параметрів решета та характеристик зернового матеріалу, який утворює шар.

Зокрема, виділення часток із першого елементарного шару через щілину решета завершується після певного проміжку часу t , який починає відраховуватися з моменту, коли складаються умови для початку виділення. Під умовами виділення мається на увазі досягнення частками певного положення та взаємодії, яке забезпечує їх проходження через щілину решета.

Для визначення часу t було зроблено припущення, що частки, для яких склалися умови виділення, рухаються крізь щілину решета під дією сили тяжіння. Зважаючи на це, час t буде залежати від кількох ключових факторів: висоти шару зерна над щілиною, яка визначає початкове положення часток, розмірів щілини, які впливають на швидкість імовірності проходження часток, властивостей часток зерна, таких як розмір, форма, щільність, а також коефіцієнт тертя між частками та поверхнею решета. Враховуючи наведене вище, отримаємо

$$t = \sqrt{\frac{2d_e}{g \sin(\Theta + \Theta_0)}}. \quad (7)$$

Так само визначимо час t_i для будь-якого i -го шару часток зерна

$$t_i = \sqrt{\frac{2id_e}{g \sin(\Theta + \Theta_0)}}. \quad (8)$$

Із першого шару часток зерна виділяться тільки ті частки, для яких склалися умови виділення на довжині щілини $S_1 \leq (S_k - V_3 \cdot t_1)$

$$b(s)_1 = b_0 + \frac{2(b_k - b_0)V_3 t_1}{\pi}, \quad (9)$$

а для часток будь якого i -го шару, розташованого вище

$$b(s)_i = b_0 + \frac{2(b_k - b_0)V_3 t_i}{\pi}. \quad (10)$$

Записуючи рівняння (8) з урахуванням (10), отримаємо

$$b(s)_i = b_0 + \frac{2(b_k - b_0) \sqrt{\frac{2id_e}{g \sin(\Theta + \Theta_0)}}}{\pi}. \quad (11)$$

Отримані формули дійсні для однокомпонентних сумішей, що складаються з часток однакового діаметра d_e , що дозволяє спростити математичні розрахунки та зробити їх більш зручними для використання в теоретичних моделях. У реальних умовах розміри часток можуть варіюватися, тому для врахування розмірної характеристики зерна доцільно ввести коефіцієнт приведення.

Ступінь розділення оброблюваного матеріалу

$$\varepsilon = 1 - e^{-\mu S}, \quad (12)$$

де μ – коефіцієнт сепарації;

S – довжина решета, необхідна для досягнення необхідної ступені розділення зернового матеріалу ε .

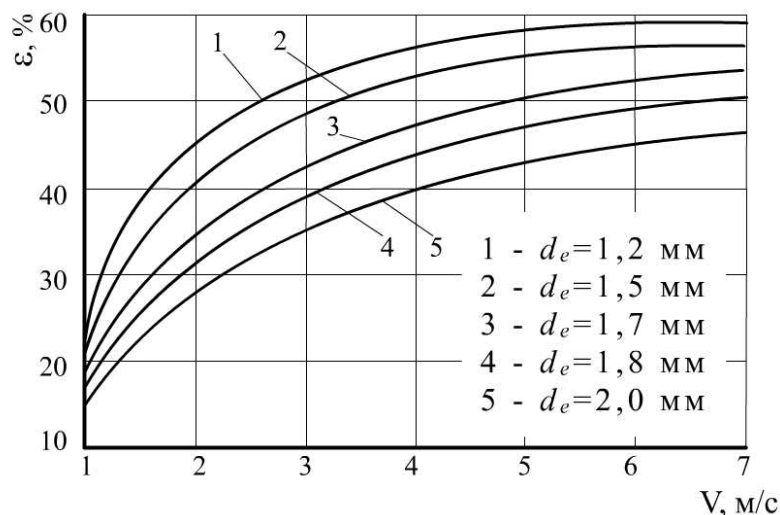
$$\mu = \frac{P^i}{V_s \cdot t_i} \quad (13)$$

Із формули (12) довжина решета

$$S = \frac{1}{\mu} \ln\left(\frac{1}{1-\varepsilon}\right) \quad (14)$$

Запропоновані рівняння, сформульовані на основі прийнятих припущень, можуть бути використані як наближена математична модель для опису процесу сепарації зерна на самоочисних пруткових решетах з щілинами непостійного розміру. Ця модель дає змогу аналізувати процес сепарації та вплив різних факторів на ефективність виділення зернових часток.

Залежності, що відображають вплив швидкості руху часток на ефективність виділення різних проходових компонентів через щілини решета (рис. 5), були отримані за таких умов: $q_e = 6,4$ т/м·год, $\gamma = 700$ кг/м³, $b_0 = 5,0$ мм, $b_k = 6,0$ мм. Розміри часток варіювались від 4,0 до 6,0 мм (з кроком 0,5 мм), при цьому масова частка кожного компонента становила 20% від загальної маси матеріалу.



$$f = 0,35; b_0 = 5,0 \text{ мм}; b_k = 6,5 \text{ мм}; d_{np} = 4,0 \text{ мм};$$

$$1 - d_e = 4,0 \text{ мм}; 2 - d_e = 4,5 \text{ мм}; 3 - d_e = 5,0 \text{ мм}; 4 - d_e = 5,5 \text{ мм}; 5 - d_e = 6,0 \text{ мм}.$$

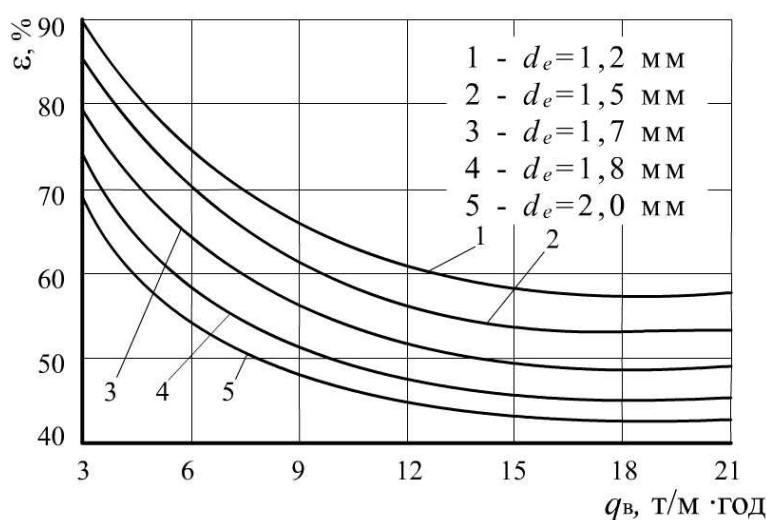
Рисунок 5 – Повнота виділення часток зерна при збільшенні швидкості

Джерело: розроблено авторами

Дослідження показали, що зі зміною швидкості руху матеріалу через решето повнота відокремлення часток зерна різних розмірів змінюється нерівномірно (рис. 6). При початковому підвищенні швидкості руху зернової маси, ефективність виділення часток зерна зростає завдяки зменшенню висоти шару зерна, що сприяє швидшому досягненню частками клиноподібної щілини. Це пояснюється скороченням часу перебування часток у верхніх шарах матеріалу, що пришвидшує їх рух до поверхні решета. Однак подальше підвищення швидкості призводить до зменшення

ефективності, оскільки частки не встигають пройти крізь щілини через зменшення часу їх контакту з поверхнею решета.

Зниження ефективності виділення крупних домішок обумовлено зменшенням імовірності проходження крізь щілини решета під час процесу сепарації. Це можна пояснити тим, що деякі частинки, навіть перебуваючи в нижньому шарі зернового матеріалу, не встигають потрапити в щілину, залишаються в загальній масі і не виділяються, що негативно впливає на якість очищення зерна.



$$V_0 = 4 \text{ м/с}; d_{np} = 6,0 \text{ мм}; f = 0,35; b_0 = 5,0 \text{ мм}; b_k = 6,5 \text{ мм};$$

$$1 - d_e = 4,0 \text{ мм}; 2 - d_e = 4,5 \text{ мм}; 3 - d_e = 5,0 \text{ мм}; 4 - d_e = 5,5 \text{ мм}; 5 - d_e = 6,0 \text{ мм}$$

Рисунок 6 – Повнота виділення компонентів з різними розмірами у випадку збільшення питомого навантаження
Джерело: розроблено авторами

Тому, якщо в зерновій масі переважають дрібні домішки, необхідно забезпечити підвищені значення швидкості руху зернового потоку. Це дозволить дрібним часткам швидше досягати поверхні решета, що підвищить ефективність їх виділення. А якщо в масі збільшується частка крупних домішок, швидкість сепарації потрібно знижувати. У такому випадку крупні частки матимуть більше часу для взаємодії з поверхнею решета, що сприятиме їх ефективному виділенню. Оптимальний підхід до налаштування процесу сепарації повинен враховувати склад зернової маси й регулювання швидкості руху зернового потоку залежно від переважаючого розміру домішок.

Висновки:

1. Проведеним аналізом роботи сучасних зерноочисних машин, які використовуються для очищення і сортування зерна, встановлено, що решета, які в них використовуються, не в повній мірі відповідають вимогам до зменшення енергетичних витрат, тому нами була запропонована нова конструкція решета з щілинами, що розширюють в напрямку руху оброблюваного матеріалу, та запропонована математична модель для визначення основних його параметрів.

2. Запропонована математична модель для визначення необхідної довжини удосконаленого решета для забезпечення необхідної ефективності очищення.

3. Ефективність запропонованої конструкції решета забезпечується тим, що збільшенням ширини щілин в напрямку руху матеріалу, що обробляється,

забезпечується його самоочищення, чим зменшуються витрати на приведення в дію очисних пристроїв.

4. Результати проведених випробувань експериментального самоочисного пруткового решета підтвердили його високу ефективність і надійність при різноманітних робочих навантаженнях, що дозволяє рекомендувати його для застосування в зерноочисних машинах. Використання пруткового самоочисного решета підтвердило здатність зберігати стабільну продуктивність і високу якість сортування матеріалів навіть у складних умовах експлуатації. Враховуючи ці характеристики, було запропоновано нову технологічну схему зерноочисної машини, яка використовує це решето. Завдяки цій схемі вдалося досягти підвищення питомої продуктивності на 18–20% порівняно з аналогічними машинами, що значно збільшує ефективність зерноочисного процесу.

Серед основних переваг запропонованої конструкції:

– спрощення конструкції та зменшення металоємності зерноочисних та інших подібних машин, створених на основі цього решета. Це призводить до зниження вартості виробництва та спрощення обслуговування обладнання, що є важливим економічним фактором;

– можливість інтеграції решета в традиційні зерноочисні машини без необхідності значних змін в їх конструкції. Така універсальність дозволяє швидко адаптувати нову технологію для існуючих моделей машин, що забезпечує легкість впровадження нових розробок на ринку.

– підвищення якості процесу розділення матеріалів, що обробляються. Нове решето здатне забезпечити точніше сортування зерна, що, в свою чергу, підвищує якість готової продукції, зменшує втрати матеріалів та забезпечує кращу ефективність очищення.

Список літератури

1. Солонина Є. Україна зібрала історичний максимум зерна: що стоїть за рекордом? *Радіо свобода*: веб-сайт. URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/ukrayina-vrozhay-zerno-tsiny-fermery-kytay/31497112.html> (дата звернення 07.10.2021).
2. Лещенко Р. Аграрії зібрали рекордний урожай зерна. *МінАП Аналітичний портал «Слово і діло»*: веб-сайт. URL: <https://www.slovoidilo.ua/2021/09/03/novyna/-suspilstvo/ahrariyi-zibraly-rekordnyj-urozhaj-zerna-minap> (дата звернення 03.09.2021).
3. Лещенко Р. 106 млн. тонн: В Україні зібрано рекордний врожай зернових, зернобобових та олійних культур / Роман Лещенко. *Міністерство аграрної політики та продовольства України*: веб-сайт. URL: <https://minagro.gov.ua/ua/news/106-mln-tonn-v-ukrayini-zibrano-rekordnij-vrozhaj-zernovih-zernobobo-vih-ta-olijnih-kultur-roman-leshchenko> (дата звернення 11.02.2022).
4. Сирота М. Урожай-2022 зернових в Україні найменший за останні 5 років. *Головний сайт для агрономів*: веб-сайт. URL: <https://superagronom.com/news/16602-urojay-2022-zernovih-v-ukrayini-naumenshiy-za-ostanni-5-rokiv> (дата звернення: 20.01.2023).
5. Соломчук Д. Жнива-2024: зібрано 72,9 млн тонн нового врожаю зернових та олійних. *Пропозиція*: веб-сайт. URL: <https://propozitsiya.com/ua/zhnyva-2024-zibrano-729-mln-tonn-novogo-vrozhayu-zernovyh-ta-oliynuh> (дата звернення 29.11.2024).
6. Лещенко Р. Урожай пшениці за 2024 та 2023 роки в Україні по всіх регіонах. *Superagronom*: веб-сайт. URL: <https://superagronom.com/multimedia/infographics/92-urojay-pshenitsi-za-2024-ta-2023-roki-v-ukrayini-po-vsım-regionam> (дата звернення 25.09.2024).
7. Кристофер Е. Світовий урожай зерна 2024 року сягне рекорду. *AgroPortal*: веб-сайт. URL: <https://agroportal.ua/news/mir/svitoviy-urozhaj-zerna-u-2024-roci-syagne-rekordu> (дата звернення 09.07.2024).
8. Сало В., Лузан П., Богатирьов Д. Технічне забезпечення підготовки зерна до зберігання: монографія. Кіровоград : СПД ФО Лисенко В.Ф., 2014. 148 с.

9. Основи сталого розвитку аграрного сектора: Досвід та знання Франції, Чеської республіки, України / За заг. ред. Я. Сансебе, Т.М. Димань. Біла Церква : ТОВ «Офсет», 2006. 304 с.
10. Думич В., Ролько Т. Сучасні зерноочисні машини. *Пропозиція*: веб-сайт. URL: <https://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/8931-suchasni-zernoochysni-mashyny.html> (дата звернення 20.10.2017).
11. Тіщенко Л., Харченко С., Василенко О. Нові можливості сепарації та калібрування зерна. *Пропозиція*: веб-сайт. URL: <https://propozitsiya.com/ua/novi-mozhливosti-separaciyi-ta-kalibruvannya-zerna> (дата звернення 09.11.2015).
12. Задорожній О., Мороз С.М., Васильковський О.М. Аналіз конструкцій очисних пристроїв гравітаційних решіт з коливальним рухом решітного стану зерноочисних машин загального призначення. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2023. Вип. 53. С. 237–246. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.237-246>.
13. Котов Б.І., Деревенько І.А., Степаненко С.П. Теоретичні аспекти сепарації зернових матеріалів на ступінчастоконічному решеті вібровідцентрових машин. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2016. Вип. 3. С. 175–180.
14. Алієв Е.Б., Яропуд В.М. Техніко-технологічне забезпечення прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшника. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2019. Вип. 1 (92). С. 40–47.
15. Бредихін В.В. Теоретичні основи вібропневмівідцентрового розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння : монографія. Харків, 2017. 81 с.
16. Богомолов О.В., Брагінець М.В., Богомолов О.О. Питання розвитку зернопереробної галузі агропромислового комплексу України. *Інженерія переробних і харчових виробництв*. 2017. №2 (1). С. 8–11.
17. Тіщенко Л., Харченко С., Василенко О. Сепарація гороху та нуту. *The Ukrainian Farmer*: веб-сайт. URL: <https://agrotimes.ua/article/separaciya-gorohu-ta-nutu/> (дата звернення: 29.11.2022).
18. Сало В.М., Лузан П.Г., Богатирьов Д.В. Наукові основи сепарації зерна на решетах з клиноподібною формою отворів : монографія. Кіровоград : СПД ФО Лисенко В.Ф., 2013. 148 с.
19. Лузан П.Г. Кісільов Р.В., Лузан О.Р. Обґрунтування параметрів решета з щілинами непостійного розміру. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту*. 2019. Вип. 49. С. 147–154. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2019.49.147-154>.
20. Решето: пат. 138274 У Україна: МПК В07В 13/07 / Лузан П.Г., Постернак В.П., Лузан О.Р., Лещик А.В. (Україна); заявник і патентовласник ЦНТУ. №u201904666; заявл. 02.05.2019; опубл. 25.11.2020, Бюл. №22. 3 с.

References

1. Solonina, E. (2021, October 7). Ukraine reaped a historic maximum of grain: what is behind the record? *Radio svoboda*. <https://www.radiosvoboda.org/a/ukrayina-vrozhay-zerno-tsiny-fermery-kytay/31497112.html> [in Ukrainian].
2. Leshchenko, R. (2021, September 3). Farmers harvested a record grain harvest. *MinAP Analitichnyi portal «Slovo i dilo»*. <https://www.slovoidilo.ua/2021/09/03/novyna/-suspilstvo/ahrariyi-zibraly-rekordnyj-urozhaj-zerna-inap> [in Ukrainian].
3. Leshchenko, R. (2022, February 11). Ukraine harvests record harvest of grains, legumes and oilseeds. *Ministerstvo ahrarnoi polityky ta prodovolstva Ukrainy*. <https://minagro.gov.ua/ua/news/106-mln-tonn-v-ukrayini-zibrano-rekordnij-vrozhaj-zernovih-zernobobo-vih-ta-olijnih-kultur-roman-leshchenko> [in Ukrainian].
4. Syrota, M. (2023, January 20). The 2022 grain harvest in Ukraine is the smallest in the last 5 years. *Holovnyi sait dlia ahronomiv*. <https://superagronom.com/news/16602-urojay-2022-zernovih-v-ukrayini-naymenshiy-za-ostanni-5-rokiv> [in Ukrainian].
5. Solomchuk, D. (2024, November 11). Harvest 2024: 72.9 million tons of new grain and oilseed crops harvested. *Propozytsiia*. <https://propozitsiya.com/ua/zhyva-2024-zibrano-729-mln-tonn-novogo-vrozhayu-zernovyh-ta-oliynyh> [in Ukrainian].
6. Leshchenko, R. (2024, September 25). Wheat harvest for 2024 and 2023 in Ukraine by all regions. *Superagronom*. <https://superagronom.com/multimedia/infographics/92-urojay-pshenitsi-za-2024-ta-2023-roki-v-ukrayini-po-vsiam-regionam> [in Ukrainian].
7. Krystofer, E. (2024, July 09). World grain harvest to hit record in 2024. *AgroPortal*. <https://agroportal.ua/news/mir/svitoviy-urozhay-zerna-u-2024-roci-syagne-rekordu> [in Ukrainian].

8. Salo, V., Luzan, P., & Bohatyrov, D. (2014). *Technical support for grain preparation for storage*. Kirovograd: SPD FO Lysenko V.F. [in Ukrainian].
9. Sansebe, Ya, & Dyman, T.M. (2006). *Dreams of sustainable development of the agricultural sector: Experience and knowledge of France, the Czech Republic, Ukraine*. Bila Tserkva: TOV «Ofset» [in Ukrainian].
10. Dumych, V., & Rolko, T. (2017 October 20). Modern grain cleaning machines. *Propozytsiia - Holovnyi zhurnal z pytan ahrobiznesu*. <https://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/8931-suchasni-zernoochysni-mashyny.html> [in Ukrainian].
11. Tishchenko, L., Kharchenko, S., & Vasylenko, O. (2015 November 09). New possibilities for grain separation and calibration. *Propozytsiia - Holovnyi zhurnal z pytan ahrobiznesu*. <https://propozitsiya.com.ua/novi-mozhlyvosti-separaciyi-ta-kalibruvannya-zerna> [in Ukrainian].
12. Zadorozhnii, O., Moroz, S.M., & Vasylykovskiy, O.M. (2023). Analysis of Designs the Cleaning Devices of Gravity Sieves With Oscillating Movement of the Sievestate of General-Purpose Graincleaning Machine. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil'skohospodars'kykh mashyn: zahal'nodierzh.mizhvid.nauk.-tekhn. zb.*, 53, 237-246 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.237-246>.
13. Kotov, B.I., Derevenko, I.A., & Stepanenko, S.P. (2016). Theoretical aspects of separation of grain materials on a step-conical grid of vibrocentres machines. *Vibrations in technology and technologies: All-Ukrainian scientific and technical journal*, 3, 175–180. [in Ukrainian].
14. Aliiev, E.B., & Yaropud, V.M. (2019). [Technical and technological support for precision separation of sunflower seed material. *Vibratsii v tekhniiti ta tekhnolohiiakh. Vseukrainskyi naukovu-tekhnichnyi zhurnal*. 2019. 1, (92). 40–47 in Ukrainian].
15. Bredykhin, V.V. (2017). *Theoretical foundations of vibro-pneumatic centrifugal separation of seed materials by seed density*. Kharkiv [in Ukrainian].
16. Bohomolov, O.V., Brahinets, M.V., & Bohomolov, O.O. (2017). Issues of development of the grain processing industry of the agro-industrial complex of Ukraine. *Inzheneriia pererobnykh i kharchovykh vyrobnytstv*, 2 (1), 8–11 [in Ukrainian].
17. Tishchenko, L., Kharchenko, S., & Vasylenko, O. (2022, December 29). Separation of peas and chickpeas. *The Ukrainian Farmer*. <https://agrotimes.ua/article/separaciya-gorohu-ta-nutu/> [in Ukrainian].
18. Salo, V.M., Luzan, P.H., & Bohatyrov, D.V. (2013). *Scientific basis of grain separation on sieves with wedge-shaped holes*. Kirovograd: SPD FO Lysenko V.F. [in Ukrainian].
19. Luzan, P.H., Kisilov, R.V., & Luzan, O.R. (2019). Substantiation of Sieve Parameters with Slits of Unstable Size. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil'skohospodars'kykh mashyn: zahal'nodierzh.mizhvid.nauk.-tekhn. zb*, 49, 147–154. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2019.49.147-154>.
20. Pat. № 138274 U Ukraina, B07B 13.07. Resheto [Sieve]: / Luzan P.H., Posternak V.P., Luzan O.R., Leschuk A.V. (Ukraina); zaiavnyk i patentovlasnyk CNTU. №u201904666; zaiavl. 02.05.2019; opubl. 25.11.2020, Biul. №22. 3 [in Ukrainian].

Petro Luzan, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Hrinchuk Andrii**, post-graduate, **Ruslan Kisilov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olena Luzan**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Theoretical Justification of the Parameters of a Self-Cleaning Bar Screen

The aim of the work is to reduce energy costs for the operation of grain cleaning machines by substantiating the parameters of a flat self-cleaning bar sieve. Special attention is paid to the optimization of sieve parameters to ensure high-quality separation of grain masses with different physical and mechanical properties. The relevance of the study is due to the need to increase the efficiency of grain cleaning equipment, ensure high quality cleaning and reduce energy consumption in the processing of agricultural products.

The article provides an analysis of modern designs of grain cleaning machines and the use of sieves of various types. The analysis of the operation of modern designs of grain cleaning machines and sieves used in them showed that a large amount of energy is spent on their cleaning from grain particles that get stuck in the slits of the sieve. To reduce energy costs, a self-cleaning bar sieve is proposed, made of a set of longitudinal bars in the form of several cascades, between which gaps are formed that expand in the direction of the processed material, and the expansion of the gaps is created by the opening of the bars bent in the end part. A mathematical model of the separation process has been developed, which takes into account such parameters as the diameter of the bars, the width of the gaps and the step of their placement. The probability of grain particles passing through the sieve depending on the speed of material movement and load has been calculated. The influence of various parameters on the completeness of grain particle separation, in particular the size of the components, the specific load and the speed of movement of the grain mass layer, has been studied. The modeling results are presented,

which show the optimal conditions for reducing sieve clogging, ensuring effective self-cleaning and determining its length.

The proposed design of the self-cleaning bar sieve allows you to reduce energy consumption and increase the efficiency of grain mass cleaning. The simulation results confirm that the use of such sieves provides better separation of grain mixtures due to reduced material losses and improved process productivity. The model can be used to develop new grain cleaning machines that meet modern requirements for energy efficiency and productivity.

bar screen, grain mass, separation, grain cleaning equipment, self-cleaning screen, screen separator, grain separation

Одержано (Received) 02.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 26.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

УДК 004.4

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.106-116>**О.С. Улічев**, канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна***О.В. Ревнюк**, асп.*Приватний вищий навчальний заклад "Європейський університет", м. Київ, Україна**e-mail: askin79@gmail.com, o.revnyuk@edu.ua*

Стиснення заголовків у протоколі HTTP 2, аналіз переваг та недоліків використовуваного методу

Використання стиснення заголовків у HTTP/2 значно знижує обсяг даних, які передаються мережею, що робить комунікацію ефективнішою порівняно з HTTP1, де стиснення було можливе лише для тіла запиту. Стиснення заголовків потрібне через їх повторюваність, особливо при однакових значеннях, таких як заголовки method, path тощо. Для реалізації стиснення в протоколі HTTP 2 використовується метод HPACK, який комбінує таблиці з частими значеннями заголовків і кодування Хаффмана для зменшення розміру даних. Це дозволяє досягти суттєвих переваг при повторних запитах до того самого ресурсу. У дослідженні детально досліджуються реалізації HPACK у HTTP 2 та переваги в порівнянні з іншими методами стиснення. Також аналізуються методи, які включають механізм динамічних та статичних таблиць, використання кодування Хаффмана та дослідження ризиків, пов'язаних із компрометацією інформації під час стиснення. Переваги такого підходу також підтверджені на практичних прикладах.

стиснення заголовків HTTP2, HPACK, таблиці заголовків, кодування Хаффмана, HTTP2

Постановка проблеми. Сучасні веб-додатки стали більш складні і створюють велику кількість запитів на сервер. Часто запити не є сильно унікальними між собою і відправляють багато інформації, що дублюється. Також в мобільних пристроях заголовки запитів є більші по розміру, але так само повторюються та девайси підключені, наприклад через мережу EDGE або 3G, мають обмежену пропускну здатність. Новий протокол HTTP 2 був створений для оптимізації мережевої комунікації, але він ніяк не вирішує проблему зменшення об'єму передачі даних між клієнтом і сервером.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Варун Сінгх у подкасті «Evolution of Internet Protocols» [1] акцентує увагу на важливості переходу на HTTP2 для підвищення ефективності передачі даних та стиснення заголовків. Також він зробив огляд еволюції інтернету загалом та передумови створення нових версій HTTP. Олександр Кравчук у своєму дослідженні «Аспекти переходу на HTTP 2» [2] аналізує складність переходу на HTTP 2, наголошуючи на скороченні затримок запитів завдяки використанню стиснення заголовків. Автор також розглядає можливості покращення продуктивності веб-додатків за рахунок впровадження нового протоколу. Роберт Пеон та ЕвреРуеллан є провідними інженерами, які приймали участь у роботі над HTTP 2 та HPACK. У документі RFC7541 [3] детально описано алгоритм HPACK для стиснення заголовків, що поєднує динамічні та статичні таблиці з кодуванням Хаффмана. Автори підкреслюють, що це дозволяє суттєво зменшити обсяг даних при повторюваних запитах до сервера. Перевозніков С. І. та Горобець Ю. В. [4] порівнюють час

завантаження веб-сторінок при використанні протоколів HTTP1 та HTTP2, демонструючи, що другий значно швидший завдяки стисненню заголовків. Їх дослідження підтверджують, що це особливо ефективно в умовах мобільних мереж із високою латентністю. Дрововозов В. І. та Хемраєв А. К. [5] аналізують надлишковість у протоколах TCP/IP, що створює додаткове навантаження на мережу. Вони обґрунтовують необхідність мінімізації об'єму передачі даних. У роботі «HTTPS-Only: Upgrading all connections to HTTPS in web browsers» [6] обговорюється важливість використання HTTPS з'єднання для передачі даних мережею і автоматичне оновлення всіх з'єднань в браузері. Також автори акцентують увагу на передачі cookies, саме захищеним підключенням з шифруванням даних. Автор роботи «Дослідження та розроблення системи вибору оптимального алгоритму стиснення даних при резервному копіюванні» [7] розглядає проблему вибору ефективного алгоритму стиснення, саме порівняння існуючих та автоматичний вибір оптимального алгоритму в залежності від типу даних. Розглядає різні перспективи стиснення даних, які можна використати для заголовків. Тема швидкості передачі даних активно обговорюється авторами, згаданими в цій статті, і ведеться наукова діяльність навколо нової версії HTTP протоколу. Це підкреслює постійний інтерес оптимізації в області мережевих технологій, а саме, швидкості роботи протоколів HTTP.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз алгоритму стиснення заголовків у протоколі HTTP 2 для оптимізації передачі даних мережею у сучасних веб додатках. А також огляд передумов створення HPACK, та потенційних загроз і ризиків втрати даних, що пов'язані з стисненням. Проблеми передачі cookies у заголовках та вибір оптимального способу стиснення для даних невеликого об'єму.

Виклад основного матеріалу. HTTP 2, представлений у 2015 році, став важливим етапом у розвитку веб-протоколів, покращуючи продуктивність та ефективність обміну даними між клієнтом і сервером [1]. На відміну від попередньої версії HTTP/1.1, яка використовувала окремі з'єднання для кожного запиту, HTTP 2 підтримує мультиплексування – передачу кількох запитів і відповідей через одне з'єднання. Це дозволяє зменшити затримки, викликані очікуванням окремих відповідей, і значно прискорює завантаження веб-сторінок, особливо на сайтах із великою кількістю ресурсів[2].

Ще одним важливим нововведенням є стиснення заголовків, що вирішує проблему надмірності та повторюваності інформації у заголовках запитів і відповідей. У HTTP 1.1 заголовки кожного запиту мали повторювані дані, які щоразу надсилалися на сервер, створюючи зайве навантаження на мережу. HTTP 2 вирішує цю проблему за допомогою технології HPACK [3], яка реалізує стиснення заголовків через використання статичних та динамічних таблиць заголовків. Це дозволяє зменшити обсяг даних, які передаються між клієнтом і сервером, а також знижує затрати на обробку інформації.

HPACK використовує кодування Хаффмана та інші техніки, які дозволяють ефективно кодувати дані змінною довжиною, залежно від частоти їх використання. Це дозволяє економити мережеві ресурси, зокрема для популярних сайтів, які обробляють величезну кількість запитів [4]. Незважаючи на загальні переваги, компресія даних може створювати ризики втрати даних, а також неоптимальне використання алгоритмів стиснення.

Загалом, розмір HTTP заголовків менший у порівнянні з тілом запиту, проте вони містять значну кількість повторюваних даних, що створює зайве навантаження. Наприклад, звичайний запит HTTP2 GET до Facebook виглядає наступним чином (рис.1).

```

:authority: static.xx.fbcdn.net
:method: GET
:path: /btmanifest/1017706399/facebook/main
:scheme: https
Accept: */*
Accept-Encoding: gzip, deflate, br, zstd
Accept-Language: en-GB,en-US;q=0.9,en;q=0.8
Origin: https://www.facebook.com
Priority: u=1, i
Referer: https://www.facebook.com/
Sec-Ch-Ua: "Google Chrome";v="129", "Not=A?Brand";v="8", "Chromium";v="129"
Sec-Ch-Ua-Mobile: ?0
Sec-Ch-Ua-Platform: "macOS"
Sec-Fetch-Dest: empty
Sec-Fetch-Mode: cors
Sec-Fetch-Site: cross-site
User-Agent: Mozilla/5.0 (Macintosh; Intel Mac OS X 10_15_7) AppleWebKit/537.36 (KHTML, like Gecko) Chrome/129.0.0.0 Safari/537.36

```

Рисунок 1 – Запит до Facebook

Джерело: розроблено авторами

Із 612 символів у цьому запиті лише 39 можуть змінитися при наступному запиті: метод запиту (GET) та шлях (/btmanifest/1017706399/facebook/main). Фактично, у більшості випадків метод залишається незмінним, тому, що змінюється лише значення path [5]. Отже, 573 символи у кожному запиті повторюються, створюючи надмірні дані. Це питання стає ще більш критичним, коли деякі заголовки: асерпт і user-agent, можуть бути дуже довгими, а заголовки з cookies – ще довшими. Наприклад, типовий запит до Google включає значну кількість cookies (рис.2):

```

:authority: waa-pa.clients6.google.com
:method: POST
:path: /$rpc/google.internal.waa.v1.WaaPing
:scheme: https
Accept: */*
Accept-Encoding: gzip, deflate, br, zstd
Accept-Language: en-GB,en-US;q=0.9,en;q=0.8
Authorization: SAPISIDHASH 1730028886_9479d12acce65c03fe48e7071129cb74de186527
Content-Length: 1696
Content-Type: application/json+protobuf
Cookie: __Secure-3FAPISID=8Wep-o_bMCMQF1Qm(ArxeHd6J0bX_kBlaf_ __Secure-3PISID=g_a000p0g2j9f-x75m7i5IL9eAIBSSANV9RPj_El1cm7hjFesYTWZCUlJiApLmrSRVAc0DShZIFgACgYKAWISQAQSFQHGK2MxEwVksic1f6tPEtGGwDDHh0VAUF8yKq_Tc0Cw3rP5Cdparr6rG0076; NID=518--Ne9UQmENwGnuUELP3CZe75ZmY0y4Nhb6kxxM9p3ct89JHW0ZyqRg9dA3Kgz-J-JV9NtdH-TvrfdHsdLZCHKSHWz4D0e0AhyHQz.Bjbd3K9pZcCDI73wUvUeYpPaBxik893i6a_LCBWWHIGZK_Qk2u7wkXZPbYmMLDyIGtJGQISr5vcrpHr4s0FNCktEobVre5qERG3LW3roi05ap0rYSGmpGYKNaUz-N6dUummLGC8TGhCjavehZzu3fbiHgdvHFgTmVjzo9R-mwVVRHZd0H-4ShkTMOEoCFZw2vcFlaz.J6zDhdJT4IEcpjRPp8o_zhjQL2QCkdWOS057i0kSGiFWBwvBKoi5KQdteqmmorPg2oN98sGQgl.pHGR00SHcDrWg83K9qTy8KnNg1x159PKWjY71Qm3qx4u_6q2Tyqe48EMqJPFKsNbaa5oH2GeUAItY83SnbvHNXAlwv1DnhvEITZVKuXtz_abC64yH8b8D2qWn8vNk7EaFL78d-mBtpdXJ9Ej4vyccnqjXDmHNCW3PTKXVPhaoRm3UuowHU3c_LbRiHUCRG1Pmj5e38ZZ_68oGWJP-b1U6P1Dsw_rHJVtMoVqJWZbm_VMu1ZB2PMLtai-meh-0z0rsH4zt0PJ846Ei8i6a3HXQmeijhoic5oag9XsbjphvF8niETJO5E-v70vB4NagxfOSDhQC-ch_Kyg-3d_QOMWtN55ROCTVi-8oSf4ZUZA7itxenzTcMSmDDGE6Q7XES6Jbie3ITXlfgMz0kp9Rg1cs6FBWG8pU4AunSgV6bGGTds_Q5akr_KL8au_30c1Qva2oU9PJRIDCGOdlrYKhYRrYTOFNu3kvb0iOCTKTeo; __Secure-3PISIDTS=sids-CjBQT4Xz_Egh_wVnTq9U14__B2Z5Be8Sg1gU8xtzUDKsfhw8TbPmKypRUDBJKZ0C8ABAA; __Secure-3PISIDCC=AKExKzWkLMZxydGV4Wod_YebQ1v3zNmRwQioLLRhNhsJtIC9v62eYkH_G6OUIbfzom1BFAGk
Origin: https://www.google.com.ua
Priority: u=1, i
Referer: https://www.google.com.ua/
Sec-Ch-Ua: "Google Chrome";v="129", "Not=A?Brand";v="8", "Chromium";v="129"
Sec-Ch-Ua-Mobile: ?0
Sec-Ch-Ua-Platform: "macOS"
Sec-Fetch-Dest: empty
Sec-Fetch-Mode: cors
Sec-Fetch-Site: cross-site
User-Agent: Mozilla/5.0 (Macintosh; Intel Mac OS X 10_15_7) AppleWebKit/537.36 (KHTML, like Gecko) Chrome/129.0.0.0 Safari/537.36
X-Client-Data: C.JS2yQEipbbJAQipnc0BCi7ygeEikqHLAQjxossBCIagzQEiUMJNAQisns4BCMS2zgeI+MLAQj+wb4BC.JPGzgeIvstOAIQoyM4BCLDtgEYj87NARjDvc4B
Decoded:
message ClientVariations {
  // Active Google-visible variation IDs on this client. These are reported for analysis, but do not directly affect any server-side behavior.
  repeated int32 variation_id = [3300116, 3300133, 3313321, 3325319, 3330194, 3330417, 3362822, 3367992, 3378988, 3382084, 3383672, 3383806, 3384083, 3384254, 3384360, 3384368];
  // Active Google-visible variation IDs on this client that trigger server-side behavior. These are reported for analysis *and* directly affect server-side behavior.
  repeated int32 trigger_variation_id = [3360719, 3382979];
}

```

• Рисунок 2 – Типовий HTTP запит до Google

Джерело: розроблено авторами

Такий заголовок включає 2854 символи, що є досить багато. В cookies багато даних, що стосуються безпеки і вони відправляються завжди.

Фахівці з комп'ютерних мереж намагаються уникати повторюваності, тому стиснення заголовків стало ключовим компонентом HTTP 2 і було запроваджено навіть у його попередника SPDY [5]. Хоча процес стиснення і розпакування даних вимагає часу та обчислювальних ресурсів, ці витрати є відносно невеликими порівняно з часом, потрібним для передачі повнорозмірних даних по мережі. З огляду на те, що HTTPS вимагає додаткових ресурсів для шифрування, спочатку стискати дані, а потім шифрувати їх є ефективнішим рішенням для зменшення обсягу переданої інформації [6].

Стиснення даних може бути з втратою або без втрат. У стисненні з втратою частина деталей відкидається, оскільки вони не критично важливі. Таке стиснення часто використовується для медіа файлів, які можна стискати не втрачаючи загального сенсу даних. Однак надмірне стиснення призводить до втрати якості, наприклад, зображення стає неможливо збільшити без втрати чіткості [7]. Отже, стиснення з втратою – це завжди баланс між розміром даних і якістю.

Оскільки HTTP заголовки містять важливу інформацію, навіть якщо вона часто повторюється, стиснення з втратою не є варіантом, хоч воно зазвичай ефективніше. Стиснення без втрат працює шляхом видалення повторюваних елементів, які легко відновити при розпакуванні даних. Існує три способи реалізації такого стиснення:

- Таблиці пошуку
- Ефективніші методи кодування
- Компресія з посиланням на попередні дані

Метод таблиць пошуку полягає в заміні довгих, повторюваних фрагментів даних посиланнями. Для розпакування ці посилання замінюються початковим текстом із таблиці пошуку. Цей метод може використовуватися динамічно та особливо ефективний для структурованих даних [8]. Наприклад, звернемо увагу на рисунок 1, його можна стиснути використовуючи статичну таблицю пошуку.

Таблиця 1 – Стиснуті дані за допомогою методу таблиць пошуку

:authority:	\$ 1
:method:	\$ 2
:path:	\$ 3
:scheme:	\$ 4
Accept:	\$ 5
Accept-Encoding:	\$ 6
Accept-Language:	\$ 7
Origin:	\$ 8
Priority:	\$ 9
Referer:	\$ 10
Sec-Ch-Ua:	\$ 11
Sec-Ch-Ua-Mobile:	\$ 12
Sec-Ch-Ua-Platform:	\$ 13
Sec-Fetch-Dest:	\$ 14
Sec-Fetch-Mode:	\$ 15
Sec-Fetch-Site:	\$ 16
User-Agent:	\$ 17

Джерело: розроблено авторами

Статичні таблиці не змінюються під час з'єднання, на відміну від динамічних таблиць, які оновлюються в реальному часі. Використовуючи створену таблицю 1 стиснутий варіант запиту матиме наступний вигляд (рис.3).

```
$1 Static.xx.fbcdn.net
$2 GET
$3. Jetmanifest/1017706399/facebook/main
$4 httos
$5 a
$6 gzip, deflate,
$7 en-GB,en-US;q=0.9,
$8 https://www.facebook.com
$9 u=1
$10 https://www.facebook.com/
$11 "Google Chrome";v="129"
$12 0?
$13 "macOS"
$14 empty
$15 cors
$16 cross-site
$17 Mozilla/5.0 (Macintosh; Intel Mac OS X 10_15_7) AppleWebKit/537.36 (KHTML, like Gecko) Chrome/129.0.0.0 Safari/537.36
$18 "Not=A?Brand";v="8", "Chromium";v="129"
```

Рисунок 3 – Типовий HTTP запит до Facebook

Джерело: розроблено авторами

Цей запит займає 455 символів, що на 26% менше початкового обсягу. Однак таблиця пошуку може бути додана до стисненої версії. У такому випадку загальний розмір може зрівнятися з оригіналом, що зведе економію нанівець.

Таблиці пошуку корисні лише при частому повторенні значень. У цьому простому прикладі можна використовувати узгоджену статичну таблицю для популярних HTTP заголовків.

Різні методи стиснення базуються на принципі, що дані можуть бути представлені компактніше за допомогою спеціалізованого підходу. Для тексту використовуються різні формати кодування: ASCII, UTF-8 чи UTF-16. Ми знаємо, що кожен символ зберігається у вигляді послідовності з 0 та 1 і займає 8 біт, як у випадку ASCII. Це називається кодуванням фіксованої довжини, оскільки кожен символ використовує однакову фіксовану кількість бітів для зберігання.

Одним із методів кодування змінної довжини, де символи кодуються бітами, залежно від частоти їх використання – є кодування Хаффмана. Основна ідея полягає в кодуванні змінної довжини, де символам присвоюється різна кількість бітів залежно від частоти їх появи. Часті символи кодуються коротшими кодами, тоді як рідкісні – довгими. Таке кодування зменшує загальну кількість бітів для тексту. В англійській мові літера *E* є найпоширенішою, за нею йдуть *T* і *A*, найрідше використовуються: *X*, *J*, *Q* та *Z*.

Однак виникає проблема у декодуванні: потрібно точно ідентифікувати межі символів, щоб правильно відновити початкову послідовність із бітового потоку. Щоб уникнути цієї неоднозначності, ми повинні гарантувати, що наше кодування задовольняє таке поняття, як префіксне правило, яке у свою чергу передбачає, що коди можна декодувати лише одним унікальним способом. Префіксне правило гарантує, що жоден код не буде префіксом іншого.

Алгоритм Хаффмана призначений для ефективного кодування даних, зменшуючи їх початковий розмір. Він працює за допомогою бінарного дерева, де кожному символу присвоюється унікальний код, залежно від частоти його появи: частіші символи отримують коротші коди, а рідкісні – довші. Для побудови дерева алгоритм спочатку сортує символи за частотою, об'єднує їх у вузли, а потім рекурсивно формує коди для кожного символу. Це дозволяє оптимально стискати дані, мінімізуючи обсяг пам'яті. Основна ідея методу полягає в заміні вихідних даних на більш ефективні коди. Кожному унікальному значенню присвоюється бінарний код, причому коротші

коди отримують значення, які зустрічаються частіше. Ці відповідності зберігаються в таблиці перекодування, яка завантажується в програму декодування перед обробкою самих кодів [9].

Можна взяти до прикладу запит на рисунку 1, проаналізувавши лише символи "a", "b", "c", "d" и "e", "f", частота їх появи дорівнюють 28, 10, 36, 8, 47 і 12 відповідно, зображено на рисунку 4

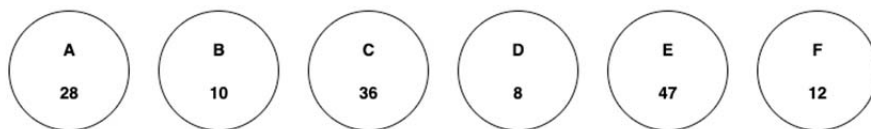


Рисунок 4 – Частота повторень символів у тексті

Джерело: розроблено авторами на підставі [10]

Необхідно сортувати символи за частотою їх появи, рисунок 5.



Рисунок 5 – Відсортований масив символів за повторенням їх у тексті

Джерело: розроблено авторами на підставі [10]

Основний алгоритм об'єднує разом всі елементи, що з'являються як найрідше, потім пара розглядається як один елемент і їх частоти об'єднуються. Це повторюється до тих пір, поки всі елементи не об'єднуються в пари (рис.6).

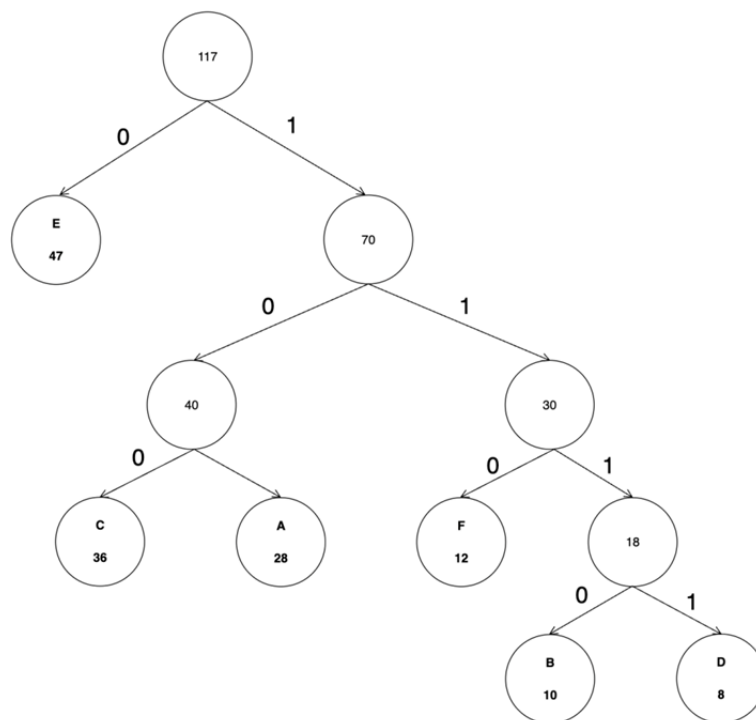


Рисунок 6 – Розкладений граф за методом Хаффмана

Джерело: розроблено авторами на підставі [10]

Можна заповнити утворені значення Хаффмана в таблиці 2 за допомогою рисунку6.

Таблиця 2 – Таблиця, побудована на основі утвореного графу Хаффмана

Символ	Значення Хаффмана	Бінарне значення
A	101	01000001
B	1110	01000010
C	100	01000011
D	1111	01000100
E	0	01000101
F	110	01000110

Джерело: розроблено авторами

Можна закодувати слово "safe". Використовуючи звичайний ASCII (4 x 7 біт = 28 біт) або кодування Хаффмана (3 + 3 + 3 + 1 = 10 біт). Кодування Хаффмана займає менше місця навіть у такому простому випадку. При більшому обсязі тексту економія буде помітна краще [10].

Після атаки CRIME виявилась уразливість у методах стиснення заголовків, HTTP/2 потребував нові підходи достиснення, які б були захищені від подібних атак. CRIME використовує алгоритми стиснення даних у SSL для доступу до конфіденційної інформації, наприклад, до cookies, і може дозволити зловмисникам несанкціонований доступ до системи. Цей підхід змінює розміри стиснених повідомлень [11]. Стиснення здійснюється до шифрування, що дозволяє зловмисникам можливість додавати дані cookie до повідомлень і таким чином отримувати доступ до зашифрованих даних [12].

CRIME становить серйозну загрозу, особливо для компаній та користувачів, які використовують хмарні технології для зберігання важливих даних. Зловмисники можуть використати цю вразливість для перехоплення конфіденційної інформації. Команда HTTP розробила специфікацію HPACK, яка базується на таблицях пошуку і кодуванні Хаффмана, але не використовує стиснення із зворотним переглядом (lookback-based compression), що робить його більш безпечним.

HPACK містить статичну таблицю з 61 найпоширенішою назвою HTTP заголовків. Ця таблиця використовується як для запитів, так і для відповідей сервера, дозволяючи ефективно стискати часто вживані назви HTTP заголовків, а також деякі поширені ключ пари.

Наприклад, заголовок method: DELETE відсутній у таблиці, але його можна стиснути, посилаючись на ключ значення (method: GET) для назви заголовка і закодоване значення DELETE. Іншими словами, записи таблиці для ключ значення можуть використовуватися тільки для назви наприклад, method. Однак у зворотному порядку це неможливо – немає можливості скористатися значенням, пов'язаним з іншим заголовком. Наприклад, заголовок header1: GET не може скористатися значенням GET з method: GET [13].

Крім статичної таблиці, HPACK використовує динамічну таблицю на рівні з'єднання, яка починається з позиції 62, тобто після статичної таблиці, і може досягати максимальної величини, визначеної параметром SETTINGS_HEADER_TABLE_SIZE у налаштуваннях [14]. За замовчуванням ця величина становить 4096 октетів, якщо не вказана інша. Коли максимальний розмір таблиці досягається, найстаріший запис видаляється. Щоб полегшити цей процес, кожен запис зміщується при додаванні нових заголовків.

У деяких випадках кодування Хаффмана може призводити до більшого розміру значень, ніж якби було використано звичайний ASCII. Якщо ви вирішите закодувати, наприклад, слово "delete" в ASCII, ви можете відразу перейти до шістнадцяткового формату, оскільки кожен код ASCII займає 1 октет. У цьому випадку немає різниці між використанням кодування Хаффмана чи його відсутністю – обидва варіанти займають по 7 октетів. Хоча всі коди Хаффмана в цьому прикладі складаються з 7 бітів, для повноти октетів потрібне додаткове заповнення, що зрештою дає однаковий розмір.

У деяких інших заголовках ASCII кодування може виявитися компактнішим, наприклад, якщо у заголовку використовуються рідкісні символи з таблиці Хаффмана, довжина кодування яких перевищує 8 бітів. Через це специфікація HPACK дозволяє клієнту вибирати, застосовувати кодування Хаффмана чи ні, і змінювати його для кожного заголовка, залежно від того, який метод дозволяє використовувати найменшу кількість октетів.

Загалом, кодування Хаффмана часто є ефективнішим, ніж ASCII. Це зумовлено тим, що хоча ASCII потребує лише 7 бітів, для кожного значення використовується повний 8-бітний октет, тож 1 біт витрачається даремно. Кодування Хаффмана допускає змінну довжину коду, що дозволяє уникнути втрати бітів. Проте у цьому випадку не часто символи можуть мати коди довші за 8 бітів, і в таких випадках кодування ASCII може бути ефективнішим. Однак ці символи мають бути рідковживаними, якщо таблиця Хаффмана для HPACK відображає реальне використання. Зрештою, пошук у статичних або динамічних таблицях завжди буде ефективнішим, ніж кодування як у форматі Хаффмана, так і в ASCII.

Cookies- це невеликі файли, які вебсайти зберігають на комп'ютері користувача під час відвідування. Вони містять інформацію, яка дозволяє сайту запам'ятовувати дії, налаштування або інші дані користувача між сесіями. Наприклад, cookie можуть зберігати дані про логін, уподобання, товари у кошику, щоб користувач не втрачав їх між відвідуваннями сайту.

Cookies містять чутливі дані і здаються ідеально підходять під метод Хаффмана. та часто мають великий розмір і повторюються, тому бажано, щоб вони стискалися.

Але на відміну від часткового стиснення із зворотним переглядом, у HPACK весь вміст cookie потрібно вгадати. Це зменшує ефективність від стиснення такого типу даних.

Деякі браузерери як Firefox не використовують індексування для невеликих cookies, які менші за 20 байтів, аргументуючи це тим, що якщо cookie маленькі, то навіть за високої частоти повторень зловмисникам буде складніше вгадати їх вміст, тому вигода від стиснення тут обґрунтована. Для великих cookie браузер індексує значення, щоб його можна було використовувати в подальших запитах. Chrome завжди використовує індексування незалежно від довжини cookies [15].

Висновки. Враховуючи необхідність оптимізації швидкості передачі даних в мережі і зростання складності сучасних веб сервісів, ефективність стиснення заголовків є одним із напрямків розвитку. Стиснення заголовків у HTTP 2 за допомогою HPACK суттєво зменшує обсяг переданих даних, що підвищує ефективність мережевих запитів. HPACK використовує статичні і динамічні таблиці заголовків разом з кодуванням Хаффмана, яке дозволяє зберігати заголовки у вигляді бітових послідовностей змінної довжини, зокрема для елементів заголовків, що часто використовуються. Це дає змогу знижувати обсяг даних при повторних запитах, оптимізуючи навантаження на мережу за рахунок меншого об'єму інформації, що передається.

Застосування кодування Хаффмана в HPACK може бути не завжди оптимальним, зокрема для великих, чи рідко використовуваних частин заголовків, використання стандартного ASCII кодування може давати кращі результати. У більшості випадків, кодування Хаффмана дає змогу значно зменшити обсяг даних, що будуть передаватися. Однак, аналіз конкретної системи та дослідження специфіки її статистики запитів можуть бути аргументом для вибору іншого варіанту стиснення даних, що буде більш оптимальним для даної конкретної системи.

Безпека при передачі даних, особливо таких як cookies, залишається важливим аспектом HPACK. Хоча cookies можуть мати великий розмір і повторюються в кожному запиті, стиснення таких даних потребує особливої уваги. Зокрема необхідно враховувати, що стиснення cookies, які мають менше 20 біт розміру не є обов'язковим. Загалом для стиснення даних, що мають невеликий розмір, бажано не використовувати метод Хаффмана. Виграш в швидкості передачі для даних малого об'єму не компенсує витрат часу на дешифрування заголовку.

HPACK забезпечує оптимальне стиснення заголовків у HTTP 2, знижуючи навантаження на мережу та покращуючи швидкість обробки запитів. Однак, досягнення балансу між ефективністю стиснення та безпекою залишається актуальним питанням для його подальшого вдосконалення, оскільки технології розвиваються. Зловмисники шукають нові підходи і прогалини у мережі. Тому сучасні веб-браузери повинні постійно оновлюватися, щоб запроваджувати найновіші методи стиснення заголовків та захисту даних.

Одним із перспективних напрямків є використання гібридних методів стиснення, а саме поєднання Хаффмана з такими як Run-Length Encoding (RLE) або LZ77, такий підхід може дати кращі результати при обробці специфічних типів даних. Також можна запропонувати використання штучного інтелекту для аналізу мережевого трафіку й визначення ефективних варіантів стратегій для конкретних випадків. Використання різних підходів до стиснення заголовків і їх декомпресії з урахуванням конкретних характеристик клієнта та сервера може значно покращити продуктивність у мережах із високими затримками.

Список літератури

1. Singh V. Evolution of internet protocols: episode 573. *Software engineering radio*. URL: <https://podcasts.apple.com/ua/podcast/software-engineering-radio-the-podcast-for/id120906714?i=1000621654154> (дата звернення: 01.10.2023).
2. Кравчук О. Аспекти переходу на HTTP/2. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2016. № 5. С. 221.
3. Peon R., Ruellan H. HPACK: Header compression for HTTP/2 (No. RFC 7541). URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7541.html> (дата звернення: 14.11.2024).
4. Перевозніков С. І., Горобець Ю. В. Порівняння часу завантаження сторінки за протоколами HTTP1 та HTTP2. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції «Інтернет-освіта-наука» (IES-2020)*, Україна, Вінниця, 26-29 травня 2020 р. Вінниця, 2020. С. 88-91.
5. Дровозов В. І., Хемраєв А. К. Аналіз надлишковості протоколів стека TCP/IP. *Інформатизація та управління*. 2020. № 26.
6. Kerschbaumer C., Gaibler J., Edelstein A., van der Merwey T. HTTPS-Only: Upgrading all connections to HTTPS in web browsers. *Workshop on measurements, attacks, and defenses for the web*. 2021. URL: <https://doi.org/10.14722/madweb.2021.23010> (дата звернення: 14.11.2024).
7. Чобану В. В. Дослідження та розроблення системи вибору оптимального алгоритму стиснення даних при резервному копіюванні. *Інформаційні технології та системи*. 2021. № 7.

8. Khataei A., Bazargan K. CompressedLUT: An Open Source Tool for Lossless Compression of Lookup Tables for Function Evaluation and Beyond. *Proceedings of the 2024 ACM/SIGDA International Symposium on Field Programmable Gate Arrays*. 2024. С. 2-11.
9. Moffat A. Huffman coding *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2019. Т. 52, № 4. С. 1-35.
10. Методи стиску зображень / Кафедра програмного забезпечення Дніпровського державного технічного університету. URL: <https://pzs.dstu.dp.ua/ComputerGraphics/ic/index.html> (дата звернення: 14.11.2024).
11. Ivanov O., Ruzhentsev V., Oliynykov R. Comparison of modern network attacks on TLS protocol 2018 *International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*. 2018. С. 565-570.
12. Parveen K., Fatima N. Cookie Hijacking: Privacy Risk *International Journal for Electronic Crime Investigation*. 2023. Т. 7, № 4. С. 61-72.
13. Beckett D., Sezer S. HTTP/2 tsunamis: Investigating HTTP/2 proxy amplification DDoS attacks 2017 *Seventh International Conference on Emerging Security Technologies (EST)*. 2017. С. 128-133.
14. Jiang M., Luo X., Miu T., Hu S., Rao W. Are HTTP/2 servers ready yet? 2017 *IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*. 2017. С. 1661-1671.
15. Kontaxis G., Chew M. Tracking protection in Firefox for privacy and performance. arXiv:1506.04104. URL: <https://arxiv.org/abs/1506.04104> (дата звернення: 14.11.2024).

References

1. Singh, V. (2023, October 1). Evolution of internet protocols: episode 573. *Software Engineering Radio*. <https://podcasts.apple.com/ua/podcast/software-engineering-radio-the-podcast-for/id120906714?i=1000621654154>
2. Kravchuk, O. (2016). Aspects of transition to HTTP/2. *Visnyk Khmelnytskoho Natsionalnoho Universytetu*, (5), 221. [in Ukrainian]
3. Peon, R., & Ruellan, H. (2015). HPACK: Header compression for HTTP/2 (No. RFC 7541). <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7541.html>
4. Perevoznikov, S. I., & Horobets, Y. V. (2020). Comparison of page loading time using HTTP1 and HTTP2 protocols. In *Proceedings of the XII International Scientific-Practical Conference "Internet-Education-Science" (IES-2020)*, Vinnytsia, Ukraine (pp. 88-91). VNTU. [in Ukrainian]
5. Drovovozov, V. I., & Khemraiev, A. K. (2020). Analysis of redundancy in TCP/IP protocols stack. *Informatyziatsiia ta upravlinnia*, (26). [in Ukrainian]
6. Kerschbaumer, C., Gaibler, J., Edelstein, A., & van der Merwey, T. (2021). HTTPS-only: Upgrading all connections to HTTPS in web browsers. In *Workshop on Measurements, Attacks, and Defenses for the Web*. Internet Society. <https://doi.org/10.14722/madweb.2021.23010>
7. Chobanu, V. V. (2021). Research and development of a system for selecting the optimal data compression algorithm for backup. *Informatsiini Tekhnologii ta Systemy*, (7). [in Ukrainian]
8. Khataei, A., & Bazargan, K. (2024, April). CompressedLUT: An open-source tool for lossless compression of lookup tables for function evaluation and beyond. *Proceedings of the 2024 ACM/SIGDA International Symposium on Field Programmable Gate Arrays* (pp. 2-11).
9. Moffat, A. (2019). Huffman coding. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 52(4), 1-35. <https://doi.org/10.1145/3338521>
10. Methods of image compression. (n.d.). Kafedra programnoho zabezpechennia Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. <https://pzs.dstu.dp.ua/ComputerGraphics/ic/index.html> [in Ukrainian]
11. Ivanov, O., Ruzhentsev, V., & Oliynykov, R. (2018, October). Comparison of modern network attacks on TLS protocol. In *2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)* (pp. 565-570). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PICST.2018.8632037>
12. Parveen, K., & Fatima, N. (2023). Cookie hijacking: Privacy risk. *International Journal for Electronic Crime Investigation*, 7(4), 61-72. <https://doi.org/10.1016/j.ijeci.2023.03.002>
13. Beckett, D., & Sezer, S. (2017, September). HTTP/2 tsunamis: Investigating HTTP/2 proxy amplification DDoS attacks. In *2017 Seventh International Conference on Emerging Security Technologies (EST)* (pp. 128-133). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EST.2017.7890109>
14. Jiang, M., Luo, X., Miu, T., Hu, S., & Rao, W. (2017, June). Are HTTP/2 servers ready yet? In *2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)* (pp. 1661-1671). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICDCS.2017.192>

15. Kontaxis, G., & Chew, M. (2015). Tracking protection in Firefox for privacy and performance. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/1506.04104>

Olexandr Ulichev, PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Olexandr Revniuk, post-graduate

Private Higher Education Establishment "European University", Kyiv, Ukraine

Comparison of HTTP 2 Header Compression Methods

The primary aim of this research is to analyze the key methods of header compression in the HTTP 2 protocol to optimize data transmission over the network. This study explores the prerequisites for developing the HPACK compression algorithm, assesses the potential threats and data loss risks associated with compression, and identifies strategies to minimize these risks. Additionally, the research focuses on the challenges of handling cookies in HTTP headers and determining optimal compression methods for reducing the volume of transmitted data, with practical examples from commercial code.

Introduced in 2015, HTTP 2 significantly improves web communication efficiency by utilizing multiplexing and header compression. Unlike HTTP 1.1, which involves repetitive transmission of headers for each request, HTTP 2 addresses this redundancy through HPACK, which uses static and dynamic header tables alongside Huffman coding. These techniques substantially reduce the data volume transmitted between client and server, lowering the load on network resources, especially in mobile environments with limited bandwidth. This paper examines how HPACK achieves data optimization by compressing frequently used headers while maintaining secure data transmission. It also explores various methods of implementing compression, including Huffman coding and lookup tables, to enhance efficiency in practical web applications. The findings highlight the trade-offs between compression efficiency and security, especially concerning the transmission of sensitive information like cookies.

The use of HPACK for header compression in HTTP 2 drastically reduces the volume of transmitted data, thereby improving network request efficiency. While Huffman coding is often effective, its benefits may not always outweigh those of traditional ASCII encoding, particularly for larger or less frequently used headers. The study concludes that effective compression strategies must consider both data optimization and security, especially when transmitting sensitive information such as cookies. By selecting the appropriate compression methods, it is possible to balance the efficiency of data transfer with the protection of confidential information. Future research should focus on enhancing HPACK's balance between compression and security as technologies evolve and potential vulnerabilities emerge.

HTTP2, header compression in HTTP2, HPACK, cookies, Huffman coding, HTTP requests

Одержано (Received) 18.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 25.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

УДК 004.8/681.5

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.117-125>**Р.М. Минайленко**, доц., канд. техн. наук, **Л.І. Поліщук**, ст. викл.*Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна**e-mail: aron70@ukr.net*

Особливості проектування архітектури довіри нульового рівня

В статті проведено аналіз особливостей архітектури довіри нульового рівня (АДНР), яка є відносно новою концепцією інформаційної безпеки, враховуючою віддалений формат доступу співробітників до інформації, яка є власністю підприємства, де вони працюють. Показано, що традиційні моделі забезпечення інформаційної безпеки, засновані на периметрі безпеки, не дозволяють забезпечити потрібний рівень захисту від можливих загроз.

АДНР є визначеним набором принципів керування для організації заходів, які доцільно використовувати з метою вдосконалення інформаційної безпеки підприємств і підвищення рівня їх захищеності. Основним завданням АДНР є зведення до мінімуму ризиків інформаційної безпеки від впливу зовнішніх вторгнень зловмисників на інформаційні активи підприємства і забезпечення його нормального функціонування.

архітектура, нульовий рівень довіри, безпека, комп'ютер

Постановка проблеми. З розвитком мережевих технологій і появою можливості віддаленої роботи виникла необхідність забезпечити безпечний доступ користувачів з власних домашніх комп'ютерів до інформаційних сервісів і корпоративних баз даних підприємств. В результаті виникають ускладнення в архітектурі інформаційних систем і систем безпеки підприємств [1–3].

Архітектура довіри нульового рівня (АДНР) є відносно новою концепцією в області інформаційної безпеки і стала відображенням напрямків розвитку архітектури систем інформаційної безпеки підприємств. Основною метою впровадження АДНР є зниження ризиків інформаційної безпеки на підприємстві від можливих наслідків зовнішніх вторгнень зловмисників та забезпечення нормальної роботи підприємства.

При використанні моделі АДНР передбачається, що зловмисник, який найчастіше знаходиться ззовні, також може перебувати всередині підприємства, і між ними немає різниці. Виходячи з цього, при використанні моделі АДНР компанія повинна відмовитися від беззаперечної довіри до власних співробітників і постійно контролювати свої активи. При цьому заходи безпеки інформації повинні проводитися постійно [4–6,7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При використанні моделі АДНР під час доступу до активів або облікових записів користувачів необхідно постійно перевіряти їх місцезнаходження, ідентифікувати пристрої, тип операційної системи та специфіку інформації, що використовується. Тобто при доступі до даних, які належать певному підприємству, враховується велика кількість інформації про користувача. Крім того, кількість цієї інформації може змінюватися відповідно до алгоритму, заданого системою безпеки [7, 8].

На рисунку 1 представлена узагальнена архітектура системи захисту інформації з використанням АДНР:

Архітектура АДНР складається з двох основних рівнів:

1. Рівень доступу користувача.
2. Рівень підприємства з його інформаційними активами.

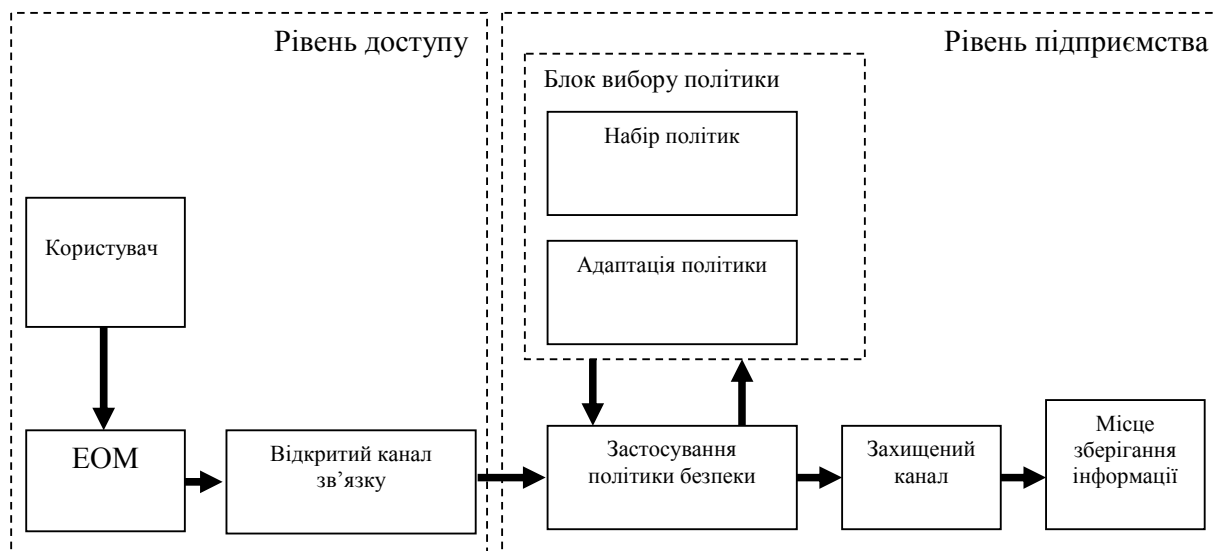


Рисунок 1 – Схема доступу до інформації підприємства з використанням АДНР

Джерело: розроблено авторами

Користувач може сформулювати запит на дозвіл входу в інформаційну систему підприємства та надіслати його через відкритий інформаційний канал. Далі запит надходить до блоку застосування політики безпеки, де формується вибір політики безпеки. Вся інформація про активність користувачів аналізується блоком вибору політики безпеки, і, при необхідності, коригується блоком адаптації політики. Після отримання дозволу користувач отримує доступ до конфіденційної інформації підприємства через захищений канал [7,9–12].

АДНР – це модель безпеки та комплекс технологій, які використовують принцип нульового рівня довіри, тобто «нікому не довіряй, усіх перевіряй». А традиційні моделі безпеки припускають, що коли інформація вже потрапила в середину корпоративної мережі, вона безпечна. АДНР базується на принципі, що всі пристрої та користувачі є потенційною загрозою, незалежно від того, чи знаходяться вони всередині периметра мережі, чи працюють віддалено. Тому дозвіл на використання ресурсів компанії надається лише після перевірки та постійного моніторингу користувачів і стану безпеки пристроїв.

Метою впровадження АДНР є забезпечення безпечного віддаленого доступу до програм і даних, зниження ризику витоку даних та інших видів кіберзагроз, надання доступу до ресурсів мережі лише перевіреним і авторизованим користувачам і пристроям [7, 13].

Для успішного впровадження та отримання всіх переваг цього підходу, навіть за умови придбання спеціалізованих програмних продуктів, необхідно забезпечити певне навчання персоналу перед початком роботи та застосування передових політик безпеки та безпечного доступу.

Постановка завдання. Інформаційні системи вирішують важливе завдання забезпечення безпечного доступу до інформації підприємства та його віддалених філій. Від ефективності вирішення цієї проблеми залежить не тільки виконання

поточних завдань підприємства, а й, власне, існування самого підприємства в реаліях сьогодення [14, 15].

Концепція підтримки життєвого циклу складної виробничої системи та її системи безпеки багато в чому залежать від архітектури підприємства. Основні компоненти архітектури підприємства показані на рисунку 2:

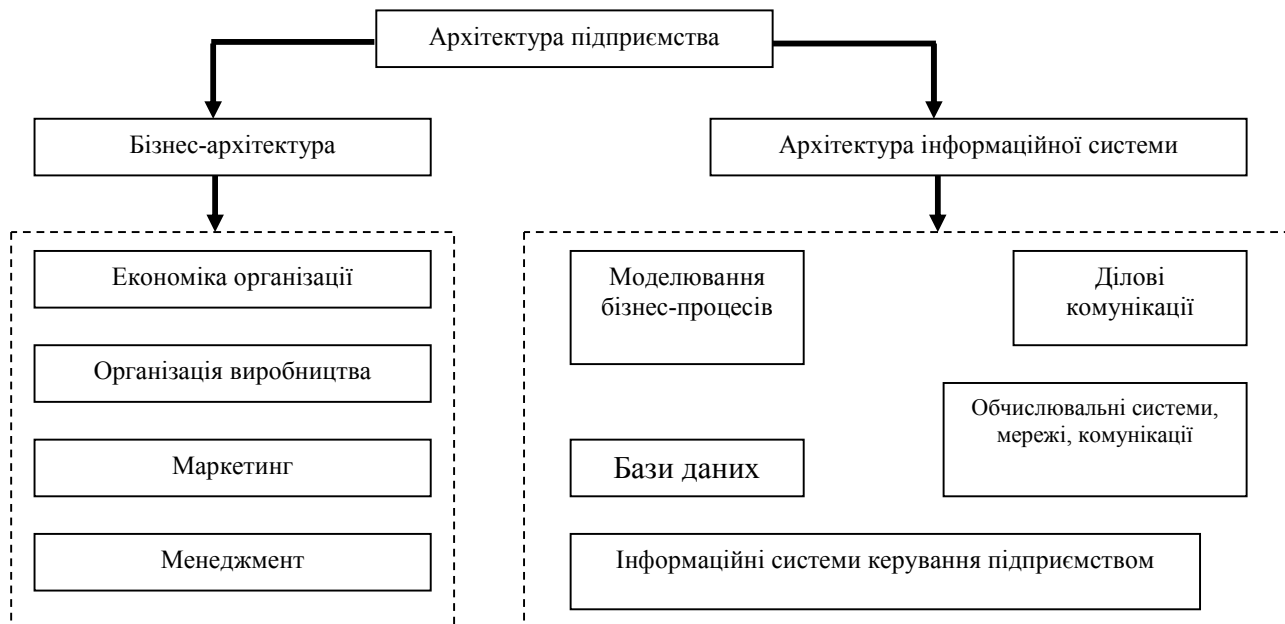


Рисунок 2 – Основні складові архітектури підприємства

Джерело: розроблено авторами

Складовими архітектури підприємства є бізнес-архітектура та архітектура інформаційної системи, які тісно пов'язані між собою. Слід зазначити, що розподілені інформаційні системи більш вразливі з точки зору забезпечення інформаційної безпеки.

Крім того, інтеграція офісної та віддаленої домашньої інформаційних систем значно ускладнює архітектуру системи захисту інформації.

Завдання проектування інформаційних систем і систем безпеки підприємства складні і залежать від специфіки того чи іншого підприємства.

В загальному випадку АДНР має базуватися на семи основних принципах:

1. Підприємству або організації слід захищати всі свої дані, послуги та пристрої. При умові, якщо користувачі мережі можуть отримувати доступ до ресурсів організації з власних пристроїв, то такі гаджети теж мають враховуватись при проектуванні системи захисту підприємства

2. Комунікації. Всі комунікації, як внутрішні, так і за межами мережі, мають однаково оброблятися та захищатися найбезпечнішим із наявних методів.

3. Посесійний доступ. Кожне звертання до критично важливого ресурсу організації повинно встановлюватись відокремлено для кожного сеансу.

4. Динамічні політики. Доступ до ресурсів організації повинен надаватися згідно зі встановленими правилами політики організації та керуватись принципом найменших привілеїв. Ця політика має визначати:

- ресурси організації;
- користувачів;
- права доступу для користувачів.

5. Моніторинг. Для забезпечення належного захисту даних та корпоративних ресурсів організації повинні моніторити ці ресурси і все, що з ними відбувається.

6. Перевірка. Перед тим, як надавати доступу до будь-якого корпоративного ресурсу організація має забезпечити динамічну перевірку користувачів.

7. Безперервне покращення системи безпеки. Організація має збирати інформацію про поточний стан мережних активів, інфраструктуру та з'єднання для поліпшення стану безпеки.

Ці принципи проектування архітектури нульової довіри можуть одночасно і не застосовуватись. Можете обмежитись реалізацією лише декількох із них, тих які найбільше відповідають конкретним потребам. Причому АДНР не потребує повної заміни існуючої мережевої архітектури на основі периметра, а пропонує розширення існуючої мережі завдяки додаванню сегментів мережі, захищених шлюзами, що значно покращить політику безпеки та правила доступу для користувачів.

Принципи проектування архітектури нульової довіри представлені на рисунку 3:



Рисунок 3 – Принципи проектування архітектури нульової довіри

Джерело: розроблено авторами

Виклад основного матеріалу. За результатами аналізу можна виділити наступні особливості проектування систем захисту інформації на базі АДНР:

1. Обсяг інформації, що обробляється в інформаційних системах, постійно зростає.

2. Використовуються різні внутрішні комп'ютерні мережі з власними інформаційними системами.

3. Методи забезпечення інформаційної безпеки мережі не забезпечують необхідного рівня інформаційної безпеки, оскільки немає чітко встановлених меж інформаційної безпеки для розподілених підприємств. Тобто, якщо зловмисник перетнув охоронний периметр, то подальший горизонтальний рух комп'ютерною мережею буде досить простим. У цьому випадку доцільно використовувати АДНР.

Архітектура нульового рівня довіри орієнтована, перш за все, на захист даних і послуг, але має можливість розширення на всі компоненти підприємства і кінцевих користувачів послуг. Але доступ буде дозволено лише тим користувачам, які визначені як такі, що потребують цього доступу, і при цьому забезпечується постійна перевірка та авторизація особи. Також виконується аналіз безпеки кожного звертання до системи.

При проектуванні систем безпеки підприємств на базі АДНР значну увагу слід приділяти політиці безпеки [7, 16, 17].

Формування політики безпеки для кожного конкретного об'єкта потребує обробки великих масивів даних, на основі яких за допомогою алгоритмів класифікації приймається те чи інше рішення щодо зміни алгоритмів безпеки та адаптації політик під конкретний об'єкт. Реалізація динамічного формування набору політик безпеки вимагає збору та аналізу даних, обробки інформації та адаптації політик безпеки доступу до інформації.

При проектуванні систем захисту програмного забезпечення використовуються різноманітні шаблони, які відображають досвід, накопичений розробниками інформаційних систем, що призводить до скорочення часу та ресурсів на їх створення та впровадження.

Але впровадження АДНР має не тільки переваги, але і певні недоліки, що показано на рисунку 4.

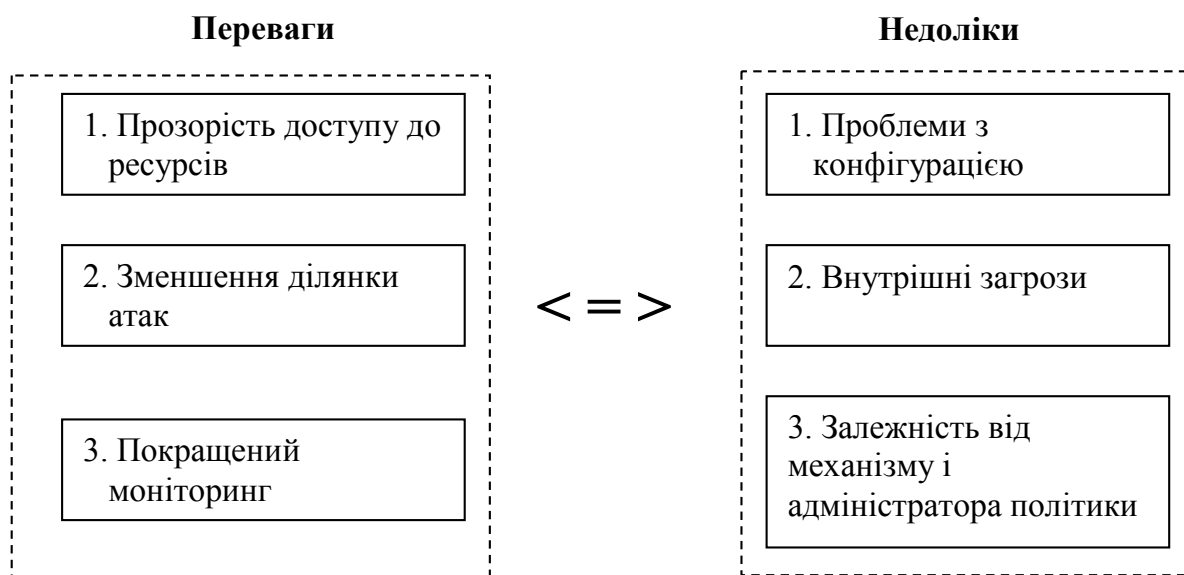


Рисунок 4 – Переваги та недоліки впровадження АДНР

Джерело: розроблено авторами

Охарактеризуємо спочатку переваги впровадження АДНР:

1. Застосування АДНР вимагатиме визначення і класифікації всіх ресурсів мережі, що дозволить бачити, хто із співробітників отримав доступ до ресурсів, і розуміти, які заходи потрібно застосувати для захисту ресурсів.

2. При збільшенні уваги на безпеку окремих визначених ресурсів організації, які реалізують принципи нульової довіри, зменшуються ризики атак зловмисників, направлених на периметр мережі.

3. Концепція безпеки з нульовою довірою передбачає впровадження додаткових рішень, що дозволяє організаціям простіше виявляти потенційні загрози та своєчасно реагувати на них.

Недоліками від провадження АДНР є:

1. Виникнення проблем з конфігурацією. АДНР не створюється за допомогою єдиного рішення, тому виникатимуть труднощі з некоректним налаштуванням вже використовуваного обладнання.

2. Впровадження архітектури з нульовою довірою значно покращує захист від зовнішніх атак, але коли зловмисник знаходиться всередині периметра і використовує свій статус з корисливою метою, то виникає загроза витоку конфіденційної інформації. Цю проблему в певній мірі можна усунути шляхом використання розширених заходів: керування привілейованим доступом, багатофакторна перевірка та ручне підтвердження запитів на доступ.

3. Архітектура з нульовою довірою залежить від механізму та адміністратора політики і потребує їхнього дозволу на користування корпоративними ресурсами. Тому продуктивність мережі в цілому є залежною від правильної конфігурації та обслуговування.

Висновки. На теперішній час працівники підприємств можуть працювати віддалено та отримувати доступ до активів компанії. Традиційні моделі забезпечення інформаційної безпеки, які базуються на моделі зовнішнього периметра безпеки, не дозволяють забезпечити належний рівень захисту від можливих загроз.

Використання АДНР, основним елементом якого є динамічна зміна персоналізованої політики безпеки користувачів, дозволяє вирішити цю проблему та дозволяє забезпечити постійний контроль доступу до конфіденційної інформації компанії.

АДНР – це визначений набір принципів управління організацією діяльності, які повинні використовуватися з метою покращення інформаційної безпеки підприємств та підвищення рівня їх безпеки.

Основним завданням АДНР є мінімізація ризиків інформаційної безпеки від впливу зовнішніх вторгнень зловмисників на інформаційні активи компанії та забезпечення їх нормального функціонування.

Список літератури

1. Sosnin O. (2020). *Digitization as a new reality of Ukraine*. URL: <https://lexinform.com.ua/dumka-eksperta/tsyfrovizatsiya-yak-nova-realnist-ukrayiny/> (Accessed: 15 March 2024).
2. Fleck A. (2024, February 22). *Cybercrime Expected To Skyrocket in Coming Years*. Retrieved from <https://www.statista.com/chart/28878/expected-cost-of-cybercrime-until-2027> (Accessed: 26 February 2024).
3. Ashwini Kumari M. and Nandini Prasad K. S. A Behavioral Study of Advanced Security Attacks in Enterprise Networks, 2021 IEEE International Conference on Computation System and Information Technology for Sustainable Solutions (CSITSS), Bangalore, India, 2021, pp. 1–5. DOI: 10.1109/CSITSS54238.2021.9682903

4. Anjum I., Kostecki D., Leba E., Sokal J., Bharambe R., Enck W., Nita-Rotaru C., & Reaves B. (2022). Removing the Reliance on Perimeters for Security using Network Views. *Proceedings of the 27th ACM on Symposium on Access Control Models and Technologies*. pp. 151–162, <https://doi.org/10.1145/3532105.3535029>
5. Sheikh N., Pawar M., & Lawrence V. (2021). Zero trust using Network Micro Segmentation. *IEEE INFOCOM 2021 – IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMWKSHPS51825.2021.9484645>
6. Wu Y. G., Yan W. H. and Wang J. Z. Real identity based access control technology under zero trust architecture, 2021 International Conference on Wireless Communications and Smart Grid (ICWCSG), Hangzhou, China, 2021, pp. 18–22, doi: 10.1109/ICWCSG53609.2021.00011
7. Nair Anita (2021). The Why and How of adopting Zero Trust Model in Organizations. *TechRxiv*. Preprint. pp. 1–6, <https://doi.org/10.36227/techrxiv.14184671.v1>
8. Hines C. D. and Chowdhury M. M. Uncover Security Weakness Before the Attacker Through Penetration Testing, 2022 IEEE International Conference on Electro Information Technology (eIT), Mankato, MN, USA, 2022, pp. 492–497, doi: 10.1109/eIT53891.2022.9813950 164
9. Abhishek Arote, Umakant Mandawkar. Android Hacking in Kali Linux Using Metasploit Framework, *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology (IJSRCSEIT)*, ISSN : 2456-3307, Volume 7, Issue 3, pp. 497–504, May–June-2021. Available at doi: <https://doi.org/10.32628/CSEIT2173111>
10. What are the main challenges and benefits of implementing a zero trust network architecture? (2023, October 6). Retrieved from <https://www.linkedin.com/advice/1/what-main-challenges-benefits-implementing-4e> (Accessed: 26 February 2024).
11. Tyshyk I. (2023). Vybir tekhnolohii viddalenooho dostupu dlia efektyvnoi orhanizatsii zakhystu merezhevykh ziednan. *Elektronne fakhove naukove vydannia “Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika”*, 3(19), pp. 34–45. DOI: 10.28925/2663-4023.2023.19.3445
12. Yuanhang He, Daochao Huang, Lei Chen, Yi Ni, Xiangjie Ma. A Survey on Zero Trust Architecture: Challenges and Future Trends, *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, Article ID 6476274, 13 pages, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/6476274>
13. Rose S., Borchert O., Mitchell S., & Connelly S. (2020). Zero Trust Architecture. NIST Special Publication 800–207. *National Institute of Standards and Technology*. pp. 1–50, DOI: 10.6028/NIST.SP.800-207
14. Koeppen D., MacDonald N., Watts J. (2022, October 3). 7 Effective Steps for Implementing Zero Trust Network Access. URL: <https://emt.gartnerweb.com/ngw/eventassets/en/conferences/hub/identity-accessmanagement/documents/gartner-iam-implementing-zero-trust-network-access.pdf> (Accessed: 26 February 2024).
15. Deloitte Cybersecurity Threat Trends Report 2023. (n.d.). URL: <https://www2.deloitte.com/us/en/pages/risk/articles/cybersecurity-threat-trends-report-2023.html> (Accessed: 26 February 2024).
16. M-Trends 2023: Cybersecurity Insights From the Frontlines, Mandiant. Report. URL: <https://www.mandiant.com/resources/blog/m-trends-2023> (Accessed: 26 February 2024).
17. The 2024 SonicWall Cyber Threat Report, SonicWall, 2024, URL: <https://www.sonicwall.com/medialibrary/en/white-paper/2024-cyber-threat-report.pdf> (Accessed: 26 February 2024).

References

1. Sosnin, O. (2020). *Digitization as a new reality of Ukraine*. <https://lexinform.com.ua/dumka-eksperta/tsyfrovizatsiya-yak-nova-realnist-ukrayiny/> [In Ukrainian] (Accessed: 15 March 2024). [In Ukrainian]
2. Fleck, A. (2024, February 22). Cybercrime Expected To Skyrocket in Coming Years. <https://www.statista.com/chart/28878/expected-cost-of-cybercrime-until-2027> [in English].
3. Ashwini Kumari, M. & Nandini Prasad, K. S. (2021). A Behavioral Study of Advanced Security Attacks in Enterprise Networks. *2021 IEEE International Conference on Computation System and Information Technology for Sustainable Solutions (CSITSS)*, Bangalore, India, pp. 1–5. [in English]. DOI: 10.1109/CSITSS54238.2021.9682903
4. Anjum, I., Kostecki, D., Leba, E., Sokal, J., Bharambe, R., Enck, W., Nita-Rotaru, C., & Reaves, B. (2022). Removing the Reliance on Perimeters for Security using Network Views. *Proceedings of the 27th ACM on Symposium on Access Control Models and Technologies*. pp. 151–162, [in English]. <https://doi.org/10.1145/3532105.3535029>

5. Sheikh, N., Pawar, M., & Lawrence, V. (2021). Zero trust using Network Micro Segmentation. *IEEE INFOCOM 2021 – IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pp. 1–6. [in English]. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMWKSHPS51825.2021.9484645>
6. Wu, Y. G., Yan, W. H. & Wang, J. Z. (2021). Real identity based access control technology under zero trust architecture, 2021 International Conference on Wireless Communications and Smart Grid (ICWCSG), Hangzhou, China, 2021, pp. 18–22, [in English]. doi: 10.1109/ICWCSG53609.2021.00011
7. Nair Anita (2021). The Why and How of adopting Zero Trust Model in Organizations. *TechRxiv. Preprint*. pp. 1–6, <https://doi.org/10.36227/techrxiv.14184671.v1>
8. Hines, C. D. & Chowdhury, M. M. (2022). Uncover Security Weakness Before the Attacker Through Penetration Testing. *2022 IEEE International Conference on Electro Information Technology (eIT)*, Mankato, MN, USA, 2022, pp. 492–497 [in English]. doi: 10.1109/eIT53891.2022.9813950 164
9. Abhishek Arote, & Umakant Mandawkar. (2021). Android Hacking in Kali Linux Using Metasploit Framework, *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology (IJSRCSEIT)*, ISSN : 2456-3307, Vol.7, Issue 3, pp. 497–504, May–June-2021. [in English]. doi: <https://doi.org/10.32628/CSEIT2173111>
10. What are the main challenges and benefits of implementing a zero trust network architecture? (2023, October 6). <https://www.linkedin.com/advice/1/what-main-challenges-benefits-implementing-4e> [in English].
11. Tyshyk, I. (2023). Vybir tekhnolohii viddalenooho dostupu dlia efektyvnoi orhanizatsii zakhystu merezhevykh ziednan. *Elektronne fakhove naukove vydannia “Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika”*, 3(19), pp. 34–45. [in English]. DOI: 10.28925/2663-4023.2023.19.3445
12. Yuanhang, He, Daochao, Huang, Le,i Chen, Yi, Ni, & Xiangjie, Ma. (2022). A Survey on Zero Trust Architecture: Challenges and Future Trends, *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, Article ID 6476274, 13 pages, [in English]. <https://doi.org/10.1155/2022/6476274>
13. Rose, S., Borchert, O., Mitchell, S., & Connelly, S. (2020). Zero Trust Architecture. *NIST Special Publication 800–207*. National Institute of Standards and Technology. pp. 1–50. [in English]. DOI: 10.6028/NIST.SP.800-207
14. Koeppen, D., MacDonald, N. & Watts, J. (2022, October 3). 7 Effective Steps for Implementing Zero Trust Network Access. <https://emt.gartnerweb.com/ngw/eventassets/en/conferences/hub/identity-accessmanagement/documents/gartner-iam-implementing-zero-trust-network-access.pdf> [in English].
15. Deloitte Cybersecurity Threat Trends Report (2023). (n.d.). Retrieved from <https://www2.deloitte.com/us/en/pages/risk/articles/cybersecurity-threat-trends-report-2023.html> [in English].
16. M-Trends (2023). *Cybersecurity Insights From the Frontlines*, Mandiant. Report. Retrieved from: <https://www.mandiant.com/resources/blog/m-trends-2023> [in English].
17. The 2024 SonicWall Cyber Threat Report, SonicWall, (2024). <https://www.sonicwall.com/medialibrary/en/white-paper/2024-cyber-threat-report.pdf> [in English].

Roman Minailenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Liudmyla Polishchuk**, Senior Lecturer
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Analysis of Features of Zero-level Trust Architecture

The article provides an overview and analysis of modern BIOS interfaces. It is shown that due to the large The article analyzes the features of the zero-level trust architecture (ZTR), which exists. a relatively new concept of information security, taking into account the remote format of employee access to information that is the property of the enterprise where they work.

It is shown that traditional models of ensuring information security, based on the security perimeter, do not allow to provide the required level of protection against possible threats.

ADNR is a defined set of management principles for the organization of activities that should be used in order to improve the information security of enterprises and increase the level of their security.

The main task of ADNR is to minimize information security risks from the impact of external intrusions by intruders on the company's information assets and ensure its normal functioning.

With the development of network technologies and the emergence of the possibility of remote work, there was a need to provide employees with secure access from their home computers to information services and corporate databases of enterprises. As a result, the architecture of information systems and security systems became more complicated. With the development of network technologies and the emergence of the possibility of remote work, there was a need to provide employees with secure access from their home computers to information services and corporate databases of enterprises. The result was the complication of information systems and security systems of enterprises.

When using the ADNR model, it is assumed that the attacker, who is most often from the outside, can also be inside the enterprise, and there is no difference between them. Based on this, when using the ADNR model, the company must abandon unquestioning trust in its own employees and constantly monitor its assets. At the same time, information security measures must be carried out constantly.

architecture, zero trust, security, computer

Одержано (Received) 14.09.2024

Прорецензовано (Reviewed) 25.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

АГРОІНЖЕНЕРІЯ

УДК 631.362.3:633.1

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.126-135>**С.О. Харченко**, доц., д-р. техн. наук, **О.І. Біловод**, доц., канд. техн. наук*Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна***Ф.М. Харченко**, доц., канд. техн. наук, **І.О. Котляревський**, асп.*Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна**e-mail: kharchenko_mtf@ukr.net***В.В. Яровий**, асп.*Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна*

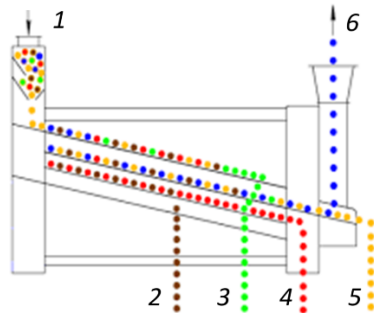
Причини блокування отворів перфорованих просіювальних поверхонь вібросепараторів

Сепарування сипких матеріалів є поширеною технологічною операцією, зокрема насінневого матеріалу в сільському господарстві. Ефективність сепарувального обладнання залежить від своєчасного та максимального розблокування отворів на просіювальних поверхнях. Однією з поширених систем очищення отворів є кулькові очисники. Мета роботи – експериментальний аналіз потенціалу системи очищення, зокрема, пошук раціональних параметрів системи очищення, шляхом розблокування отворів. **кулькові очисники, перфоровані просіювальні поверхні, процес сепарації, сипкі матеріали, заблоковані отвори**

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій. Поділ компонентів сипких матеріалів за розмірами є однією з розповсюджених технологічних операцій в різних галузях [1–3]. Для реалізації переважно використовують перфоровані просіювальні поверхні (ППП) або решета, які працюють з вібрацією та мають отвори різної форми та розмірів. Це дозволяє отримати декілька фракцій компонентів сипких матеріалів: дрібні, легкі, крупні та основні компоненти (рис.1). Один з перспективних способів підвищення ефективності просіювання сипких матеріалів є використання ППП з отворами складаної геометрії [4, 5]. Відомі також способи, що передбачають використання додаткових пристроїв для інтенсифікації процесів сегрегації компонентів в середині шару сипкого матеріалу [6, 7].

Проте, залишається відкритим питання відносно блокування отворів ППП компонентами сипкого матеріалу. Блокування отворів у випадках подібності розмірів компоненту сипкого матеріалу та отвору спричиняє зменшення кількості отворів та пропускну здатність ППП. В результаті маємо зниження продуктивності та якості сепарувального обладнання.

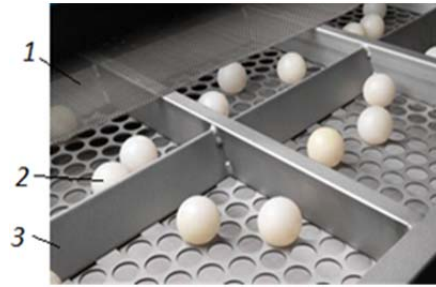
Для забезпечення своєчасного очищення отворів ППП використовують системи очищення з кульковими очисниками (рис.2). Кульки приводяться в рух за рахунок ударів по комірці бампера або відбивній решітці. Кількість кульок в комірці, матеріал, з якого вони виготовлені, геометричні параметри бампера, кінематичні параметри ППП та розміри отворів, питома завантаження та властивості компонентів сипкого матеріалу складають значущі фактори процесу. Через значну кількість факторів, які впливають на ефективність процесу розблокування отворів, виконати оптимізацію представляє труднощі. Крім того, слід урахувати зношення еластичних кульок, вплив зовнішнього середовища.



1 – вихідний сипкий матеріал; 2 – дрібний домішковий компонент; 3 – крупний домішковий компонент; 4, 5 – основний компонент; 6 – легкі домішки

Рисунок 1– Схема вібраційного сепаратора

Джерело: розроблено авторами



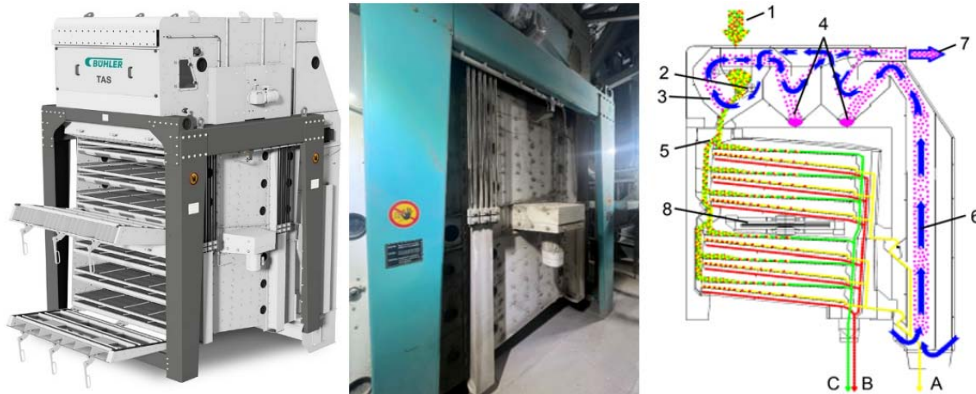
1 – ППП; 2 – очисник кульковий; 3 – бампер
Рисунок 2– Схема системи очищення отворів ППП

Джерело: розроблено авторами

Проведення попередніх досліджень та визначення діапазонів варіювання, фіксації параметрів процесу розблокування отворів дозволить провести подальше удосконалення конструкції.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення ефективності процесу очищення отворів шляхом визначення значущих факторів та діапазонів їх варіювання за рахунок проведення попередніх експериментальних досліджень.

Виклад основного матеріалу. Для досліджень обрано плоскорешетний сепаратор (рис.3), в якому для очищення використано кулькові очисники. Сепаратор працює в технологічній лінії з післязбиральної обробки зернових матеріалів на ТОВ «Ханзе Агрі» (сmt. Степанівка, Сумська обл.).



1 – патрубок завантажувальний; 2 – дозувальний клапан; 3 – канал пневмосепарувальний;
4 – шнеки розвантажувальні; 5 – решетний блок; 6 – канал вертикальний пневмосепарувальний;
7 – патрубок для відведення запиленого повітря; 8 – привід решетного блоку;
А, В, С – фракції сипкого матеріалу

Рисунок 3– Схема та загальний вигляд сепаратора Buhler LAAB TAS 206A-5

Джерело: розроблено авторами

Для досліджень обрано сипкі зернові матеріали: сої (сорти Еліна, Саїдіна, Озборн), кукурудзи (гібриди Піонер 9361, 8816, Сингента Орфеус, Хорінтос, Феноменон, KWS 2370), соняшнику (гібриди Піонер 136LE, KWS Белоба, Лімігреін 479, Сингента НК Неома).

Номинальна продуктивність сепаратора Buhler LAAB TAS 206A-5 коливається в залежності від типу сипкого матеріалу та його властивостей [8]. Проте використання

даного сепаратора за умови отримання необхідної якості (від замовника або відповідно до норм міжнародних стандартів) потребувало зниження продуктивності при обробці соняшнику 90 т/год (за умови дотримання 5% засміченості), при обробці кукурудзи – 170 т/год (8% засміченості), при обробці сої – 180 т/год (5%).

Аналіз досліджень процесів очищення отворів ППП [9–11] дозволив виділити наступний критерій оцінки ефективності – коефіцієнт забиваємості:

$$\delta = \Sigma nb / \Sigma nh, \quad (1)$$

де Σnb – кількість заблокованих (забитих) отворів ППП;

Σnh – загальна кількість отворів ППП.

В результаті контакту кульки з кромками отворів відбувається зношування кульки. Крім того, еластичні властивості кульки залежать від зовнішніх умов експлуатації. Встановлено, що для оцінки показників кулькового очисника краще використовувати наступні параметри:

а) коефіцієнт відновлення

$$K_r = h_a / h_{\max}, \quad (2)$$

де h_a – фактична висота відскоку кульки, м;

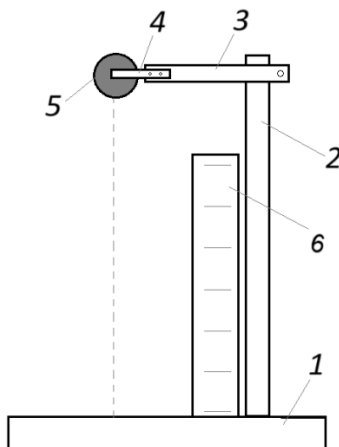
h_{\max} – початкова висота падіння кульки, приймаємо 1м;

б) швидкість зношення кульки

$$i = \Delta d / \Delta t, \quad (3)$$

де Δd – зміна діаметра кульки, мкм; Δt – час експлуатації кульки, годин.

Для визначення коефіцієнта відновлення використано наступний стенд (рис.4). Дослідні зразки кульок закріплювали на стійці (рис.4, поз.2) на заданій висоті ($h_{\max}=1$ м). Потім відпускали кульку з затиску (рис.4, поз.4) і фіксували, на яку відстань відбудеться максимальний відскок кульки. Фіксація висоти h_a відбувалася відносно мірної шкали (рис.4, поз.6).



1 – основа; 2 – стійка; 3 – платформа; 4 – захват; 5 – кулька; 6 – шкала

Рисунок 4 – Стенд для визначення коефіцієнта відновлення кулькових очисників

Джерело: розроблено авторами

Для визначення швидкості зношення кульки, а саме параметру Δd , використовували штангенциркуль цифровий 150мм INTERTOOL MT-3005.

Негативним явищем, що впливає на еластичні властивості гумових виробів є пил, який виділяється з зернового сипкого матеріалу в процесі транспортування, очищення або іншої обробки. Наявність пилу в зерні досягає до 0,3 % від загальної маси, а інтервал дисперсності коливається від 10^{-7} до 10^{-1} см [12, 13].

Поряд, з олійністю та вологістю, пи́л може викликати утворення твердого шару на поверхні кульки (рис.5). Подібний шар істотно знижує еластичність всього виробу, а подібна кульказменшує швидкість відскоку від бампера та кількість ударів по ППП.



Рисунок 5 – Загальний вигляд чистих (а) та забруднених (б) кулькових очисників
Джерело: розроблено авторами

Методика дослідження даного фактору передбачала періодичне вилучення з сепаратора Buhler LAAB TAS 206A-5 зразків (кульок) для аналізу. Періоди вилучення кульок передбачали чотири точки наробітку: 0 годин (нові кульки), 2750 годин, 5500 годин та 8250 годин роботи. Спершу проводили вимірювання діаметра забрудненої кульки з трьох сторін та округлювали дані. Далі, проводили очищення кульки та повторний замір діаметра. Різниця між діаметрами складала рівень забруднення, який визначався величиною Δdb (мкм).

Іншим змінним фактором при дослідженнях стала температура навколишнього середовища. Низька температура зменшує еластичні властивості кульок, що позначається на їх динаміці. Для досліджень прийнято штучне охолодження кульок в термічній камері до заданої температури. Після цього перевіряли показники коефіцієнта відновлення. Діапазон варіювання температури склав від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, з періодом у 10 градусів.

Іншим фактором впливу на ефективність очищення отворів стали конструктивні особливості бампера та кульок. Так, прямокутна форма комірки бампера складається з чотирьох стінок, поєднаних між собою під прямим кутом. З урахуванням діаметра кульки 35мм та прямого кута між стінками комірки маємо кутову зону ППП, яка не контактує з кулькою та не очищається (рис.6).

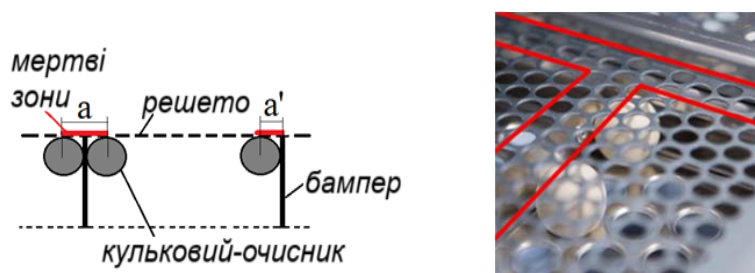


Рисунок 6 – Параметри неочищених (мертвих) зон на ППП
Джерело: розроблено авторами

Кількість подібних «мертвих» зон на ППП залежить від кількості прямих кутів. Для ідентифікації кількісно даного явища використано коефіцієнт забиваємості (формула (1)), який показує кількість очищених та заблокованих отворів в даний момент часу.

Інтенсивність зчеплення компоненту сипкого матеріалу з кромкою отвору визначає можливість швидкого розблокування подібного отвору. Це потребує

визначення умов розблокування та очищення отвору. Подібне визначення проведено в аналітично-експериментальному вигляді в [14, 15], що потребує остаточного аналізу.

Результати досліджень та їх обговорення. Використання запропонованої методики дозволило отримати відповідні залежності щодо зміни параметрів кульок в процесі експлуатації (табл.1, рис.7, 8).

Таблиця 1 – Зміни параметрів кулькових очисників в процесі експлуатації

Час експлуатації Lh , годин	Зміна діаметра Δdb , мкм	Товщина шару забруднення hd , мкм	Коефіцієнт відновлення Kr
0	–	0	0,85
2750	54	31	0,74
5500	100	60	0,58
8250	163	85	0,28

Джерело: розроблено авторами

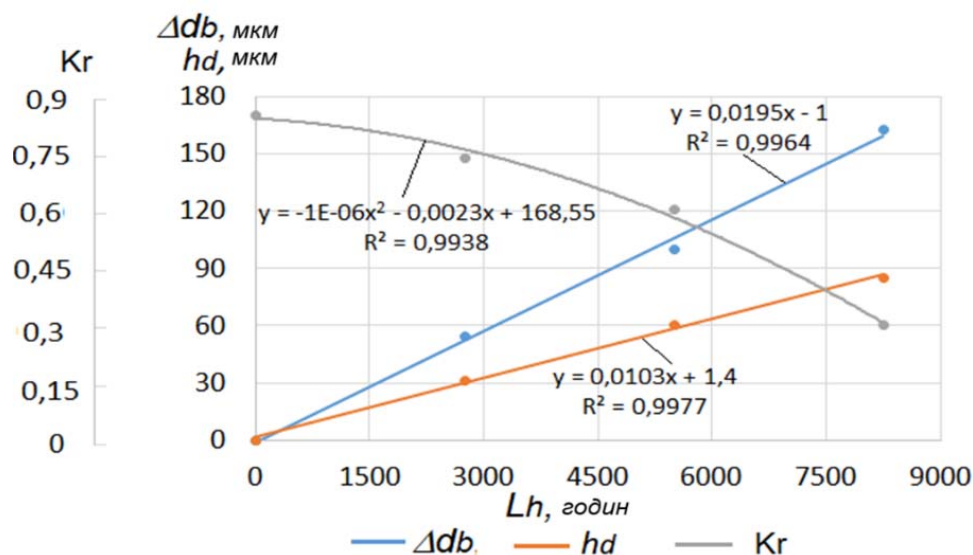


Рисунок 7 – Залежності коефіцієнта відновлення (Kr), зношення (Δdb) та товщини шару засмічення кулькових очисників від часу експлуатації

Джерело: розроблено авторами

Аналізом залежностей (рис.7) встановлено, що абразивний знос кульок та налипання пилу призводять до триразового зниження коефіцієнта відновлення за період експлуатації 8000 годин, що суттєво впливає на ефективність очищення ППП. Швидкість зносу кульок за заданих умов складає 0,018–0,02 мкм/год.

Зміна умов експлуатації, при якій спостерігається виділення пилу та наявність рідини (при очищенні олійних культур), здане викликати засмічення кульок та зниження їх еластичних властивостей порівнюючи з чистими (новими) кульками. Різниця між коефіцієнтами відновлення чистих та засмічених кульок не перевищує 5,5%.

Використавши методику, отримали залежності коефіцієнта відновлення кульки від температури навколишнього середовища (рис.9).

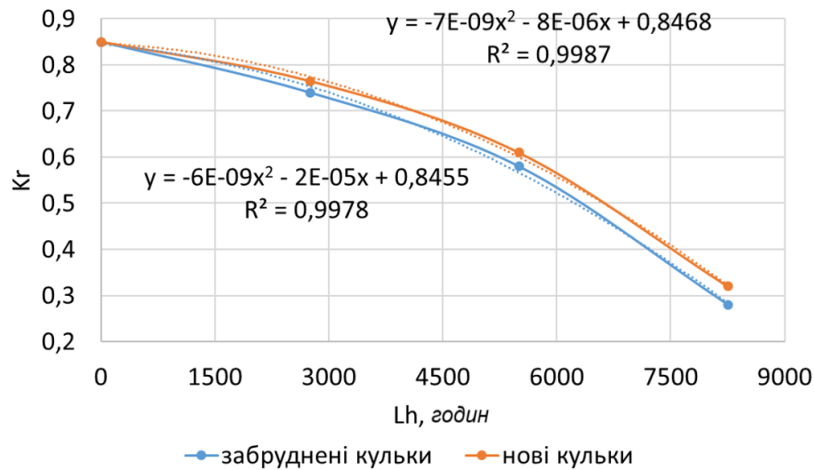


Рисунок 8 – Залежності коефіцієнта відновлення K_r за різних умов роботи та часу експлуатації L_h

Джерело: розроблено авторами

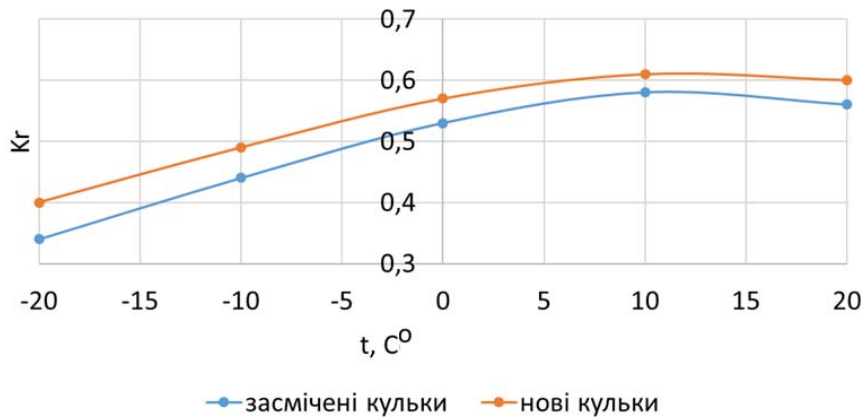


Рисунок 9 – Залежності коефіцієнта відновлення кульки K_r від температури навколишнього середовища T (при наробітку $L_h=5500$ годин)

Джерело: розроблено авторами

Аналіз залежностей (рис. 9) свідчить, що коефіцієнт відновлення кульки змінюється до 66% у діапазоні температури, що досліджувалась. Попри подібність тенденції зміни для чистих та засмічених кульок відмінність коефіцієнта відновлення склала 5–7,5%. Раціональний діапазон варіювання коефіцієнта відновлення знаходиться в інтервалі температури 5–20° C.

Під час досліджень на ППП виявлено неочищені (мертві) зони, які розташовано уздовж стінок комірок бампера. Для їх оцінки використано коефіцієнт забивання.



Рисунок 10 – Приклади наявності неочищених зон на ППП

Джерело: розроблено авторами

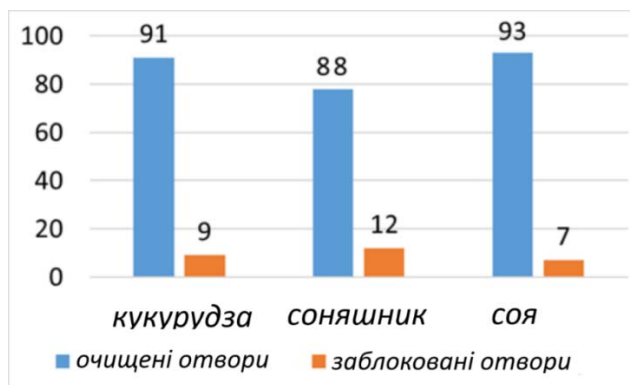


Рисунок 11 – Діаграма співвідношення очищених та заблокованих (мертвих) зон на ППП
Джерело: розроблено авторами

В залежності від сипкого матеріалу приймаються різні форми та розміри отворів, загальна кількість яких на ППП змінюється. Зважаючи на це, відсоток мертвих зон на ППП для заданих матеріалів становив 7–12%. Це означає, що ППП мало постійні показники коефіцієнта забивання 7–12%, які не виконували свого призначення та знижували пропускну здатність ППП, продуктивність та якість поділу сепарувального обладнання.

Проведені дослідження в [14], дозволили визначити умови розблокування отворів при кульковій системі очищення

$$F_w = \frac{m_b V_r^2}{2} \geq F_{ad} h_d, \quad (5)$$

де m_b – маса еластичної кульки;

V_r – відносна швидкість;

h_d – довжина шляху заклинювання.

В роботі [15] також наведено умову розблокування отвору за рахунок щіткової системи очищення

$$F_w = \frac{\frac{3}{2} \pi E_{br} d_{br}^4 T n_{br}}{64 l_{br}} \pi r^2 \geq (m_p g + F_{ad}), \quad (6)$$

де E_{br} , d_{br} , l_{br} , n_{br} – модуль пружності, діаметр, довжина та кількість активних щетинок очисника;

T , m_p – ширина, маса частинок компоненту сипкого матеріалу.

Проаналізувавши наведені рівняння очевидно, що значущою величиною є сила зчеплення, яка визначає розблокування отвору ППП та знаходиться за виразом [14] (рис.12)

$$F_{ad} = \frac{16 \pi \mu h_s k_e T}{L^2} \frac{E_p}{(1+\nu)(1-2\nu)} (z_2^2 - z_1^2), \quad (7)$$

де E_p і ν – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона компоненту сипкого матеріалу;

μ – коефіцієнт тертя компоненту об кромку отвору;

h_s – товщина поверхні (кромки);

T та L – осі еліпсоїду обертання компоненту сипкого матеріалу (рис.12);

z_1 , z_2 – координати розташування центра еліпсоїда компоненту відносно верхньої (робочої) поверхні отвору;

k_e – коефіцієнт, що враховує зміну площі контакту компоненту та кромки отвору.

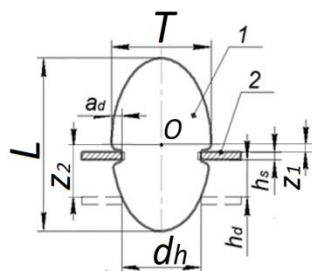


Рисунок 12 – Схема заблокованого отвору ППП

Джерело: розроблено авторами

Ураховуючи результати проведених попередніх досліджень, вдалося встановити недоліки існуючих систем очищення з еластичними очисниками, які призводять до зниження ефективності розблокування отворів ППП та їх надійності:

- невідповідність кінематичних параметрів по відношенню до ефективного просіювання через отвори сипких матеріалів та відносно їх розблокування;
- додаткові вимушені коливання ППП внаслідок впливу очисників, що впливає на надійність та просіювання компонентів сипких матеріалів;
- наявність неочищених (мертвих) зон на ППП (до 12%);
- зношування та забруднення кулькових очисників;
- вплив температури навколишнього середовища на еластичні властивості кулькових очисників та їх динаміку;
- пошкодження компонентів сипкого матеріалу;
- забруднення частинками зносу кінцевих проєктів обробки сипкого матеріалу.

За даними недоліками вдалося ідентифікувати фактори, які є значущими та підлягають детальному дослідженню:

- параметри та властивості матеріалів кулькових очисників;
- конструктивні та кінематичні параметри ППП;
- параметри відбиваючого пристрою (бампера);
- температура навколишнього середовища;
- параметри та властивості компоненту сипкого матеріалу.

Критеріями ефективності роботи системи очищення отворів ППП може бути:

- ефективність розблокування отворів або продуктивність/якість просіювання компонентів сипкого матеріалу на ППП;
- надійність кулькових очисників;
- фізико-хімічне забруднення кінцевих продуктів.

Важливим теоретичним рішенням повинно бути аналітичне визначення сили розклинювання компоненту сипкого матеріалу, що ураховує їх властивості та параметри кульки, ППП.

Висновки. Проведеними дослідженнями встановлено недоліки існуючих систем очищення отворів з еластичними кульками, які знижують ефективність процесів сепарування сипких матеріалів.

Визначені головні критерії та фактори ефективності процесу розблокування отворів за умови даних попередніх експериментальних та аналітичних досліджень.

Проведені дослідження дозволили встановити вплив забрудненості поверхні кульок та температури на їх еластичні показники, вплив мертвих зон та ефективність очищення отворів, вплив величини сили зчеплення компоненту з кромками отвору.

Отримані дані дозволяють зменшити кількість варіативних факторів та спростити розрахунки щодо оптимізації параметрів системи очищення отворів ППП.

Список літератури

1. Котов Б.І., Степаненко С.П., Пастушенко М.Г. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерно матеріалів . *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2003. Вип. 33. Кіровоград. С. 104–114.
2. Заїка П. М. Теорія сільськогосподарських машин. Очистка і сортування зерна: монографія. Харків : Око, 2006. 408 с.
3. Черевко О. І., Поперечний А. М. Процеси і апарати харчових виробництв: підручник : 2-е видання, доп. та випр. Харків : Світ Книг, 2014. 95 с.
4. Kharchenko S, Kovalyshyn S, Zavgorodniy A, Kharchenko F, Mikhaylov Y. Effective sifting of flat seeds through sieve. *INMATEH-Agricultural Engineering*. 2019; 58 (2): 17–26. DOI: 10.35633/INMATEH-58-02.
5. Kharchenko S. Intensification of grain sifting on flat sieves of vibration grain separators: monograph. Kharkiv : Dissa Plus, 2017. 217 p.
6. Тищенко Л. Н., Ольшанский В. П., Ольшанский С. В. Виброрешетная сепарация зерновых смесей : монография. Харьков : Миськдрук, 2011. 280 с.
7. Півень М.В. Ефективність сепарування зернових сумішей вібровідцентровими решетами з розпушувачами. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія : Механізація та автоматизація виробничих процесів*. 2017. Вип. 10. С.92–98.
8. Документація. Універсальний аспіратор (TAS): TAS152A-2, TAS153A-1, TAS152A-2S, TAS154A-4 TAS154A-4S, TAS204A-4 TAS204A-4S, TAS206A-6. TAS206A-6S – Bühler GmbH, Німеччина, 79 с.
9. Factors of technological efficiency and reliability of elastic cleaners of vibrating sieves / S. Kharchenko, S. Samborski, F. Kharchenko: WECM'23, Pisa, September 20–22, 2023. P.23.
10. Ławińska K. Proces blokowania otworów sitowych przesiewaczy stosowanych w przeróbce mechanicznej kopaliny użytecznych. *Remigiusz Modrzewski Technologia i Jakość Wyrobów*. 2015, 60. P.68–75.
11. Ławińska K, Remigiusz M, Piotr W. Mathematical and empirical description of screen blocking. *Granular Matter*. 2016, 18: 13. DOI: 10.1007/s10035-016-0622-4.
12. Харченко С.О. Обґрунтування параметрів процесу очищення повітряного потоку пилюсаджуальною камерою вібровідцентрових зернових сепараторів : дис. ... канд. техн. наук 05.05.11. Харків : ХНТУСГ, 2007. 230 с.
13. Донин Л.С. Довідник по вентиляції в харчовій промисловості. Київ : Харчова промисловість, 1997. 352 с.
14. Kharchenko S, Samborski S, Kharchenko F, Kotliarevskiy I. Determination of Hole Blocking Conditions for Perforated Sifting Surfaces. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2024; 18(5): 342–360. DOI: 10.12913/22998624/190483.
15. Tkachyov V.V. Condition for cleaning the sieve meshes of the seed cleaning machine. *Collection of the Krasnodar State University*. 2011. №5. P.28–131

References

1. Kotov, B.I., Stepanenko, S.P. & Pastushenko, M.H. (2003). Development trends in the design of machines and equipment for cleaning and sorting grain materials. *Design, production and exploitation of agricultural machinery*, Vol. 33, 104–114. [in Ukrainian].
2. Zaika, P.M. (2006). Teoriia silskohospodarskykh mashyn. Ochystka i sortuvannia zerna: monohrafiia. Kharkiv: Oco [in Ukrainian].
3. Cherevko, O.I. & Poperechnyi A.M. (2014). Protsesy i aparaty kharchovykh vyrobnytstv: 2-e vydannia, dop. ta vypr. Kharkiv : Svit Knyh [in Ukrainian].
4. Kharchenko S, Kovalyshyn S, Zavgorodniy A, Kharchenko F & Mikhaylov Y. (2019). Effective sifting of flat seeds through sieve. *INMATEH-Agricultural Engineering*, 58 (2), 17–26. DOI: 10.35633/INMATEH-58-02. [in English].
5. Kharchenko S. (2017). Intensification of grain sifting on flat sieves of vibration grain separators: monograph. Kharkiv : Dissa Plus [in English].
6. Tishchenko, L.M., Olshanskiy V.P. & Olshanskiy S.V. (2011). Vibroreshetna separatsiia zernovykh sumishei: monohrafiia. Kharkiv : Miskdruk [in Ukrainian].
7. Piven, M.V. (2017) Efektyvnist separuvannia zernovykh sumishei vibrovidtsentrovymy reshetamy z rozpushuvachamy. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Seriia: Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychkykh protsesiv*, Vol. 10, 92–98. [in Ukrainian].

8. Documentation. Universal aspirator (TAS): TAS152A-2, TAS153A-1, TAS152A-2S, TAS154A-4 TAS154A-4S, TAS204A-4 TAS204A-4S, TAS206A-6. TAS206A-6S. Bühler GmbH, Gemany [in Ukrainian].
9. Kharchenko, S., Samborski, S. & Kharchenko, F. (2023). Factors of technological efficiency and reliability of elastic cleaners of vibrating sieves: *WECM'23, Pisa, September 20–22*, 23. [in English].
10. Ławińska, K. (2015). Proces blokowania otworów sitowych przesiewaczy stosowanych w przeróbce mechanicznej kopalin użytecznych. *Remigiusz Modrzewsk Technologia i Jakość Wytrobów*, 60, 68–75. [in Poland].
11. Ławińska, K., Remigiusz, M. & Piotr, W. (2016). Mathematical and empirical description of screen blocking. *Granular Matter*, 18, 13. DOI: 10.1007/s10035-016-0622-4. [in English].
12. Kharchenko, S.O. (2007). Obhruntuvannya parametriv protsesu ochyshchennia povitrianoho potoku pyleosadzhuvalnoiu kameroiu vibrovidtstentroykhn zernovykh separatoriv: Doctor's thesis. Kharkiv, KHNTUA [in Ukrainian].
13. Dony, L.S. (1997). Dovidnyk po ventyliatsii v kharchovii promyslovosti. Kyiv: Kharchova promyslovist [in Ukrainian].
14. Kharchenko, S., Samborski, S., Kharchenko, F. & Kotliarevskyi, I. (2024). Determination of Hole Blocking Conditions for Perforated Sifting Surfaces. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 18(5), 342–360. DOI: 10.12913/22998624/190483. [in English].
15. Tkachyov, V.V. (2011). Condition for cleaning the sieve meshes of the seed cleaning machine. *Collection of the Krasnodar State University*, №5, 28–131. [in English].

Serhii Kharchenko, Prof., DSc., **Oleksandra Bilovod**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Farida Kharchenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ihor Kotliarevskyi**, post-graduate

Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Volodymyr Yarovi, post-graduate

Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Causes of Blocking the Holes of Perforated Screening Surfaces of vibrating Separators

Separation of loose materials is a popular technological process used in various industries to divide components by size.

The use of vibrated perforated sifting surfaces on the basis of separating machines is realized with vibration and, despite significant efficiency, there is unrealized potential. The presence of a number of sub-processes makes it difficult to optimize them and requires consideration of each: loading, segregation, screening, mechanical oscillations of the surface, cleaning of holes, etc. The efficiency of separation equipment directly depends on the timely and maximum unblocking of the holes on the screening surfaces. One of the most common hole cleaning systems is ball cleaners together with a bumper or reflective grating. The main objective of the research was to experimentally analyze the potential of this cleaning system. In particular, the search for rational parameters of the cleaning system, which will maximize the efficiency of unblocking the holes under the condition of a significant number of variable factors.

Based on the identified shortcomings, it was possible to identify the following factors that are significant: parameters and properties of ball cleaner materials; structural and kinematic parameters of the sieving surface; parameters of the reflecting device; environmental temperature; parameters and properties of the loose material component. Based on the results of the analysis, the criteria for the effectiveness of the hole cleaning system were determined: the effectiveness of unblocking the holes or the productivity/quality of sifting components.

ball cleaners, perforated sieving surfaces, separation process, loose materials, blockedholes

Одержано (Received) 26.09.2024

Прорецензовано (Reviewed) 26.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

УДК 621.9.048.7:621.373.826:631.3:629.08

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.136-141>

Ю.О. Ковальчук, доц., канд. техн. наук, **І.О. Лісовий**, доц., канд. техн. наук
Уманський національний університет садівництва, м. Умань, Україна
e-mail: temp14053@gmail.com

Лазерне зміцнення деталей автомобільного транспорту в АПК

Наведено результати лазерного впливу на мікротвердість зон ковкого чавуну КЧ60-3 при лазерному зміцненні розфокусованим променем та променем з поперечними коливаннями. Виявлено, що максимальні значення мікротвердості 12100 МПа отримані в зоні оплавлення при обробці з поперечними коливаннями променя. Представлено результати визначення коефіцієнтів тертя в залежності від швидкості ковзання пар тертя 40Х-СЧ20. Визначено залежність інтенсивності зношування пар тертя 40Х-СЧ20 від щільності потоку лазерної енергії під час обробки досліджуваних зразків.

лазерне зміцнення, гартування, мікротвердість, інтенсивність зношування, деталі автомобільного транспорту в АПК

Постановка проблеми. Для підвищення зносостійкості різних деталей автомобільного транспорту в галузі сільського господарства є актуальним використання можливостей методу лазерної обробки.

Для ефективного застосування даного методу необхідно дослідити особливості лазерного впливу на поверхню оброблюваних зразків, визначити залежність отриманих ними характеристик від параметрів процесу лазерного зміцнення.

Відомо, що в результаті зміцнення лазером різних деталей автомобілів важливим фактором впливу на їх ресурс виробітку є мікротвердість та характеристики у парах тертя, які залежать від параметрів поверхневої лазерної обробки.

Вдалих підбір параметрів процесу лазерного зміцнення може забезпечити значне підвищення експлуатаційних характеристик оброблюваних деталей автомобільного транспорту в АПК.

Тому актуальним є дослідження впливу лазерної обробки на такі параметри оброблюваних зразків, як мікротвердість їх поверхневих зон та характеристики у парах тертя.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Із аналізу публікацій останніх років можна зробити висновок, що багато науковців та вчених приділяють свою увагу задачам, пов'язаним з визначенням властивостей залізвуглецевих сплавів, що піддаються лазерній обробці. Наприклад, дослідженням цього питання займалися науковці Токарев А., Афанасьєва О.В., Лалазарова Н.О., Федоренко Є.П. та інші, які аналізували вплив лазерного потоку на поверхню залізвуглецевих зразків для різних матеріалів та у різних випадках [1–3].

Також впливом лазерної обробки на експлуатаційні характеристики різних деталей машин в останні роки займалися Добрас Д., Лесик Д.А., Грушка М., Сідун К.Ю., Аулін В.В., Завойко О.С. та інші [4–12].

Не до кінця вирішеним залишається питання більш детального та глибокого дослідження впливу лазерного випромінювання на мікроструктуру поверхневих шарів

та на відповідні характеристики у парах тертя різних деталей автомобільного транспорту в АПК з метою підвищення їх зносостійкості.

Постановка завдання. Метою роботи є визначення впливу лазерної обробки на мікротвердість зон ковкого чавуну КЧ60-3 при його зміцненні розфокусованим лазерним променем та променем з поперечними коливаннями. Також необхідно встановити залежність коефіцієнтів тертя від швидкості ковзання пар тертя 40Х-СЧ20 та визначити для цих пар тертя залежність інтенсивності зношування від щільності потоку лазерної енергії під час обробки досліджуваних зразків.

Виклад основного матеріалу. Проаналізуємо вплив лазерної обробки на поверхню чавунів, що використовуються для виробництва різноманітних деталей сільськогосподарських машин.

Для лазерного зміцнення використовували зразки сірого СЧ20 та ковкого КЧ60-3 чавунів з розмірами $15 \times 20 \times 70$ мм. Обробку зразків проводили за допомогою неперервного випромінювання CO_2 -лазера з довжиною хвилі 10,6 мкм на базі лазерної установки «Комета-2». При визначенні параметрів зміцнених зон щільність потоку лазерної енергії змінювалась в межах $20\text{--}60$ Дж/мм² (СЧ20) та $24\text{--}120$ Дж/мм² (КЧ60-3), швидкість переміщення променя $7\text{--}10$ мм/с та $2\text{--}9$ мм/с відповідно, використовувався діаметр плями променя $3,5\text{--}5,5$ мм. Лазерне зміцнення проводили розфокусованим променем та з поперечними коливаннями променя з частотою 216 Гц. Для дослідження твердості поверхні використовувався мікротвердомір ПМТ-3.

Випробування на тертя і знос проводили за схемою: широка сторона чавунного зразка СЧ20 – торець втулки, що обертається, сталь 40Х (49–53 НRC). Швидкість ковзання змінювали поступово в межах $0,25\text{--}3,5$ м/с при навантаженні 2 МПа. У зону тертя подавали індустриальне масло І-20 крапельним способом.

Лазерне гартування ковкого чавуну КЧ60-3 розфокусованим променем при швидкості сканування менше 7 мм/с призводило до дефектів типу раковин та напливів на поверхні зразків. Поперечні коливання променя дозволяли виключити подібні дефекти та варіювати глибину зон зміцнення з рідкого стану в межах $10\text{--}800$ мкм. Максимальна глибина та ширина зон гартування чавуну КЧ60-3 склали 1,8 мм та 11,7 мм відповідно. Залежність мікротвердості зон цього чавуну за глибиною при лазерному зміцненні розфокусованим променем представлена на рис. 1, а при зміцненні променем з поперечними коливаннями – на рис 2.

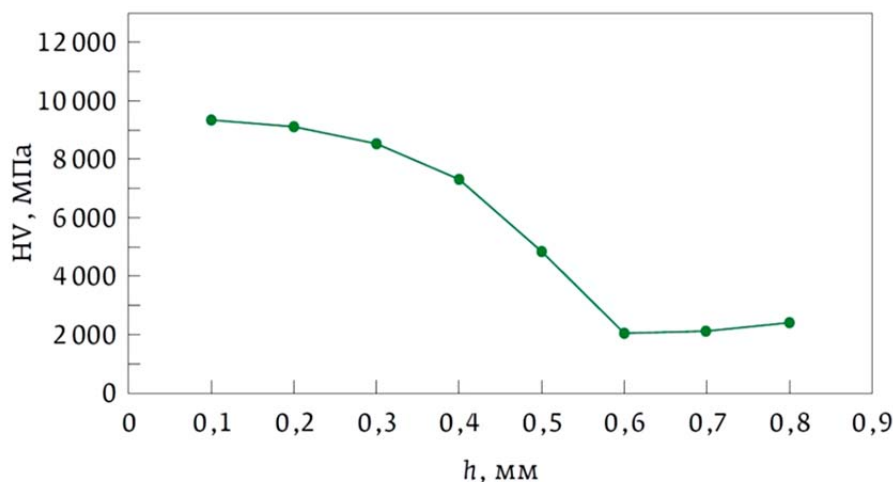


Рисунок 1 – Мікротвердість за глибиною зміцненого лазером зразка із чавуну КЧ60-3 з використанням розфокусованого променя

Джерело: розроблено авторами

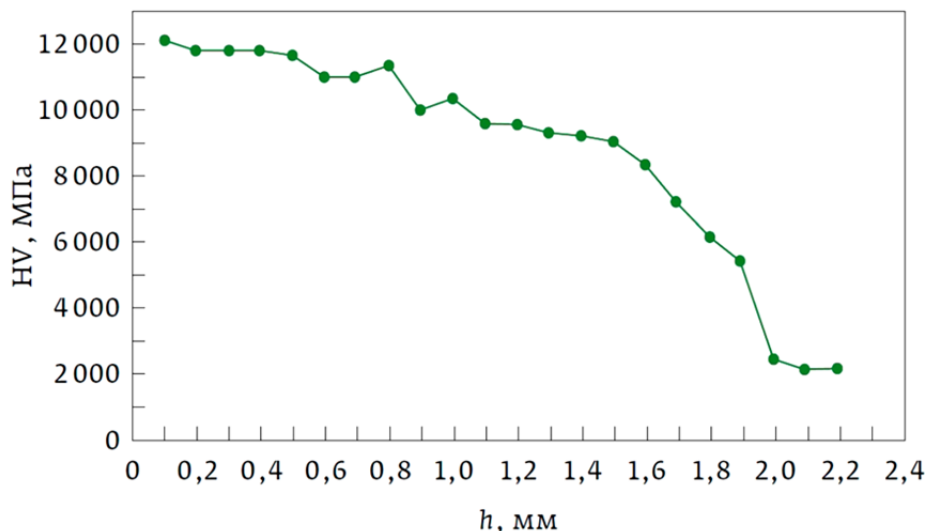
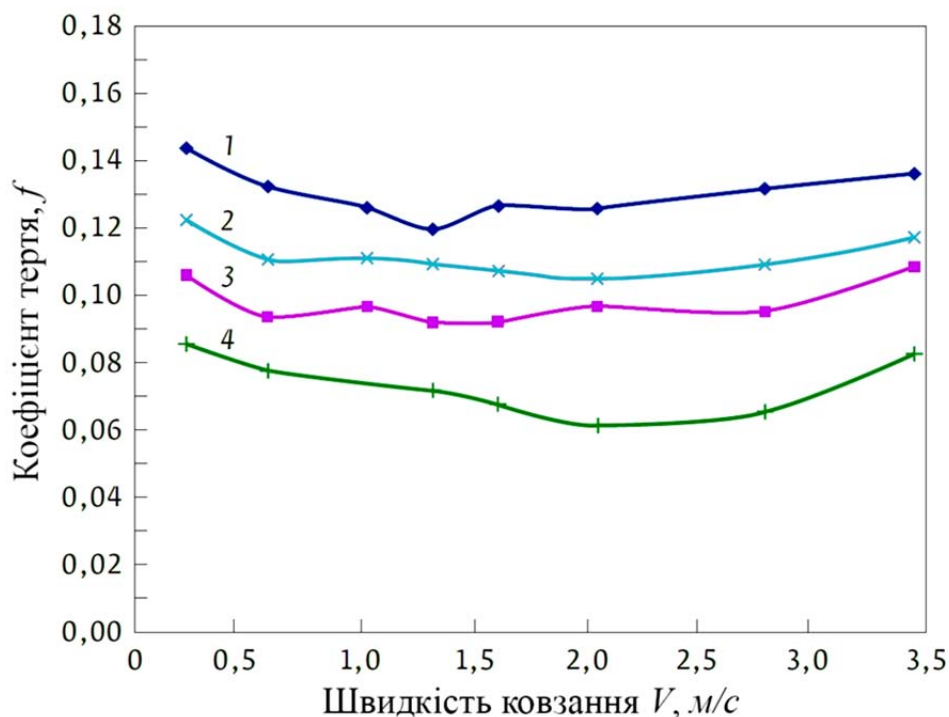


Рисунок 2 – Мікротвердість за глибиною зміцненого лазером зразка із чавуну КЧ60-3 з використанням променя з поперечними коливаннями

Джерело: розроблено авторами

Максимальні значення мікротвердості 12100 МПа отримані в зоні оплавлення при обробці з поперечними коливаннями променя. Мікроструктура зони оплавлення є аустенітно-мартенситною сумішшю.

Результати визначення коефіцієнтів тертя ковзання в залежності від швидкості пар тертя 40Х-СЧ20 при зміцненні чавуну СЧ20 лазерними потоками різної щільності з поперечними коливаннями променя представлені на рис 3.



1 – без зміцнення, 2 – 25 Дж/мм², 3 – 32 Дж/мм², 4 – 46 Дж/мм²

Рисунок 3 – Залежність коефіцієнтів тертя ковзання від швидкості пар тертя 40Х-СЧ20 при зміцненні чавуну СЧ20 лазерними потоками різної щільності

Джерело: розроблено авторами

Для всіх зразків до швидкості ковзання 1,5 м/с спостерігалось зниження коефіцієнтів тертя. Максимальні коефіцієнти тертя 0,13–0,145 отримані для матеріалу основи СЧ20 з твердістю 180–210 НВ. Мінімальні значення коефіцієнтів тертя 0,07–0,09 отримані на зразках, оброблених при щільності енергії лазерного потоку 46 Дж/мм².

На рис. 4 представлено залежність інтенсивності зношування пар тертя 40Х-СЧ20 від зміцнення чавуну СЧ20 лазерними потоками різної щільності з поперечними коливаннями променя.

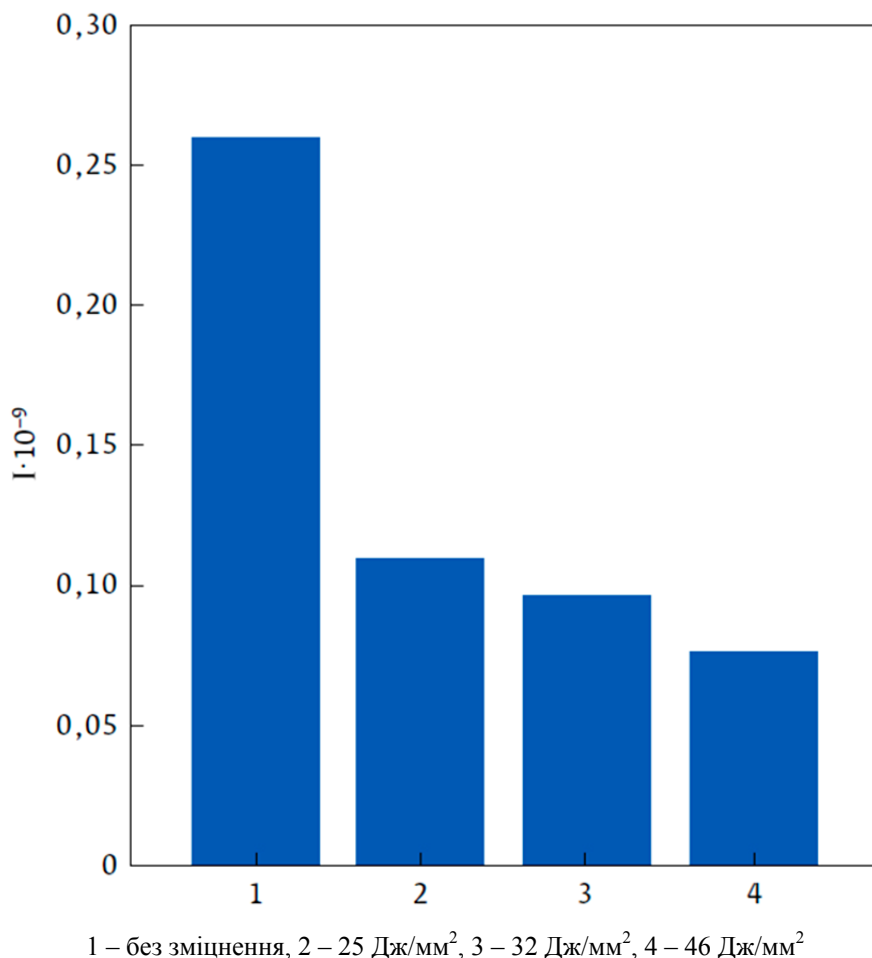


Рисунок 4 – Залежність інтенсивності зношування пар тертя 40Х-СЧ20 від зміцнення чавуну СЧ20 лазерними потоками різної щільності

Джерело: розроблено авторами

З підвищенням щільності потоку лазерної енергії зносостійкість зразків значно зростала в 2,5–3,5 рази в порівнянні з незміцненим зразком.

Висновки. Отримані результати показали, що при лазерній обробці чавунів мікротвердість зміцнених шарів значно збільшується в порівнянні з матеріалом основи. Розроблена технологія лазерного зміцнення з використанням поперечних коливань променя має більшу продуктивність, ніж при загартуванні розфокусованим променем.

Лазерне зміцнення сірого чавуну СЧ20 та ковкого чавуну КЧ60-3 із застосуванням поперечних коливань лазерного променя дозволило підвищити продуктивність обробки у 1,5–2,0 рази. При використанні індустріального масла І-20 підвищення щільності енергії при лазерному зміцненні чавуну СЧ20 призводить до підвищення його зносостійкості у 2,5–3,5 рази та знижує втрати на тертя у парі зі сталлю 40Х на 30–60%.

Список літератури

1. Афанасьєва О.В., Лалазарова Н.О., Федоренко Є.П. Лазерна поверхнева обробка матеріалів : монографія. Харків : ФОП Панов А.М., 2020. 100 с.
2. Zhang X., Zhang Y., Yin Y., Zhang Y., Li S., Duan S., Huang Z., Chen B., Pei S., Wang H. Simulation of the forming process of conical cup shaped by laser-induced shock waves. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 91. P. 1619–1630. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9633-x>
3. Laser-plasma treatment of structural steel / A. Tokarev et al. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 788. P. 58–62.
4. Аулін В.В., Лисенко С.В., Жилова І.В., Вербицький О.В. Рафінуючо-легувальні дії на поверхневий шар матеріалу деталей систем і агрегатів транспортних засобів лазерного потоку енергії. *Підвищення надійності машин і обладнання : матеріали міжнар. наук.-практ. конф.*, 15-17 квіт. 2020 р. Кропивницький : ЦНТУ, 2020. С. 91.
5. Ковальчук Ю.О., Пушка О.С., Войтік А.В. Застосування легуючих матеріалів та поглинаючих покриттів при лазерному зміцненні деталей автомобільного транспорту. *Сільськогосподарські машини*. 2023. Вип. 49. С. 99–104. DOI: <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1026>
6. Лесик Д.А., Грушка М., Сідун К.Ю., Данилейко О.О., Кифоренко Д.С., Джемелінський В.В. Селективне поверхнєве зміцнення валу механізму передач роботизованою лазерною 3D системою. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях*. 2022. № 3 (13). 24–29. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2022.03.04>
7. Rutkowski, D., Ambroziak, A. Effect of laser strengthening on the mechanical properties of car body steels presently used in automotive industry. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*. 2014. № 5, 49–57.
8. Ковальчук Ю.О., Кравченко В.В., Оляднічук Р.В. Лазерна обробка деталей сільськогосподарської техніки з чавуну. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. 2017. Вип. 5. С. 92–99.
9. Завойко О.С. Дослідження лазерного зміцнення колінчатих валів та механіко-термічної обробки при руйнуванні на втому та знос. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2014. Т. 15. № 4. С. 846–855.
10. Dobras D., Rutkowska-Gorczyca M. The use of color etching to study the microstructure of laser welded steel used in the automotive industry. *Materials Testing*. 2019. Vol. 61(11). P. 1087–1094. DOI: <https://doi.org/10.3139/120.111424>
11. Ковальчук Ю.О., Пушка О.С., Войтік А.В., Ковальчук А.О. Підвищення зносостійкості деталей автомобільного транспорту в АПК шляхом застосування лазерного наплавлення. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 1 (116). С. 25–31.
12. Xu L., Li M., Song Z., Li F., Guo J., Gao M. WC-High Entropy Alloy Reinforced Long Life Self-Grinding Silage Knife Prepared by Laser Cladding. *Nanomaterials*. 2022. Vol. 12(6). 1013. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano12061013>

References

1. Afanasyeva, O.V., Lalazarova, N.O. & Fedorenko, YE.P. (2020). Lazerna poverkhneva obrobka materialiv: monohrafiya [Laser surface treatment of materials: monograph]. Kharkiv : FOP Panov A.M. [in Ukrainian].
2. Zhang, X., Zhang, Y., Yin, Y., Zhang, Y., Li, S., Duan, S., Huang, Z., Chen, B., Pei, S. & Wang H. (2017). Simulation of the forming process of conical cup shaped by laser-induced shock waves. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91, 1619–1630. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9633-x> [in English].
3. Tokarev, A., Bataeva, Z., Grachev, G., Smirnov, A., Khomyakov, M. & Gerber, A. (2015). Laser-plasma treatment of structural steel. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 788, 58–62 [in English].
4. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Zhylova, I.V. & Verbytskyy, O.V. Rafinuyucho-lehuvalni diy na poverkhnevyy shar materialu detaley system i ahrehativ transportnykh zasobiv lazernoho potoku enerhiyi [Refining and alloying effects on the surface layer of the material of parts of systems and units of vehicles of laser energy flow]. Proceedings from Increasing the reliability of machines and equipment '20: mizhnar. nauk.-prakt. konf. (15-17 kvit. 2020 r.) – Int. Sci. And Pract. Conf. (p. 91). Kropyvnytskyi : TSNTU [in Ukrainian].
5. Kovalchuk, Yu.O., Pushka, O.S. & Voytik, A.V. (2023). Zastosuvannya lehuuyuchykh materialiv ta pohlynayuchykh pokryttiv pry lazernomu zmitsnenni detaley avtomobilnoho transportu [Application of alloying materials and absorbing coatings during laser strengthening of automobile parts]. *Silskohospodarski mashyny – Agricultural machinery, issue 49*, 99–104. DOI: <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1026> [in Ukrainian].

6. Lesyk, D.A., Hrushka, M., Sidun, K.YU., Danyleyko, O.O., Kyforenko, D.S. & Dzhemelinsky, V.V. (2022). Selektivne poverkhneve zmitsnennya valu mekhanizmu peredach robotyzovanoju lazernoyu 3D systemoyu [Selective surface strengthening of the gear mechanism shaft by a robotic laser 3D system]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Novi rishennya u suchasnykh tekhnolohiyakh – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: New solutions in modern technologies*, 3 (13), 24–29. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2022.03.04> [in Ukrainian].
7. Rutkowski, D. & Ambroziak, A. (2014). Effect of laser strengthening on the mechanical properties of car body steels presently used in automotive industry. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 5, 49–57 [in English].
8. Kovalchuk, Yu.O., Kravchenko, V.V. & Olyadnichuk, R.V. (2017). Lazerna obrobka detaley silskohospodarskoyi tekhniki z chavunu [Laser processing of parts of agricultural machinery from cast iron]. *Visnyk Ukrayinskoho viddilennya Mizhnarodnoyi akademiyi ahrarnoyi osvity – Bulletin of the Ukrainian branch of the International Academy of Agrarian Education*, issue 5, 92–99 [in Ukrainian].
9. Zavoiko, O.S. (2014). Doslidzhennia lazernoho zmitsnennia kolinchatykh valiv ta mekhaniko-termichnoi obrobky pry ruinuванні na vtomu ta znos [Investigation of laser hardening of crankshafts and mechanical-thermal treatment in case of fatigue and wear destruction]. *Fizyka i khimiia tverdoho tila – Physics and Chemistry of the Solid State*, Vol. 15, 4, 846–855 [in Ukrainian].
10. Dobras, D. & Rutkowska-Gorczyca, M. (2019). The use of color etching to study the micro-structure of laser welded steel used in the automotive industry. *Materials Testing*, 61 (11), 1087–1094. DOI: <https://doi.org/10.3139/120.111424> [in English].
11. Kovalchuk, Yu.O., Pushka, O.S., Voytik, A.V. & Kovalchuk, A.O. (2022). Pidvyshchennya znosostyikosti detaley avtomobilnoho transportu v APK shlyakhom zastosuvannya lazernoho naplavlennya [Increasing the wear resistance of motor vehicle parts in the agricultural sector by using laser surfacing]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK – Technology, energy, transport of agricultural industry*, 1 (116), 25–31 [in Ukrainian].
12. Xu, L., Li, M., Song, Z., Li, F., Guo, J. & Gao, M. (2022). WC-High Entropy Alloy Reinforced Long Life Self-Grinding Silage Knife Prepared by Laser Cladding. *Nanomaterials*, 12(6), 1013. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano12061013> [in English].

Yuriy Kovalchuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., Ivan Lisoviy, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine

Laser Strengthening of Automobile Transport Parts in the Agro-industrial Complex

The purpose of the work is to determine the effect of laser processing on the microhardness of the zones of ductile cast iron KCh60-3 when it is strengthened by a defocused laser beam and a beam with transverse oscillations. It is also necessary to establish the dependence of friction coefficients on the sliding speed of friction pairs 40H-SCh20 and to determine for these friction pairs the dependence of the intensity of wear on the density of the laser energy flow during the processing of the studied samples.

Laser hardening of ductile cast iron KCh60-3 with a defocused beam at a scanning speed of less than 7 mm/s led to shell-type defects and inflows on the surface of the samples. Transverse oscillations of the beam made it possible to exclude similar defects and vary the depth of the solidification zones from the liquid state in the range of 10–800 μm. The maximum depth and width of the hardening zones of cast iron KCh60-3 were 1.8 mm and 11.7 mm respectively. The maximum microhardness values of 12100 MPa were obtained in the remelting zone during processing with transverse beam oscillations. The microstructure of the melting zone is an austenitic-martensitic mixture. A decrease in friction coefficients was observed for all samples up to a sliding speed of 1.5 m/s. The maximum friction coefficients of 0.13–0.145 were obtained for the base material SCh20 with a hardness of 180–210 HB. The minimum values of friction coefficients of 0.07–0.09 were obtained on samples processed at a laser flux energy density of 46 J/mm².

The obtained results showed that during laser processing of cast iron the microhardness of the hardened layers significantly increases compared to the base material. The developed technology of laser hardening with the use of transverse oscillations of the beam has a higher productivity than when hardening with a defocused beam. Laser hardening of gray cast iron SCh20 and malleable cast iron KCh60-3 using transverse oscillations of the laser beam made it possible to increase processing productivity by 1.5–2.0 times. When using I-20 industrial oil, the increase in energy density during laser hardening of SCh20 cast iron leads to an increase in its wear resistance by 2.5–3.5 times and reduces frictional losses in a pair with 40H steel by 30–60%.

laser hardening, tempering, microhardness, wear intensity, road transport details in the agro-industrial complex

Одержано (Received) 30.10.2024

Прорецензовано (Reviewed) 26.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

УДК 631.313.022.2

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.142-152>

О. В. Козаченко, проф., д-р техн. наук, **О.М. Волковський**, асп., **С.О. Дьяконов**, канд. техн.наук

Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна

e-mail: o.v.kozachenko21@gmail.com

Методика чисельного моделювання напружено-деформованого стану пружного стояка з регулятором жорсткості

Наведено фізико-математичний апарат оцінки пікової реакції системи в стаціонарному стані на гармонійні навантаження для проведення чисельного моделювання напружено-деформованого стану пружного стояка дискатора з регулятором жорсткості в програмному пакеті SOLIDWORKS Simulation, що дозволяє на стадії проектування дискових робочих органів на пружних стояках робити висновок про можливість виконання ними заданих технологічних задач.

дискатор, ґрунт, пружний стояк, регулятор жорсткості, напруженість

Постановка проблеми. Забезпечення заданої якості поверхневого обробітку ґрунту у сучасних технологіях вирощування сільськогосподарських культур передбачає широке застосування засобів механізації з дисковими робочими органами із застосуванням пружних стояків кріплення до рами зняряддя [1, 2, 3]. Такий технічний підхід зумовлює, у порівнянні з жорсткими стояками, утворення коливного руху робочих органів внаслідок нерівномірності опору ґрунтового середовища, кращої пристосованості до рельєфу поля, зменшення енергетичних витрат, підвищення ефективності технологічного процесу [4]. При цьому, як показує практика, застосування ґрунтообробних знярядь з дисковими робочими органами на пружних стояках [5, 6, 7], досягнення позитивного ефекту є можливим в певних умовах ґрунту, швидкісного режиму та глибини обробітку, але завдання забезпечення якісних показників та енергоємності технологічного процесу на сьогодні вивчені недостатньо. Тому дослідження, спрямовані на вдосконалення якісних та енергетичних характеристик технологічних процесів поверхневого обробітку ґрунту застосуванням дискових робочих органів на пружних стояках, слід вважати актуальними.

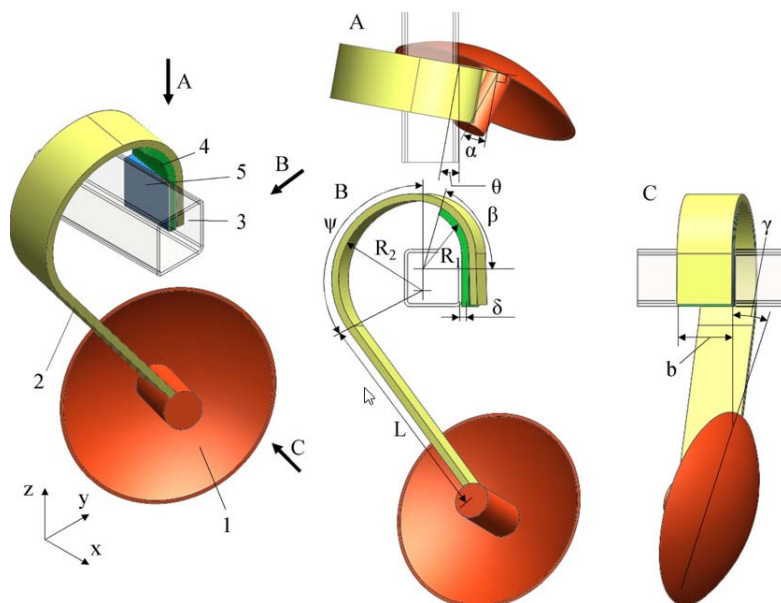
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі наукові дослідження у напрямку вивчення процесів функціонування дискових робочих органів ґрунтообробних знярядь та обґрунтування оптимальних конструктивно-режимних параметрів характеризуються унікальним авторським підходом до розв'язання науково-технічного завдання, пов'язаного зі зміною напружено-деформованого стану пружного стояка дискового робочого органа при його взаємодії із ґрунтовим середовищем. На сьогодні існує достатньо велика кількість конструкцій пружних стояків дискових робочих органів і відповідних їх теоретичних і експериментальних досліджень [8, 9, 10, 11]. Механіко-математичні моделі взаємодії дискового робочого органа на пружному стояку одержані в роботі [8]. Автором створено алгоритм побудови амплітудно-частотної характеристики пружного стояка дискового ґрунтообробного зняряддя, що

враховує функціональне регуювання в межах припустимого відхилення від заданої глибини на усьому робочому діапазоні, за умови збереження коливальних властивостей пружного стояка. Одержані автором результати дослідження носять дещо обмежений характер щодо застосування, їх рекомендовано лише для S-подібних пружних стояків дискових ґрунтообробних знарядь. В роботі [9] одержані теоретичні залежності для визначення відхилень пружних стояків дискових знарядь різних конфігурацій. Вирази отримані за допомогою методу Мора, визначальним конструктивним параметром обрано коефіцієнт жорсткості у вертикальній площині. При цьому дані дослідження базуються на вирішенні плоскої задачі, що значно обмежує можливості використання одержаних математичних моделей. В наукових працях [10, 11] авторами обґрунтовано форму пружного стояка дискового ґрунтообробного знаряддя у вигляді спіралі Архімеда і визначено вирази для коефіцієнтів жорсткості, довжини та кута відхилення у еквівалентній фізико-математичній моделі пружного стояка із врахуванням параметрів геометричної форми. Однак, основним недоліком цього дослідження є неможливість регулювати геометричні параметри стояка під час налаштування для різних типів ґрунтів і дискових робочих органів. В роботі [11] отримані залежності зміни проекції сили опору ґрунтового середовища F_x , F_y , F_z на осі Ox , Oy , Oz дискового робочого органа від кутів атаки α і нахилу γ робочого органа в діапазоні від 0° (0 рад) до 30° ($\pi/6$ рад), швидкості його переміщення V (1–4 м/с) та глибини обробітку ґрунту h (0,03–0,12 м).

Аналіз останніх досліджень за обраним напрямком вказує на те, що головною проблемою пружних робочих органів є їхня стійкість за глибиною. Розв'язання цієї проблеми передбачає аналіз вимушених коливань нелінійної системи під впливом квазіперіодичної сили. При цьому важливо враховувати особливості взаємодії робочого органа на пружному стояку з ґрунтовим середовищем, зокрема, змінну геометрію робочого органа та вплив періодичності сколювання ґрунту при використанні пружних стояків. Перспективним напрямком у вирішенні проблеми є використання чисельного моделювання процесу взаємодії дискових робочих органів на пружних стояках із ґрунтовим середовищем [12, 13, 14]. Це зумовлює використання цього методу при подальших наукових дослідженнях, базуючись на відповідних джерелах [15, 16, 17].

Постановка завдання. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану пружного стояка дискового ґрунтообробного знаряддя з регулятором жорсткості та обґрунтування раціональних діапазонів конструктивних параметрів.

Виклад основного матеріалу. Запропонована конструкція дискатора [18] складається з рами 3 (рис. 1), на якій за допомогою окремих пружних стояків 2 складної просторової форми забезпечено встановлення сферичного диска 1 зі ступицею з одним кутом атаки α та кутом нахилу γ у вертикально-повздовжній площині. Пружні стояки 2 в місці кріплення до рами 3 за допомогою болтів обладнані регулювальними пластинами жорсткості 4 аналогічної кривизни з можливістю їх сумісного кріплення. Причому, на пластинах виконано декілька рядів отворів, що забезпечує регулювання довжини робочої їх частини, яка працює разом зі стояком 2 і тим самим змінює його жорсткість. Для забезпечення кута повороту стояка відносно вертикальної осі додатково встановлені клиноподібні вставки 4. Під час роботи такого дискатора кожний сферичний диск 1 підрізає криволінійну скибу ґрунту, величина якої залежить від встановленої глибини обробітку та кута атаки α . За рахунок нахилу диска 1 у вертикально-повздовжній площині підрізана скиба ґрунту, переміщуючись по внутрішній поверхні сферичного диска 1, розпушується і частково перевертається.



1 – диск; 2 – пружний стояк; 3 – рама; 4 – регулювальна пластина жорсткості; 5 – клиноподібна вставка;
 α – кут атаки диска; β – кут встановлення регулювальної пластини жорсткості; γ – кут укоса диска;
 θ – кут клиноподібної вставки; ψ – кут другого згину стояка; R_1, R_2, L, δ, b – геометричні розміри стояка
 Рисунок 1 – Запропонована конструкція дискатора із регулятором жорсткості

Джерело: розроблено авторами

Згідно до постановки задачі теоретичних досліджень, яка наведена на рис. 2, приймаємо, що на сферичний диск діють проєкції сили опору ґрунтового середовища F_x, F_y, F_z та вага навантаження з боку рами ґрунтообробного знаряддя – $F_p = 500$ Н.

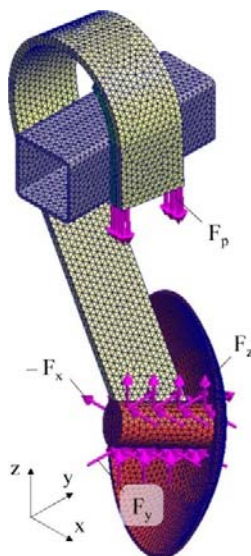


Рисунок 2 – Постановка задачі теоретичних досліджень

Джерело: розроблено авторами

Для оцінки процесу взаємодії сферичних дисків на пружному стояку із ґрунтовим середовищем проведемо гармонійний аналіз, який оцінює пікову реакцію системи в стаціонарному стані на гармонійні навантаження. При цьому на кожному кроці рішення всі прикладені навантаження і базові збудження мають однакову частоту, величини визначаються відповідними частотними кривими. Далі припустимо, що вектор гармонійної вузлової сили $\{P\}$ визначається за формулою

$$P_k = F_k \cos(\omega t + \gamma_k), \quad (1)$$

де P_k – величина сили в напрямку k ступеня вільності, Н;
 ω – частота збудження, c^{-1} ; γ_k – фазовий кут сили;
 t – час, с.

Для лінійних систем рівняння руху системи розв'язуються в n модальних рівнянь [19]

$$\ddot{x}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{x}_n + \omega_n^2 x_n = \{\Phi\}_n^T \{P\}, \quad (2)$$

де x_n – узагальнене переміщення точки системи, м;
 ω_n – частота коливання точки системи, c^{-1} ;
 ξ_n – коефіцієнт демпфування;
 Φ – модальна функція.

Шляхом підстановки вектора сили $\{P\}$ в рівняння (2) отримуємо наступне

$$\text{Real}[\ddot{x}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{x}_n + \omega_n^2 x_n] = \text{Real}[(A_n + iB_n)e^{i\omega t}], \quad (3)$$

де

$$A_n = \sum_{k=1}^{neq} \phi_{kn} F_k \cos \gamma_k, \quad (4)$$

$$B_n = \sum_{k=1}^{neq} \phi_{kn} F_k \sin \gamma_k. \quad (5)$$

При цьому стаціонарний розв'язок рівняння (3) має такий вигляд

$$\text{Real}[x_n] = \text{Real}\left[\frac{(A_n + iB_n e^{i\omega t})}{(\omega_n^2 - \omega^2) + 2i\xi_n \omega \omega_n}\right]. \quad (6)$$

Відмічаємо, що дійсна частина рівняння (6) дорівнює

$$x_n = C_n \cos \omega t + S_n \sin \omega t, \quad (7)$$

де

$$C_n = \left| \frac{A_n |1 - (\omega / \omega_n)^2| + B_n |2\xi_n (\omega / \omega_n)|}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_n \omega \omega_n)^2} \right|, \quad (8)$$

$$S_n = \left| \frac{A_n |2\xi_n (\omega / \omega_n)| - B_n |1 - (\omega / \omega_n)^2|}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_n \omega \omega_n)^2} \right|, \quad (9)$$

Вектор переміщення u задається наступною формулою

$$\{u\} = [\Phi][C_n] \cos(\omega t) + [\Phi][S_n] \sin(\omega t) = [u_c] \cos(\omega t) + [u_s] \sin(\omega t). \quad (10)$$

При цьому величина зміщення u_k і відповідний фазовий кут θ_k для k -го ступеня свободи дорівнюють

$$u_k = (u_{c,k}^2 + u_{s,k}^2)^{1/2}, \quad (11)$$

$$\theta_k = \tan^{-1} \left(\frac{u_{s,k}}{u_{c,k}} \right). \quad (12)$$

Слід зазначити, що реакції швидкості та прискорення є похідними від рівняння (10), їх амплітуди становлять

$$\dot{u}_k = \omega u_k, \quad (13)$$

$$\ddot{u}_k = \omega^2 u_k. \quad (14)$$

Фазові кути швидкостей і прискорень становлять, відповідно, 90° і 180° по відношенню до фазових кутів переміщення.

Враховуючи те, що пружний стояк із дисковим робочим органом ґрунтообробного знаряддя є механічною системою і є складною для аналітичного рішення, скористаємось чисельним моделюванням в програмному пакеті SOLIDWORKS Simulation в режимі лінійної динаміки випадкового коливання. При цьому отримана система рівнянь (2)–(14) може бути розв’язана за допомогою покрокового методу інтегрування Вільсона-Гета [20].

Для початку створимо сітку (рис. 2) із наступними параметрами: розмір елемента – 1,9–21,2 мм, співвідношення збільшення розміру елемента – 1,4. В якості матеріалу пружного стояка і регулятора жорсткості обрано сталь 60С2А ГОСТ 4543-71 (Модуль пружності – $2,12 \cdot 10^{11}$ Н/м²; коефіцієнт Пуассона – 0,29; модуль зсуву – $8,2 \cdot 10^{10}$ Н/м²; щільність – 7680 кг/м³; межа міцності при розтягуванні – $1,27 \cdot 10^9$ Н/м²; межа текучості – $1,09 \cdot 10^9$ Н/м²); для інших частин систем обрано AISI 1035 (Модуль пружності – $2,04 \cdot 10^{11}$ Н/м²; коефіцієнт Пуассона – 0,29; модуль зсуву – $7,99 \cdot 10^{10}$ Н/м²; щільність – 7850 кг/м³; межа міцності при розтягуванні – $5,85 \cdot 10^8$ Н/м²; межа текучості – $2,82 \cdot 10^8$ Н/м²). Параметрами вирішувача SOLID WORKS Simulation: час симуляції – 10 с, кількість частот – 15, метод часової інтеграції – Newmark.

З метою візуалізації одержаних результатів теоретичних досліджень, згідно обраної методики, приймаємо наступні геометричні параметри дискового робочого органа ґрунтообробного знаряддя на пружному стояку: $R_1 = 80$ мм; $R_2 = 150$ мм; $L = 400$ мм, $\delta = 10$ мм, $b = 90$ мм. Кути атаки диска $\alpha = 15^\circ$, укоса диска $\gamma = 15^\circ$, регулювальної пластина жорсткості $\beta = 60^\circ$, клиноподібної вставки $\theta = -10^\circ$, другого згину стояка $\psi = 140^\circ$, швидкість переміщення $V = 2$ м/с та глибина обробітку ґрунту $h = 0,05$ м.

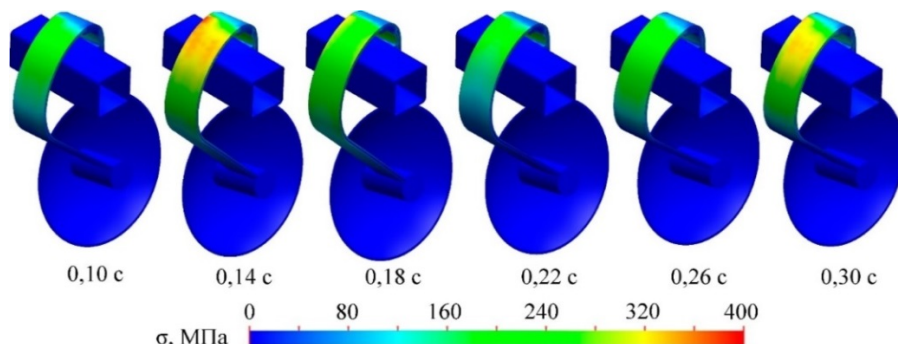


Рисунок 3 – Зміна розподілу напруженості пружного стояка з часом

Джерело: розроблено авторами

За результатами проведеного чисельного моделювання одержали візуалізацію зміни розподілу напруженості пружного стояка з часом, що представлено на рисунку 3. Проведенням аналізу цього розподілу, визначено динаміку зміни максимальної напруженості (рис. 4), яка знаходиться на вигині пружного стояка R_2 і додатково напруження на вигині регулятора жорсткості R_1 . Аналіз отриманих результатів розрахунків показує, що напруженість змінюється за законом затухаючого коливання із визначеною власною частотою.

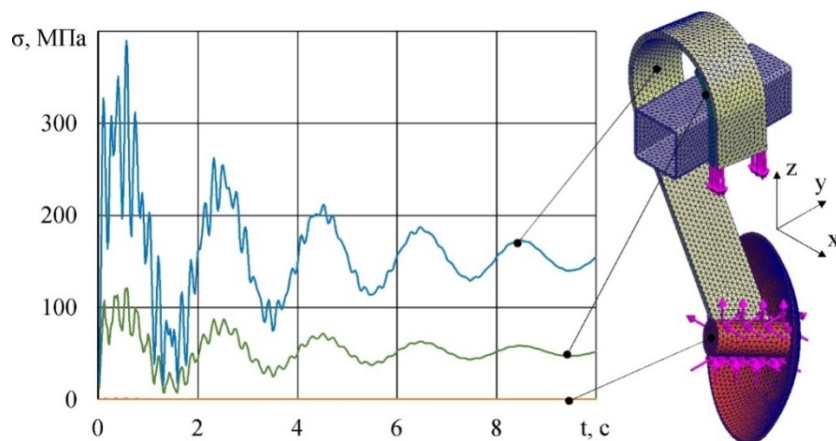


Рисунок 4 – Динаміка зміни максимальної напруженості в вигинах пружного стояка
Джерело: розроблено авторами

Маючи за мету більш повне розуміння напружено-деформованого стану пружного стояка з робочим органом ґрунтообробного знаряддя, доцільно розглянути безпосередні коливання стояка у просторі. Наведена на рис. 5 така візуалізація наочно демонструє зміну абсолютної деформації пружного стояка з часом, коли скалярні сцени накладені одна на одну із обраним часовим інтервалом 0,04 с. З представленої сцени видно, що відбуваються коливання не тільки самого стояка, а й частини рами в місці кріплення робочого органа знаряддя, що доцільно враховувати при вивченні означеного процесу. Динаміка зміни максимального значення деформацій пружного стояка в точці кріплення диска і частини рами ґрунтообробного знаряддя наведені на рис. 6.

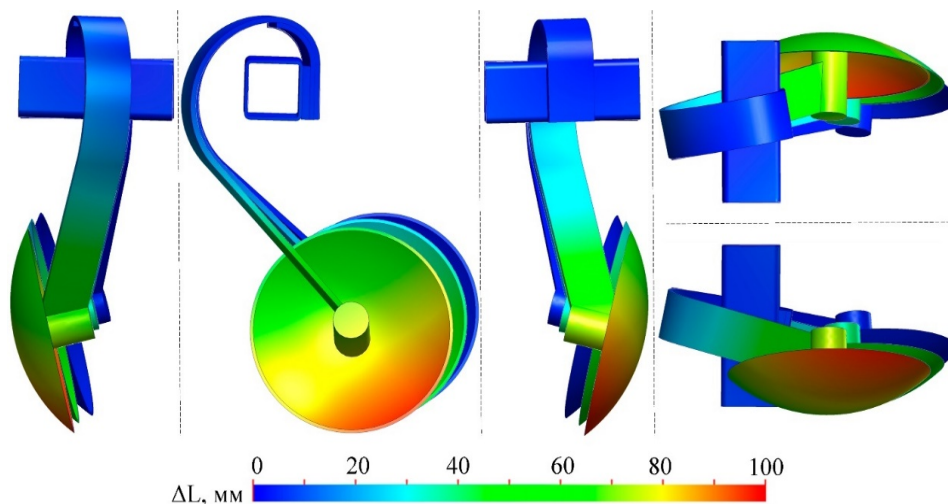


Рисунок 5 – Зміна абсолютної деформації стояка з часом в різних проекціях
Джерело: розроблено авторами

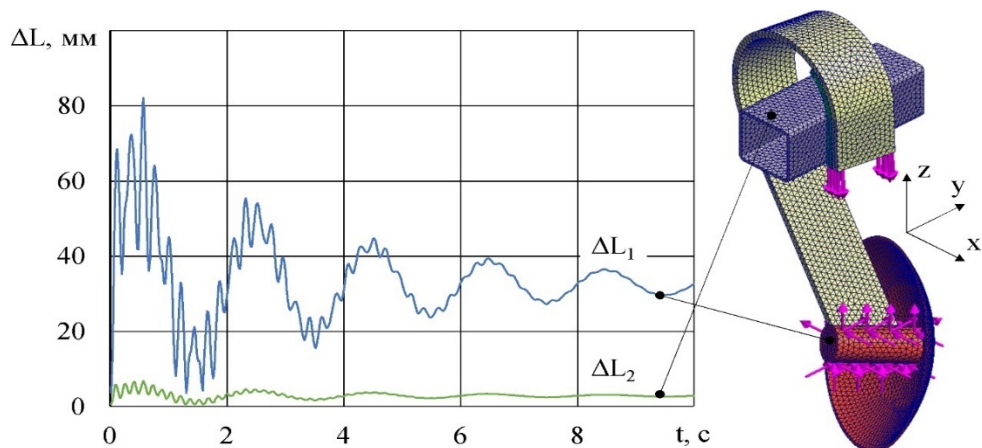


Рисунок 6 – Динаміка зміни абсолютної деформації пружного стояка

Джерело: розроблено авторами

Одержані результати дослідження напружено-деформованого стану пружного стояка з регулятором жорсткості дозволяють зробити висновок про те, що маючи визначену кількість пружних стояків або моделюючи їх конструкцію за рахунок набірних елементів із різними геометричними характеристиками і жорсткістю, можна за вищевикладеною методикою побудувати їх амплітудно-частотні характеристики і за ними визначити планований діапазон роботи для заданих технологічних режимів. Приклад такої амплітудно-частотної характеристики наведено на рис. 7 для трьох напрямків декартової системи координат. Амплітуда тут зведена до відносних значень для можливості подальшого порівняння.

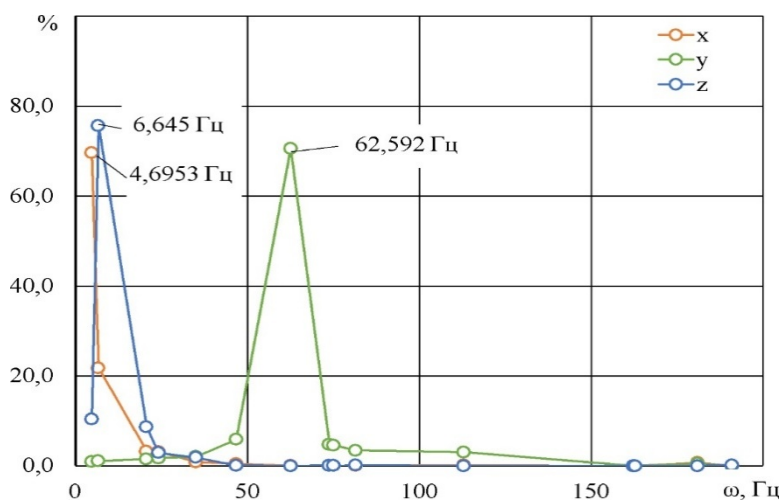


Рисунок 7 – Амплітудно-частотна характеристика коливання стояка

Джерело: розроблено авторами

Аналіз одержаних результатів показує, що для кожного напрямку спостерігається максимальне значення амплітуди. Так для напрямку Ox відповідає перший режим із частотою 4,6953 Гц, для напрямку Oy відповідає другий режим (6,645 Гц), а для напрямку Oz відповідає третій режим (62,592 Гц). Змінюючи конструктивні параметри стояка дискатора для всіх напрямків, режими і частоти зберігаються в межах статистичної похибки.

Виконаний теоретичний аналіз коливання пружного стояка дискового ґрунтообробного знаряддя дозволяє зупинитися на наступних критеріях оцінки:

– значення максимальної абсолютної деформації стояка в місці кріплення диска ΔL_1 і частини рами знаряддя ΔL_2 .

– значення максимальних напруженостей на вигинах стояка і регулятора жорсткості σ_{R2} , σ_{R1} ;

– частоти власних коливань стояка в трьох напрямках ω_x , ω_y , ω_z ;

Чисельне моделювання будемо проводити в три етапи:

– перший етап із конструктивними параметрами: R_1 (60–140 мм), R_2 (120–200 мм), L (300–500 мм), ψ (100–160 °);

– другий етап із конструктивними параметрами: b (80–130 мм), δ (8–16 мм);

– третій етап із конструктивними параметрами: α (0–30 °), γ (0–30 °), β (0–90 °), θ (–10–10 °).

Варіація факторів трирівнева (–1; 0; 1), моделювання проводилось за повнофакторним планом досліджень, обробка результатів досліджень проведена з використанням програмного пакету Wolfram Cloud. За результатами досліджень визначені рівняння другого порядку залежностей критеріїв досліджень від факторів для кожного етапу, загальний вигляд рівнянь має вигляд [15]

$$K_m = a_{00} + \sum_{i=1}^k a_{i0} q_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_{ij} q_i q_j, \quad (15)$$

де K_m – критерій досліджень;

q_1, \dots, q_k – фактори досліджень в закодованому вигляді;

$a_{00}, a_{10}, \dots, a_{k0}, a_{11}, \dots, a_{kk}$ – коефіцієнти регресії;

k – кількість факторів;

i, j – порядковий номер.

Для трирівневого кодування факторів використана формула [15]

$$q_i = \frac{2Q_i - (Q_{\max} + Q_{\min})}{Q_{\max} - Q_{\min}}, \quad (16)$$

де Q_i – фактор досліджень в розкодованому вигляді; Q_{\min} , Q_{\max} – максимальне і мінімальне значення фактора досліджень в розкодованому вигляді.

В Wolfram Cloud [21] рівняння регресії визначалося з використанням функції NonlinearModelFit, а статистична обробка даних, а саме, визначення стандартної похибки, t-критерію Стьюдента і р-рівня значимості, проводилась з використання процедури Parameter Table. Мінімальне і максимальне значення критерію і відповідних оптимальних факторів визначалися з використання функцій FindMinimum і FindMaximum, побудова поверхонь відгуків проводилась з використанням функції Plot3D.

На підставі такого методичного підходу вже на стадії проектування дискових робочих органів ґрунтообробних знарядь на пружних стояках можна робити висновок про можливість виконання ними конкретних технологічних задач щодо поверхневого обробітку ґрунту. Змінюючи конструктивні характеристики пружних стояків знаряддя і проводячи повторні дослідження, можна отримати відповідні залежності у вигляді рівнянь регресії.

Висновки. Для проведення чисельного моделювання напружено-деформованого стану пружного стояка дискатора з регулятором жорсткості в програмному пакеті SOLIDWORKS Simulation складено відповідний фізико-математичний апарат, який оцінює пікову реакцію системи в стаціонарному стані на гармонійні навантаження.

На підставі розробленого методичного підходу вже на стадії проектування дискових робочих органів ґрунтообробних знарядь на пружних стояках можна робити висновок про можливість виконання ними конкретних технологічних задач щодо

поверхневого обробітку ґрунту. Змінюючи конструктивні характеристики пружних стояків знаряддя і проводячи повторні дослідження, можна отримати відповідні залежності у вигляді рівнянь регресії.

Список літератури

1. Теорія стійкого руху дискової борони / В. В. Адамчук та ін. *Механізація та електрифікація сільського господарства* Глеваха : ННЦ «ІМЕСГ». 2021. Вип. 14 (113). С. 10–22.
2. Ґрунтообробні агрегати на основі дискових робочих органів : монографія. / Г. В. Теслюк та ін. Дніпропетровськ : ТОВ «Акцент ПП», 2016. 144 с.
3. Визначення якісних показників роботи експериментального дискового лушпильника. / В. Ф. Пашенко, М. І.Онишко, І. М.Дорожко, К. В. Седих. *Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. Механізація с.-г. виробництва*. 2011. Вип. 107. Т.1. X. С. 195–198.
4. Гуков Я.С. Механіко-технологічне обґрунтування енергозберігальних засобів для механізації обробітку ґрунту в умовах України : автореф. дис. ... докт. техн. наук 05.20.01. Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства». Глеваха, 1998. 32 с.
5. Седих К. В. Оцінка структурного складу ґрунту після обробітку експериментальним дисковим лушпильником. *Механізація та електрифікація сільського господарства: загальнодержавний збірник*. 2017. Вип. 6 (105). С. 44–49.
6. Шевченко І. А. Обґрунтування технологій та технічних засобів для обробітку ґрунтів на базі їх агрофізичних показників: дис. ... докт. техн. наук: 05.05.11. Таврійський державний агротехнологічний університет. Мелітополь, 2003. 403 с.
7. Шевченко І. А. Керування агрофізичним станом ґрунтового середовища. Київ : Видавничий дім «Вініченко», 2016. 320 с.
8. Лабатюк Ю. М. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів ярусного глибокорозпушувача для зрощуваних ґрунтів : дис. ... канд. техн. наук 05.05.11. Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України. Запоріжжя, 2014. 150 с.
9. Гапоненко О. І. Обґрунтування параметрів пружних стояків дискових ґрунтообробних агрегатів: дис. ... канд. техн. наук за спеціальністю 05.05.11. Державна наукова установа «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого». Дослідницьке, 2016. 228 с.
10. Седих К. В. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів дискатора з пружними стійками: дис. ... канд. техн. наук 05.05.11. Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка. Харків, 2021. 248 с.
11. Козаченко О. В., Седих К. В., Волковський О. М. Фізико-математична модель взаємодії диска з ґрунтом. *Інженерія природокористування*. 2020. №2 (16). С. 69–77. DOI: 10.37700/enm.2020.2(16).69-77.
12. Сімсон Е. А., Хавин В. Л., Ягудин Д. С. Оптимізація індивідуальної пружинної стійки дискової борони. *Інженерія природокористування*. 2016. №2 (6). С. 81–84.
13. Алієв Е. Б., Теслюк Г. В. Перспективи чисельного моделювання взаємодії ґрунтообробних робочих органів із ґрунтом у Simcenter STAR-CCM+. *Олійні культури: сьогодні та перспективи : зб. тез Міжнар. наук. інтернет-конференції (21 березня 2023 р.)*. Запоріжжя. ІОК НААН. 2023. С. 120–121.
14. Kobets A., Aliiev E., Tesliuk H., Aliieva O. Simulation of the interaction between the working bodies of tillage machines and the soil in Simcenter STAR-CCM+. *Machinery & Energetics*. 2023. 14 (1), 9–23. DOI: 10.31548/machinery/1.2023.09.
15. Алієв Е. Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва : підручник. Київ : Аграрна наука, 2023. 340 с. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9.
16. Shih R. H. Introduction to Finite Element Analysis Using SOLIDWORKS Simulation. Paperback. 2023. 518 p.
17. Kurowski P. Preview this book Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation. Paperback. 2023. 592 p.
18. Дискатор : пат. 153663 Україна : МПК А01В 23/06 / Козаченко О. В., Бакум М. В., Волковський О. М., Крекот М. М. № u 2023 00183; Заявл. 19.01.2023; Опубл. 09.08.2023, Бюл. № 32.
19. Soroushiani A., Farjoodi J., Bargi, K., Rajabi M., Saeed A., Arghavani M., Sharifpour M. M. Two Versions of the Wilson- θ Time Integration Method. *Conference: International Conference on Vibration Problems (ICoVP)*At: Prague, Czech Republic. 2011. DOI: 10.13140/2.1.4385.4409

20. Titus J. O. Aminer, N. B. Okelo. Wilson-Theta Algorithm Approach to solution of Dynamic Vibration Equations. *International Journal of Mathematics and Soft Computing*, 2014. №4 (1). 7–15. DOI: 10.26708/IJMISC.2014.1.4.02
21. Wolfram S. (2022). *Metamathematics: Foundations & Physicalization*. Wolfram Media. 456 p.

References

1. Adamchuk, V. V., Bulhakov, V. M., Nadykto, V. T., Kuvachov, V. P., Ihnat'yev, YE. I., & Ol't ,YU. (2021). Teoriya stiykoho rukhu diskovoyi borony [Theory of steady motion of a disk harrow]. *Mekhanizatsiya ta elektryfikatsiya sil's'koho hospodarstva*, 14 (113), 10–22. [in Ukrainian].
2. Teslyuk, H. V., Volyk, B. A., Sokol, S. P., Kobets, O. M., & Semenyuta, A. M. (2016). *Soil processing units based on disk working tools*. Dnipropetrovsk: TOV «Aktsept PP» [in Ukrainian].
3. Pashchenko, V. F., Onyshko, M. I., Dorozhko, I. M., & Siedykh, K. V. (2011). Determination of qualitative indicators of the operation of an experimental disk lopper. *Visnyk KhNTUSG imeni Petra Vasylenka. Mekhanizatsiya s.-h. vyrobnytstva*. Issue. 107 (part 1), 195–198. [in Ukrainian].
4. Gukov, Y. S. (1998). *Mechanical-technological substantiation of energy-saving means for mechanizing soil cultivation in Ukraine*. Extended abstract of doctor's thesis. Hlevakha [in Ukrainian].
5. Siedykh, K. V. (2017). Evaluation of soil structure after cultivation by an experimental disk lopper. *Mekhanizatsiya ta elektryfikatsiya sil's'koho hospodarstva: Zahal'noderzhavnyy zbirnyk*, Issue 6 (105), 44–49. [in Ukrainian].
6. Shevchenko, I. A. (2003). *Justification of technologies and technical means for soil cultivation based on their agro-physical indicators*. Doctor's thesis. Melitopol' [in Ukrainian].
7. Shevchenko, I. A. (2016). *Management of the agro-physical state of the soil environment*. Kyiv : Vydavnychyy dim «Vinichenko» [in Ukrainian].
8. Labatyuk, YU. M. (n.d.). *Justification of the structural and technological parameters of a tiered deep-ripper for irrigated soils*. Candidate's thesis . Zaporizhzhya. [in Ukrainian].
9. Haponenko, O. I. (2016). Obhruntuvannya parametriv pruzhnykh stoyakiv diskovykh rruntoobrabnykh ahrehativ [Justification of parameters of elastic racks of disk tillage units]: Candidate dissertation in Technical Sciences, 05.05.11. State Research Institute «Ukrainian Scientific Research Institute of Forecasting and Testing of Equipment and Technologies for Agricultural Production named after Leonid Pohoryloho». Doslidnyts'ke. 228 p. [in Ukrainian].
10. Siedykh, K. V. (2021). *Justification of structural and technological parameters of a disc harrow with elastic racks*: Candidate's thesis. Kharkiv [in Ukrainian].
11. Kozachenko, O. V., Siedykh, K. V., & Volkovs'ky, O. M. (2020). Physical and mathematical model of disk-soil interaction. *Inzheneriya pryrodokorystuvannya*, 2 (16), 69–77. [in Ukrainian]. DOI: 10.37700/enm.2020.2(16). S. 69–77.
12. Simson, E. A., Khavin, V. L., & Yahudin, D. S. (2016). Optimization of the individual spring rack of a disk harrow. *Inzheneriya pryrodokorystuvannya*, 2 (6), 81–84. [in Ukrainian].
13. Aliiev, E. B., & Teslyuk, H. V. (2023). Prospects for numerical modeling of the interaction of tillage working bodies with soil in Simcenter STAR-CCM+. *Abstracts of the International Scientific Internet Conference (March 21, 2023). Oliyni kultury: syohodennya ta perspektyvy*. Zaporizhzhya: IOK NAAN. 120–121. [in Ukrainian].
14. Kobets, A., Aliiev, E., Tesliuk, H., & Aliieva, O. (2023). Simulation of the interaction between the working bodies of tillage machines and the soil in Simcenter STAR-CCM+. *Machinery & Energetics*, 14 (1), 9–23. DOI: 10.31548/machinery/1.2023.09.
15. Aliiev, E. B. (2023). *Numerical modeling of agro-industrial production processes* : Textbook. Kyiv : Ahrarna nauka. 340 p. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9. [in Ukrainian].
16. Shih, R. H. (2023). *Introduction to Finite Element Analysis Using SOLIDWORKS Simulation*. Paperback. 518 p. [in English].
17. Kurowski, P. (2023). *Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation*. Paperback. [in English].
18. Kozachenko, O. V., Bakum, M. V., Volkovs'ky, O. M., & Krekot, M. M. (2023). Patent Ukrainy na korysnu model' 153663, MPK A01B 23/06. Dyskator [Disk harrow]. No. u 2023 00183; Zayavl. 19.01.2023. Opubl. 09.08.2023. Byul. No. 32. [in Ukrainian].
19. Soroushian, A., Farjoodi, J., Bargi, K., Rajabi, M., Saaed, A., Arghavani, M., & Sharifpour, M. M. (2011). Two Versions of the Wilson- θ Time Integration Method. *International Conference on Vibration Problems (ICoVP)*, Prague, Czech Republic. DOI: 10.13140/2.1.4385.4409.

20. Titus, J. O., Aminer, N. B., & Okelo. (2014). Wilson-Theta Algorithm Approach to solution of Dynamic Vibration Equations. *International Journal of Mathematics and Soft Computing*, 4 (1), 7–15. [in English]. DOI: 10.26708/IJMISC.2014.1.4.02.
21. Wolfram, S. (2022). *Metamathematics: Foundations & Physicalization*. Wolfram Media [in English].

Oleksiy Kozachenko, Prof., DSc.

Oleksandr Volkovsky, post-graduate

Sergey Dyakonov, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

State Biotechnology University, Kharkiv, Ukraine

Methodology of Numerical Modeling of the Stress-Strain state of an Elastic Stand with a Stiffness Regulator

The physical and mathematical apparatus is presented, which evaluates the peak response of the system (an elastic stand with a disc working body) in a steady state to harmonic loads. It is developed for numerical modeling of the stress-strain state of the elastic stand of a disc harrow with a stiffness regulator in the SOLIDWORKS Simulation software package.

To assess the interaction process of spherical discs on the elastic stand with the soil medium, a harmonic analysis of the peak response of the system in a steady state to harmonic loads was performed. At each step of the solution, all applied loads and base excitations have the same frequency, and their magnitudes are determined by the respective frequency curves, resulting in a visualization of the change in stress distribution of the elastic stand over time. By analyzing this distribution, the dynamics of the change in maximum stress were determined, which are found at the bending of the elastic stand (R_2), and additionally, the bending stress on the stiffness regulator (R_1). The stress changes according to a damped oscillation law with a defined natural frequency. The obtained results of the stress-strain state study of the elastic stand with the stiffness regulator allow the conclusion that, by having a certain number of elastic stands or modeling their design using modular elements with different geometric characteristics and stiffness, it is possible to construct their amplitude-frequency characteristics and, based on these, determine the planned operating range for specified technological modes.

The analysis of the obtained results showed that for each direction, a maximum amplitude value is observed: for the O_x direction, the first mode corresponds with a frequency of 4.6953 Hz, for the O_y direction, the second mode corresponds (6.645 Hz), and for the O_z direction, the third mode corresponds (62.592 Hz). The theoretical analysis of the oscillation of the elastic stand of the disc tillage implement allowed selecting the following evaluation criteria: the value of the maximum absolute deformation of the stand at the disc attachment point ΔL_1 and the tool frame part ΔL_2 ; the values of the maximum stresses at the bends of the stand and the stiffness regulator σ_{R_2} , σ_{R_1} ; the natural frequencies of the stand's oscillations in three directions ω_x , ω_y , ω_z . It was established that based on this methodological approach, even at the design stage of disc working bodies of tillage implements on elastic stands, it is possible to conclude the feasibility of performing specific technological tasks for surface soil cultivation. By changing the design characteristics of the tool's elastic stands and conducting repeated studies, it is possible to obtain the corresponding dependencies in the form of regression equations.

disc harrow, surface soil cultivation, elastic stand, stiffness regulator, stress of the elastic stand, soil, disc attack angle

Одержано (Received) 01.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 25.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

УДК 633.1:681.78

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.153-159>

С.П. Степаненко, ст. наук. співр., д-р техн. наук, **В.І. Днесь**, ст. досл., канд. техн. наук, **А.М. Борис**, ст. досл., канд. техн. наук, **А.Я. Кузьмич**, ст. досл., канд. техн. наук, **Д.А. Волик**, асп.

*Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва НААН України, сел. Глеваха, Україна
e-mail: stepanenko_s@ukr.net*

Алгоритм цифрової ідентифікації зернових матеріалів

Розглянуто питання застосування технологій машинного зору для підвищення точності та ефективності ідентифікації зернових матеріалів у процесі післязбиральної обробки. Визначено, що традиційні методи контролю якості зерна, зокрема візуальні, мікробіологічні та хімічні тести, мають суттєві обмеження при ідентифікації домішок, особливо тих, що подібні за фізичними та візуальними ознаками. Запропоновано алгоритм цифрової ідентифікації зерна, заснований на методах машинного зору та машинного навчання.

машинний зір, цифрова ідентифікація, зернові матеріали, якість зерна, машинне навчання, післязбиральна обробка

Постановка проблеми. Забезпечення продовольчої безпеки України в умовах військового стану є однією з найбільших проблем сільськогосподарського виробництва сьогодні. Продовольче зерно є основним джерелом харчування у всьому світі. Проте майже до 30% вирощеного врожаю втрачається під час процесів збирання та післязбиральної обробки. Втрати врожаю після збирання неминучі на етапах обробки зерна, які включають процеси транспортування, сушіння, фасування та зберігання. Наявність домішок у продовольчому зерні значною мірою впливає на його клас і якість, а також на його збереження. Існує значна кількість методів, починаючи від візуальних методів, і закінчуючи мікробіологічними та хімічними тестами, що використовуються для проведення оцінки та контролю якості зерна, що зберігається. Однак, досить важко ідентифікувати забруднювачі зерна при зберіганні за допомогою традиційних методів, особливо коли вони фізично, а іноді і візуально схожі. Використання неруйнівних, своєчасних, точних, надійних, економічних і безпечних для навколишнього середовища методів визначення якості зерна залишається предметом найбільшого інтересу дослідників і сільськогосподарської промисловості в останні роки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Машинний зір може надати точні та ефективні рішення для підтримки сільськогосподарської діяльності. Крім того, алгоритми машинного навчання дозволяють швидко й точно аналізувати великі обсяги даних, забезпечуючи засоби для впровадження програм машинного зору в сільському господарстві [1, 2]

Постановка завдання. Мета дослідження полягає в розробленні алгоритму розпізнавання зернових матеріалів за допомогою аналізу зображень, що дасть змогу здійснення ефективного контролю та підвищити продуктивність процесу оцінки якості зернових матеріалів..

Виклад основного матеріалу. Якщо узагальнити алгоритм цифрової ідентифікації проби зернових матеріалів, то можна виділити п'ять укрупнених етапів: 1) попередня обробка зображення; 2) виділення окремих об'єктів; 3) ідентифікація (класифікація) об'єктів; 4) визначення параметрів кожного з об'єктів; 5) визначення показників структури проби (зразка) зернового матеріалу (рис.1).



Рисунок 1 – Узагальнений алгоритм цифрової ідентифікації об'єктів на зображенні
Джерело: розроблено авторами

Перед тим, як приступити до аналізу зображення проби (зразка) зернового матеріалу, необхідно виконати попередню обробку, яка складається з таких основних етапів [3, 4]: фільтрація та бінаризація зображення.

Для усунення шумів і покращення якості зображення використовують відповідні методи фільтрації, серед найбільш поширених: Гауссове згладжування, медіанний фільтр та фільтр Собеля [4].

Фільтр Гаусса є одним з найпоширеніших фільтрів для згладжування зображень. Фільтр Гаусса згладжує (розмиває) зображення, зменшуючи шум та різкі переходи. Кожен піксель зображення замінюється середньозваженим значенням його оточення, причому пікселі, ближчі до центру вікна фільтра, отримують більшу вагу відповідно до розподілу Гаусса [5]

$$G(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

де (x, y) – координати пікселя;

(x_c, y_c) – координати центру вікна фільтра;

σ – стандартне відхилення, яке визначає ступінь розмивання (чим більше, тим більше розмиття).

Медіанний фільтр – це нелінійний фільтр, який використовується для зменшення шуму в зображенні, особливо "імпульсного" шуму. Суть фільтра полягає в заміні кожного пікселя зображення медіанним значенням його сусідів у межах заданого вікна (зазвичай квадратного) [3]. Медіанний фільтр здатний добре згладжувати зашумлені області, зберігаючи структуру меж між ними [4].

Для виділення країв, визначення напрямків градієнтів і підсилення деталей зображення досить часто використовується фільтр Собеля-Фельдмана. Цей фільтр використовує два ядра: одне для виявлення градієнтів по горизонталі (по осі X), інше – по вертикалі (по осі Y). Ці градієнти представляють зміни яскравості між пікселями, тобто там, де відбувається різкий перехід між кольорами або інтенсивністю (краї) [4].

Для виявлення країв по горизонталі (по X) використовується ядро [4]

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Для виявлення країв по вертикалі (по Y) використовується ядро [4]

$$S_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

Наступним етапом попередньої обробки зображення проби (зразка) зернового матеріалу є його сегментація (бінаризація) – переведення зображення у двокольоровий формат для полегшення виокремлення зернівок. Існуючі методи сегментації поділяють на дві групи: порогові та адаптивні [4]. Серед порогових методів достатнього поширення набув глобальний поріг Оцу (Otsu) [7, 8], який використовується для поділу зображення на два класи: передній план (об'єкт) і задній план (фон). На відміну від звичайних методів бінаризації, метод Оцу автоматично обирає оптимальний поріг на основі розподілу яскравості пікселів у зображенні. Суть методу зводиться до мінімізації внутрішньокласової дисперсії, яка визначається як зважена сума дисперсій двох класів [7, 8]

$$\sigma_W^2(t) = q_1(t)\sigma_1^2(t) + q_2(t)\sigma_2^2(t), \quad (2)$$

де ваги q_1, q_2 – це ймовірності двох класів, що розділені порогом t ; σ_1^2, σ_2^2 – дисперсії цих класів.

Адаптивні методи сегментації враховують локальні особливості зображення. На відміну від глобальних методів – дозволяють знаходити поріг окремо для кожної області зображення, що особливо корисно, коли освітлення на зображенні неоднорідне або є тіні [9].

На другому етапі (рис. 1) планується визначити контури та локалізацію окремих об'єктів відібраної проби (зразка) зернового матеріалу. В межах статті, окремими об'єктами проби (зразка) зернового матеріалу вважаються – цілі зернівки, частини (подрібнені) зернівки та сторонні вclusions (домішки). В нашому випадку виокремлення контурів зображень дасть змогу розділити вихідне зображення на множину дрібних зображень (окремих об'єктів) для подальшої їх ідентифікації. Однією з основних проблем визначення контурів є плавні переходи між об'єктами, а відібрана проба (зразок) зернового матеріалу характеризується поступовим переходом інтенсивності кольору між двома окремими зернівками. Для усунення цієї проблеми

планується використання камери глибини, зокрема IntelRealSenseDepthCamera D435 або аналогічні. Це дасть змогу визначати контур об'єктів не тільки за інтенсивністю зміни кольору, але й за зміною відстані від розташування камери до поверхні цих об'єктів, де збільшення відстані буде характеризувати їх межі.

Існуючі методи детекції країв об'єктів на зображенні варіюються від простих градієнтних операторів до складних моделей на основі нейронних мереж [4].

Серед розроблених методів виявлення контурів алгоритм Кенні – один із найбільш строго визначених методів, який забезпечує добре та надійне виявлення. Завдяки своїй оптимальності для відповідності трьом критеріям виявлення контурів та простоті процесу втілення, він став одним із найпопулярніших алгоритмів виявлення контурів [10]. Алгоритм передбачає виконання наступних кроків [10]: 1) згладжування (застосування фільтра Гаусса для зменшення шуму) 2) обчислення градієнтів (для виявлення зміни інтенсивності яскравості зображення); 3) придушення немаксимальних градієнтів (вибираються лише ті точки, де градієнт досягає максимуму); 4) подвійна порогова обробка (використовуються два пороги: пікселі з інтенсивністю вище сильного порогу вважаються краями, а ті, що нижче слабого – ігноруються); 5) трасування країв через гістерезис (слабкі грані обробляються, якщо вони з'єднані зі сильними краями).

На третьому етапі (рис. 1) проводиться ідентифікація (класифікація) кожного з виокремлених об'єктів – поділ їх на відповідні класи: цілі зернівки, частини (подрібнені) зернівки та сторонні вclusions (домішки). Для цього можливе використання різних методів класифікації.

Методи класифікації об'єктів на зображеннях можна умовно поділити на класичні (які залежать від витягування ознак), на основі машинного навчання та комбіновані.

Перша група методів класифікації засновані на ознаках. Ці методи базуються на використанні класичних ознак, які визначаються з зображення та використовуються для подальшої класифікації. До цих методів відносяться: гістограма напрямлених градієнтів (HOG) [11], масштабоінваріантнеознакове перетворення (SIFT) [12], метод прискорених стійких ознак (SURF) [13], локальних бінарних шаблонів (LBP) [14]. Раніше ці методи були основними підходами в комп'ютерному зорі, однак зараз їх використовують рідше через поширення глибокого навчання.

Наступна група методів – нейронні мережі, які автоматично витягують ознаки зі зображень на різних рівнях абстракції [15,16]. До них відносяться: згорткові нейронні мережі (CNN), залишкові нейронні мережі (ResNet), мережі типу Inception [15,16].

Основним типом нейронних мереж для роботи із зображеннями є згорткові нейронні мережі (CNN), які спеціалізуються для обробки даних із сітчастою топологією. Вони набули великої популярності в задачах комп'ютерного зору, включаючи розпізнавання об'єктів, сегментацію зображень і класифікацію, завдяки своїй здатності автоматично навчати та витягувати ознаки без необхідності явного визначення їх вручну. Основною задачею під час роботи із згортковими нейронними мережами є вибір правильної архітектури CNN для конкретної задачі [17].

Також виділяють комбіновані методи, які використовують декілька моделей або підходів для покращення точності класифікації. Це можуть бути різні моделі, які працюють паралельно, або комбіновані етапи обробки та класифікації такі, як бутстреп агрегація (декілька моделей паралельно навчаються на різних вибірках із початкового набору даних, а їхні прогнози об'єднуються для формування остаточного результату) та ідсилування (моделі навчаються послідовно і кожна наступна модель надає більше уваги тим випадкам, на яких попередні моделі показали погані результати) [18].

Глибокі нейронні мережі зараз є домінуючим підходом до класифікації, оскільки вони автоматично витягують складні ознаки і мають високу точність. Вибір конкретного методу залежить від наявності даних, ресурсів та вимог до точності класифікації.

Після проведення класифікації для об'єктів класифікованих як зернівки, необхідно визначити їх конкретні параметри – четвертий етап алгоритму (рис. 1). Під даними параметрами розуміють форму зернівки та її геометричні розміри (ширина та довжина). Форма контуру зернівки відображає реальну форму зернівки. Якщо контур зернівки овальний чи має іншу неправильну форму, то визначають максимальну кількість пікселів по висоті та ширині контуру зображення зернівки. Якщо форма контуру круга (максимальна кількість пікселів по висоті, дорівнює максимальній кількості пікселів по горизонталі), то рахують лише пікселі по горизонталі чи вертикалі. Знаючи кількість пікселів на одиницю довжини (масштабний коефіцієнт фото), вираховують реальні розміри зернівки. Дану операцію виконують для кожного контуру, класифікованого як ціла зернівка.

На п'ятому етапі (рис. 1) буде проводитися визначення показників проби (зразка) зернового матеріалу для кожного визначеного класу об'єктів зокрема. В узагальненому виді визначення буде проводитися як

$$P^j = \frac{\sum_{i=0}^{N_j} p_{i,j}}{\sum_{j=0}^J \sum_{i=0}^{N_j} p_{i,j}}, \quad (3)$$

де P^j – показник, який характеризує певну властивість j -го класу об'єктів проби (зразку) зернового матеріалу;

$p_{i,j}$ – показник, який характеризує певну властивість i -го суб'єкта j -го класу проби (зразку) зернового матеріалу;

N_j – кількість об'єктів j -го класу проби (зразку) зернового матеріалу;

J – кількість класів об'єктів проби (зразку) зернового матеріалу.

Показник p^j може характеризувати як розмірні характеристики (довжина, товщина, площа), так і якісні.

В першому наближенні, алгоритм цифрової ідентифікації зернових матеріалів буде включати наступні етапи:

1. Попередня обробка зображення проби (зразка) зернового матеріалу.
 - 1.1. Усунення викривлення (перспективи) зображення (за потреби).
 - 1.2. Використання фільтра Гаусса для згладжування зображення,
 - 1.3. Сегментація (бінаризація) зображення:
 - 1.3.1. За умови рівномірного освітлення – використання методу глобальний поріг Оцу,
 - 1.3.2. За умови неоднорідного освітлення – використання адаптивних методів бінаризації,
 2. Виділення окремих об'єктів (визначення контурів об'єктів) – використання методу Кенні.
 3. Ідентифікація (класифікація) об'єктів – використання нейронної мережі з CNN архітектурою.
 4. Визначення параметрів кожного з об'єктів.
 5. Визначення показників структури проби (зразка) зернового матеріалу.

Проте, на початковому етапі визначитися з методами, які будуть використані на кожному з етапів, враховуючи їх різноманіття, доволі складно. Конкретні методи, які відповідають цілям ідентифікації зернових матеріалів, будуть вибрані в результаті проведення досліджень.

Висновки: 1. Узагальнено світовий досвід цифрової ідентифікації об'єктів на зображеннях та виокремлено можливі методи для ідентифікації зернових матеріалів, що дало змогу розробити відповідний алгоритм.

2. Розроблено алгоритм цифрової ідентифікації зернових матеріалів, в першому наближенні, який включає в себе відповідні методи та дає змогу розпізнавати, класифікувати та визначати показники зернових матеріалів.

Список літератури

1. Kvashuk, D., Erokhin, R. Overview of the possibility of mashing approach in agricultural household. *Agrosvit*. 2019. No. 12. P. 60. URL: <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2019.12.60>.
2. Dyatlov, E. Machine vision (analytical review). *Mathematical machines and systems*. 2013. Vol. 2. 32–40.
3. David A. Forsyth, Jean Ponce. *Computer Vision: A Modern Approach*. 1 ed. Prentice Hall. 2003. 800 p.
4. Stockman G., Shapiro L. G. *Computer Vision (1st. ed.)*. Prentice Hall PTR. 2001. 608 p.
5. Haddad R. A., Akansu A. N. A Class of Fast Gaussian Binomial Filters for Speech and Image Processing. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1991. Vol. 39. P. 723–727.
6. Sobel I. History and Definition of the Sobel Operator. 2014.
7. Sezgin M. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. *Journal of Electronic Imaging*. 2004. Vol. 13. P. 146–165.
8. Грицик В. В., Дунас А. Я. Дослідження методів розпізнавання образів для систем комп'ютерного зору роботів майбутнього. *Інформаційні технології. Вісник ХНТУ*. 2017. № 3 (62). С. 297–301.
9. Ryabova L., Mazur Y., Vyshnevskaya V. S. Comparative analysis of binarization methods for images of eye iris. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*. 2017. No. 23(3). P. 171–175.
10. Алгоритм Кенні – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_Кенні (дата звернення: 20.10.2024).
11. Lowe D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *IJCV*. 2004. No. 60 (2). P. 91–110.
12. Lowe D. G. Object recognition from local scale-invariant features. *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*. 1999. Vol. 2. P. 1150–1157.
13. Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L. SURF: Speeded up robust features. *Proceedings of the 9th European conference on Computer Vision - Volume Part I*. 2006.
14. Ojala T., Pietikainen M., Maenpaa M. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2002. Vol. 24(7). P. 971–987.
15. Жеребух О., Фармага І. Використання нейронних мереж для визначення об'єктів на зображенні. *Computer design systems. Theory and practice*. 2024. Т. 6(1). С. 232–240.
16. Dhiman C., Vishwakarma D. K. A review of state-of-the-art techniques for abnormal human activity recognition. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2019. Vol. 77. P. 21–45. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.08.014>.
17. Згорткова нейронна мережа – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Згорткова_нейронна_мережа (дата звернення: 20.10.2024).
18. Opitz D., Maclin R. Popular Ensemble Methods: An Empirical Study. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 1999. Vol. 11. P. 169–198. URL: <https://doi.org/10.1613/jair.614>

References

1. Kvashuk, D., & Erokhin, R. (2019). Overview of the possibility of mashing approach in agricultural household. *Agrosvit*, (12), 60 [in English]. <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2019.12.60>
2. Dyatlov, E. . (2013). Machine vision (analytical review). *Mathematical machines and systems*, 2, 32–40 [in English].
3. David A. Forsyth & Jean Ponce. (2003). *Computer Vision: A Modern Approach*. 1 ed. Prentice Hall [in English].
4. Stockman, G., & Shapiro, L. G. (2001). *Computer Vision (1st. ed.)*. Prentice Hall PTR [in English].
5. Haddad, R. A., & Akansu, A. N. (1991). A Class of Fast Gaussian Binomial Filters for Speech and Image Processing. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 39, 723–727 [in English].
6. Sobel, I. (2014). History and Definition of the Sobel Operator. [in Ukrainian].
7. Sezgin, M. (2004). Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. *Journal of Electronic Imaging*, 13, 146–165 [in English].

8. Hrytsyk, V. V., & Dunas, A. Ya. (2017). Study of pattern recognition methods for computer vision systems of robots of the future. *Information technologies. KhNTU Bulletin*, (3 (62)), 297–301. [in Ukrainian].
9. Ryabova, L., Mazur, Y., & Vyshnevskaya, V. S. (2017). Comparative analysis of binarization methods for images of eye iris. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, (23(3)), 171–175 [in English].
10. Kenny's algorithm. (2015, 3 May). *Wikipedia*. https://uk.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_Кенні [in English].
11. Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *IJCV*, (60 (2)), 91–110[in English].
12. Lowe, D. G. (1999). Object recognition from local scale-invariant features. *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, 2, 1150–1157 [in English].
13. Bay, H., Tuytelaars, T., & Van Gool, L. (2006). SURF: Speeded up robust features. *Proceedings of the 9th European conference on Computer Vision - Volume Part I*. [in Ukrainian].
14. Ojala, T., Pietikainen, M., & Maenpaa, M. (2002). Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(7), 971–987 [in English].
15. Jerebukh, O., & Farmaga, I. (2024). Using neural networks to identify objects in an image. *Computer design systems. Theory and practice*, 6(1), 232–240. [in Ukrainian].
16. Dhiman, C., & Vishwakarma, D. K. (2019). A review of state-of-the-art techniques for abnormal human activity recognition. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 77, 21–45. [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.08.014>
17. Convolutional neural network (2016). *Wikipedia*. https://uk.wikipedia.org/wiki/Згорткова_нейронна_мережа [in English].
18. Opitz, D., & Maclin, R. (1999). Popular Ensemble Methods: An Empirical Study. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 11, 169–198. [in English]. <https://doi.org/10.1613/jair.614>

Serhii Stepanenko, Senior Researcher, DSc, **Viktor Dnes'**, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Andriy Borys**, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Alvian Kuzmych**, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Daryna Volyk**, Post-graduate

Institute of Mechanics and Automation of Agricultural Production, Hlevakha, Ukraine

Algorithm of Digital Identification of Grain Materials

The article examines the application of machine vision technologies to enhance the accuracy and efficiency of grain material identification during post-harvest processing. It has been determined that traditional grain quality control methods, including visual, microbiological, and chemical tests, have significant limitations in identifying impurities, especially those similar in physical and visual characteristics. In response to these challenges, a digital grain identification algorithm based on machine vision and machine learning methods is proposed.

The algorithm allows for rapid and accurate analysis of grain material images, enabling automatic recognition, classification, and quality assessment. Additionally, the algorithm shows potential for scalability and integration into modern agro-industrial processes, helping to minimize grain loss and improve preservation during transportation and storage. This positions machine vision technologies as a promising tool for ensuring food security in Ukraine. The article summarizes global experience in digital object identification in images and highlights possible methods for identifying grain materials, facilitating the development of the algorithm. A preliminary version of the digital identification algorithm for grain materials has been developed, incorporating relevant methods that enable recognition, classification, and evaluation of grain material indicators.

Convolutional Neural Networks (CNNs) have been found to be the main type of neural networks for working with images, which are specialized for processing data with mesh topology. They have become very popular in computer vision tasks, including object recognition, image segmentation, and classification, due to their ability to automatically train and extract features without the need to explicitly define them manually.

Deep neural networks are now the dominant classification approach because they automatically extract complex features and have high accuracy. The choice of a specific method depends on the availability of data, resources and requirements for classification accuracy.

After classification, it is necessary to determine their specific parameters for objects classified as grains - the fourth stage of the algorithm. These parameters mean the shape of the grain and its geometric dimensions (width and length). The shape of the grain contour reflects the actual shape of the grain.

machine vision, digital identification, grain materials, grain quality, machine learning, post-harvest processing

Одержано (Received) 01.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 25.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

УДК 631.331; 631.33.024.2

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.160-167>**В.М. Сало**, проф., д-р техн. наук, **С.М. Лещенко**, доц., канд. техн. наук,**Б.Г. Вовнянко**, асп., **С.М. Мороз**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м Кропивницький, Україна**e-mail: salovm@ukr.net*

Порівняльні показники роботи сошників двох типів

В статті розглянуті особливості забезпечення якісних показників виконання технологічного процесу сівби сільськогосподарських культур з використанням сошників різних типів. Представлена методика проведення польових порівняльних випробувань сошників з гострим кутом входження в ґрунт, які представлені експериментальною посівною секцією та серійним дводисковим сошником з прикочуючим котком. До складу секції входить сошник з гострим кутом входження в ґрунт, обладнаний утримуючою п'яткою.

Оцінка роботи здійснена за двома показниками – рівномірність загорання насіння по глибині залягання та дотримання заданої глибини його загорання. Впливовими факторами прийняті робоча швидкість та установча глибина загорання насіння. Встановлено, що посівна секція продемонструвала кращу на 7,5% рівномірність розподілу насіння по глибині. З високою ймовірністю це є позитивним наслідком роботи утримуючої п'ятки.

Фактична глибина загорання насіння обома робочими органами зменшується зі збільшенням робочої швидкості, сошники виглиблюються, але ступінь залежності для експериментальної секції значно нижчий, ніж для дводискового сошника.

сівба, сошник, насіння, глибина загорання, якість процесу, сошник з гострим кутом входження в ґрунт, дисковий сошник

Постановка проблеми. Якісна сівба сільськогосподарських культур є визначальним фактором отримання високих врожаїв. В останні десятиліття загострилася конкуренція між традиційними та прямими способами сівби. Більш прогресивними і, на перший погляд, економічно вигіднішими вважаються прямі способи сівби, але застосувати їх можна не для всіх видів сільськогосподарських культур. Як приклад, проблемною залишається пряма сівба зернових колосових культур рядковим способом з традиційною шириною міжрядь 15см. Серед відомих і реалізованих способів прямої сівби зернових є тільки смуговий з використанням лапових сошників [1], які характеризуються досить низькими якісними показниками виконання технологічного процесу.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Суть проблеми полягає у тому, що для прямої сівби, крім лапових сошників з гострим кутом входження в ґрунт, використовують виключно сошники з тупим кутом входження в ґрунт, здебільшого дискові, які не схильні до забивання рослинними рештками бур'янів та рослин-попередників. Головним недоліком таких сошників чи посівних секцій є необхідність значних зусиль на їх заглиблення в ґрунт, що вирішується шляхом закладення в конструкції таких робочих органів і машин в цілому надмірної металомісткості, в окремих випадках до 1000кг/м конструкційної ширини машини [2]. Крім цього, загострюється проблема екологічного характеру – переущільнення ґрунтів, руйнування їх структури. Це процеси, які отримали назву деградації чорноземів [3]. Сошники, чи посівні секції з зазначеною металомісткістю вочевидь не можуть мати компактних розмірів, а отже, їх не можна скомпонувати в конструкції посівної машини таким

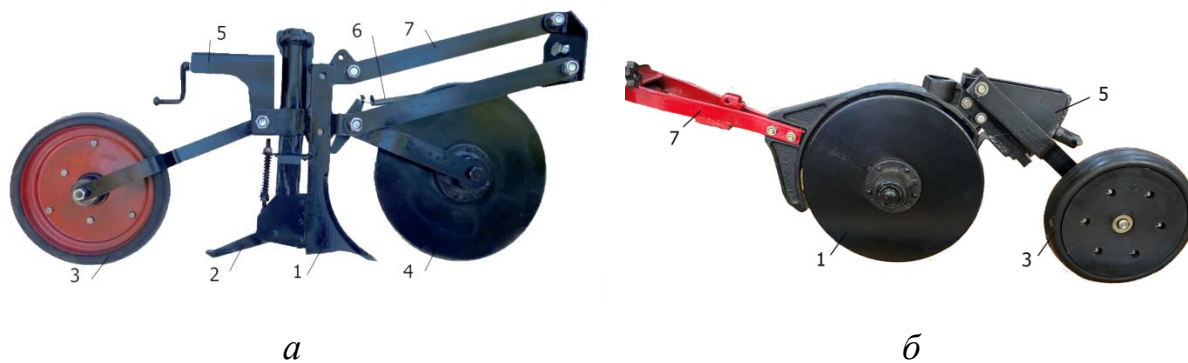
чином, щоб забезпечити традиційну ширину міжрядь до 15см, найбільш поширену при сівбі зернових колосових культур [1,4]. Саме це є основною причиною їх широкого використання виключно на сівалках для сівби просапних технічних культур з шириною міжрядь 60 та більше сантиметрів [1].

Постановка завдання. Отже, метою даної роботи є методика та результати проведення польових порівняльних випробувань сошників з гострим кутом входження в ґрунт, які представлені експериментальною посівною секцією та серійним дводисковим сошником з прикочуючим котком.

Виклад основного матеріалу. Сошники з гострим кутом входження в ґрунт не потребують великих зусиль для заглиблення, але мають суттєвий недолік – накопичення рослинних решток на своїх стійках [5]. Виробники посівної техніки постійно працюють над вирішенням даної задачі і пропонують ряд рішень, серед яких найбільш поширеним є використання дисків, встановлених попереду сошників, як в складі посівної секції, так і автономно на певній відстані від сошника. Для заглиблення в ґрунт при цьому використовується маса всієї сівалки [6].

Враховуючи те, що нульові та мінімальні способи обробітку важких ґрунтів не завжди вважаються однозначно ефективними, а нестача вологи в останні роки породжує нові проблеми, все більше працівників аграрної сфери схиляється до застосування безвідвальних глибоких способів обробітку. В даному випадку усувається необхідність великої маси посівних секцій для заглиблення диска в ґрунт з метою перерізання рослинних решток по напрямку ходу сошника, який може мати гострий кут входження в ґрунт і, можна припустити, буде забезпечувати більш рівномірне загортання посівного матеріалу по глибині порівняно з традиційними дисковими сошниками. До того ж, такі посівні секції можуть використовуватися і при традиційних способах сівби, потребуючи менших енергозатрат.

З метою часткової перевірки достовірності викладених припущень запропонована конструкція посівної секції для сівби зернових колосових культур по ґрунтовому фону, сформованому в результаті безвідвальних способів обробітку з наявністю рослинних решток у верхніх шарах ґрунту. Передбачається, що дана конструкція сприятиме вирішенню двох важливих задач – підвищення рівномірності розподілу посівного матеріалу по глибині та належної надійності виконання технологічного процесу. Основою даної посівної секції є сошник 1 (рис.1, а) з гострим кутом входження в ґрунт, конструкція якого передбачає використання утримуючої п'ятки 2 [7] (рис.1). Задача останньої полягає в утриманні посівного матеріалу в заданому горизонті на встановленій глибині до повного осипання ґрунту зі стінок боріздки, утвореної сошником.



а – експериментальна посівна секція; б – серійний сошник з прикочуючим котком сівалки СЗ 5,4

Рисунок 1 – Загальний вигляд порівнюваних робочих органів:

Джерело: розроблено авторами із використанням [1, 5]

Функцію ущільнення ґрунту навколо посівного матеріалу, а також регулювання глибини його загорання виконує прикочуючий коток 3 з механізмом регулювання 5. Можливість роботи секції в умовах, коли на поверхні поля чи у верхніх шарах ґрунту знаходяться рослинні рештки, забезпечує диск 4. Він шарнірно закріплений вилкою на одній осі з нижніми повідками паралелограмної підвіски 7 і притискається до ґрунту пружиною 6. Стійкість ходу посівної секції по глибині залежить від маси сівалки, частина якої передається через підпружинену штангу піднімання секції в транспортне положення (на рис.1 не показано). Паралелограмна підвіска забезпечує постійне чітке вертикальне положення стійки сошника, а отже, сталість кута його входження в ґрунт та необхідне для ефективної роботи положення утримуючої п'ятки.

Серед загальноприйнятих показників якості виконання технологічного процесу робочими органами аналогічного призначення є дотримання заданої глибини загорання насіння та його розподілу по глибині залягання. Перший показник оцінюється співставленням заданих та реальних значень глибини загорання насіння, а другий – коефіцієнтом варіації фактичних значень розподілу насіння по глибині залягання.

Для отримання об'єктивної інформації по даних показниках були проведені польові порівняльні випробування представленої посівної секції та серійного дискового сошника з прикочуючим котком, якими обладнуються зернові сівалки. Експериментальна секція була встановлена на зернову сівалку марки СЗ-3,6 «Астра» замість одного з серійних порівнюваних сошників (рис.2). Досліди проводили в одному з фермерських господарств Кіровоградської області у вересні при плановій сівбі озимого ячменю. Попередній обробіток поля – чизелювання з поверхневим дискуванням.



Рисунок 2 – Порівнювані робочі органи в складі сівалки СЗ-3,6 «Астра»
Джерело: розроблено авторами із використанням [7]

Програма експерименту передбачала сівбу на п'яти установочних глибинах та шести робочих швидкостях (табл.1), які прийняті в якості впливових факторів на параметри оптимізації – коефіцієнт варіації ρ та фактичну глибину загорання h_{ϕ} .

Фактичні значення глибини залягання насіння визначали за етильованою частиною проростків ячменю. Залікові ділянки становили 25 м. Заміри величини етильованої частини проростків робили через кожні 20 см по довжині рядка. З кожної залікової ділянки отримували в середньому 100 значень, з яких у подальшому визначали середнє значення та коефіцієнт варіації, які були зведені в таблиці (табл.2,3,4,5).

Таблиця 1 – Вихідні дані до проведення експериментальних досліджень

№ п.п.	Фактори		Рівні варіювання		Інтервал варіювання
	Найменування	Позначення	Верхній (+)	Нижній (-)	
1	Установочна глибина ходу сошників (h, мм)	X ₁	120	40	20
2	Робоча швидкість агрегату (V, м/с).	X ₂	3,4	1,4	0,4

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 2 – Значення коефіцієнтів варіації рівномірності загортання насіння по глибині дисковим сошником з прикочуючим котком

$\begin{matrix} h_{0,MM} \\ V, м/с \end{matrix}$	40	60	80	100	120
1,4	19,83	20,08	19,74	18,81	17,31
1,8	21,43	21,54	21,05	19,99	18,34
2,2	23,25	23,11	22,49	21,28	19,49
2,6	24,99	24,81	24,05	22,70	20,77
3,0	26,95	26,63	25,73	24,24	22,14
3,4	29,04	28,57	27,53	25,89	23,68

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 4 – Значення коефіцієнтів варіації рівномірності загортання насіння по глибині експериментальною посівною секцією

$\begin{matrix} h_{0,MM} \\ V, м/с \end{matrix}$	40	60	80	100	120
1,4	16,32	16,08	15,04	13,20	10,56
1,8	16,96	16,70	15,64	13,79	11,13
2,2	17,48	17,20	16,13	14,25	11,57
2,6	17,88	17,58	16,49	14,59	11,90
3,0	18,15	17,84	16,73	14,88	12,11
3,4	18,31	17,98	16,85	14,92	12,19

Джерело: розроблено авторами

В результаті обробки отриманих даних з використанням програмного забезпечення «Статистика», отримані рівняння регресії та їх графічні інтерпретації у вигляді поверхонь відгуку (рис.3).

Аналіз отриманих результатів свідчить, що загальний характер залежностей порівнюваних варіантів є досить схожим. Так, коефіцієнт варіації r зі збільшенням установчої глибини h зменшується, але дана залежність для експериментальної секції є вищою і, навпаки, залежність даного показника від робочої швидкості для експериментальної секції значно нижча ніж для дводискового сошника з прикочуючим котком. Залежності фактичної глибини загортання насіння досить схожі за характером, але відрізняються фактичними значеннями. Відхилення середнього значення фактичної глибини загортання насіння в напрямку зменшення для дводискового сошника становить 29,7%, (діапазон зміни 21,1...38,37%), а для експериментальної секції – 15,25% (діапазон зміни 8,83...21,67%). Різниця є відчутною і характерною для сошників з тупим кутом входження в ґрунт. Зі збільшенням робочої швидкості вони

Таблиця 3 – Значення фактичної глибини загортання насіння дисковим сошником з прикочуючим котком

$\begin{matrix} h_{0,MM} \\ V, м/с \end{matrix}$	40	60	80	100	120
1,4	32,32	47,67	63,14	78,81	94,64
1,8	31,26	46,24	61,38	76,70	92,18
2,2	29,97	44,59	59,39	74,35	89,47
2,6	28,44	42,71	57,15	71,76	86,53
3,0	26,66	40,58	54,67	68,93	83,35
3,4	24,65	38,22	51,95	65,86	79,99

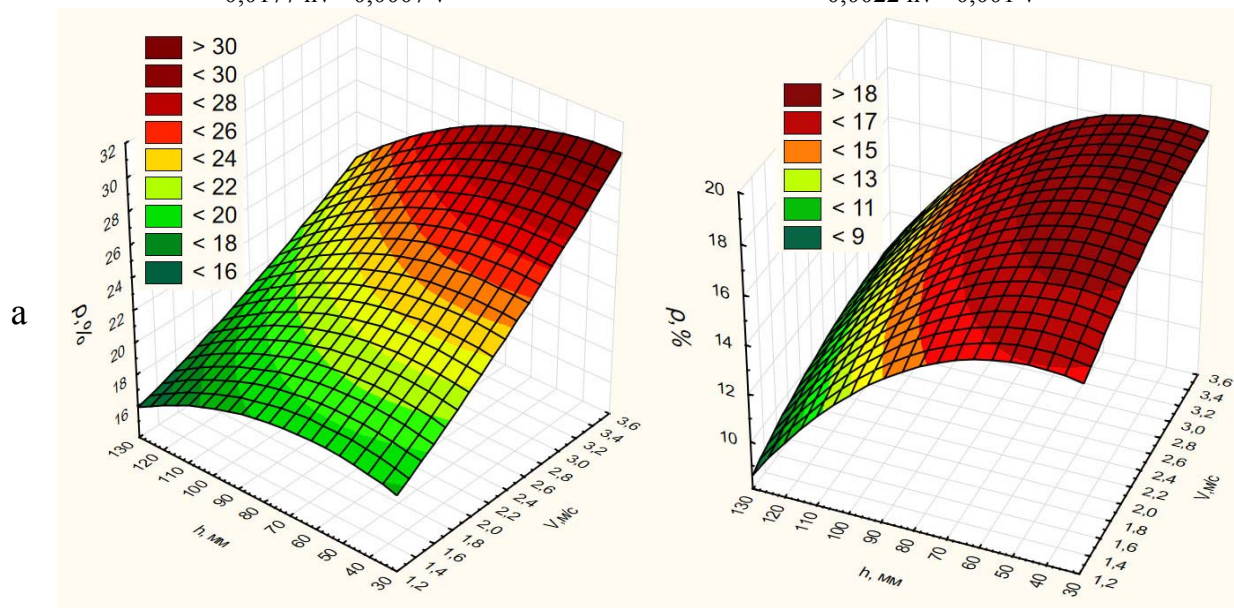
Таблиця 5 – Значення фактичної глибини загортання насіння експериментальною посівною секцією

$\begin{matrix} h_{0,MM} \\ V, м/с \end{matrix}$	40	60	80	100	120
1,4	38,05	55,89	73,73	91,57	109,41
1,8	36,83	54,73	72,65	90,56	108,47
2,2	35,55	53,53	71,50	89,48	107,46
2,6	34,20	52,25	70,30	88,35	106,40
3,0	32,80	50,92	69,04	87,16	105,28
3,4	31,33	49,52	67,71	85,90	104,09

суттєво виглиблюються, що ще раз підтверджено результатами експерименту. Сошники з гострим кутом входження в ґрунт, яким обладнана посівна секція, є менш залежними від даного явища, що відкриває можливість виконувати процеси сівби на більш високих робочих швидкостях без зниження якісних показників. Ступінь відхилення фактичного значення глибини загортання насіння зменшується зі збільшенням установчої глибини. Середнє значення коефіцієнта варіації для дводискового сошника становить 22,84%, а для секції – 15,34%.

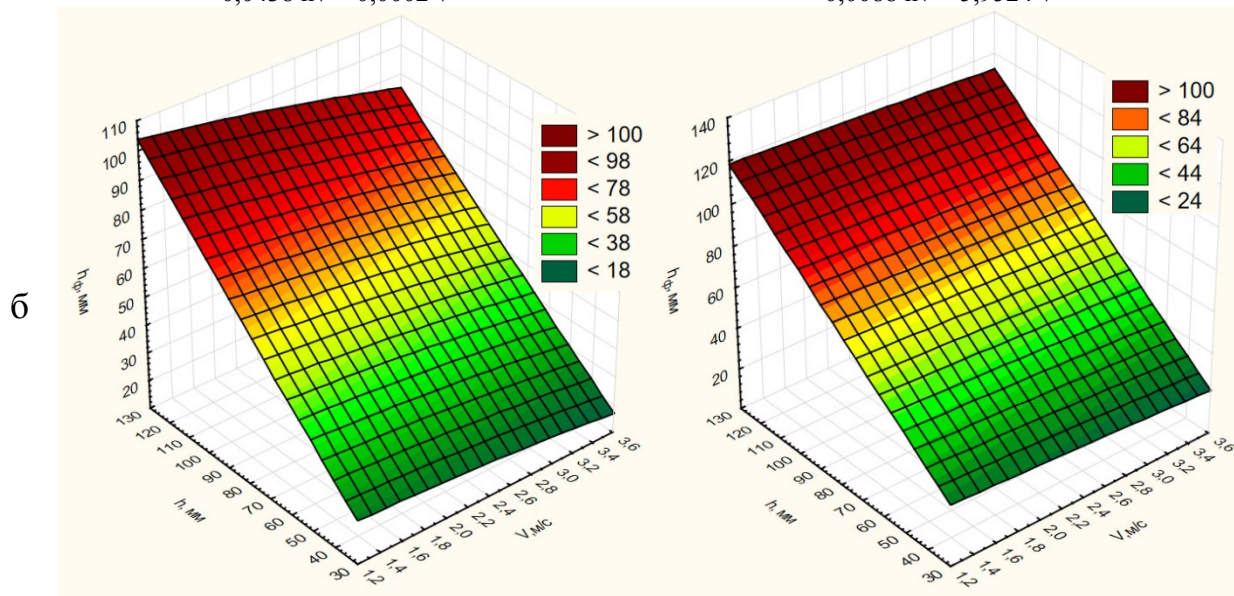
$$\rho, \% = 11,968 + 3,5271 h + 0,1091v + 0,3705 h^2 - 0,0177 hv - 0,0007 v^2$$

$$\rho, \% = 11,0757 + 2,8987 h + 0,0913v - 0,3786 h^2 - 0,0022 hv - 0,001 v^2$$



$$h_{ф, мм} = 1,6031 + 1,4599 h + 0,8061v - 0,7397 h^2 - 0,0438 hv + 0,0002 v^2$$

$$h_{ф, мм} = 6,6619 + 2,7963 h + 0,8796v - 0,1902 h^2 + 0,0088 hv + 5,9524 v^2$$



1

2

1- дводисковим сошником з прикочуючим котком; 2 експериментальною посівною секцією
Рисунок 3 – Залежності показника рівномірності загортання насіння по глибині (а)
та фактичної глибини загортання насіння (б)

Джерело: розроблено авторами

Висновки. 1. Запропонована конструкція посівної секції для сівби зернових колосових культур по ґрунтовому фоні, сформованому в результаті безвідвальних способів обробітку з наявністю рослинних решток у верхніх шарах ґрунту, що складається із сошника з гострим кутом входження в ґрунт, до складу якого включено утримуючу п'ятку.

2. Встановлено, що посівна секція продемонструвала кращу на 7,5% рівномірність розподілу насіння по глибині. З високою ймовірністю це є позитивним наслідком роботи утримуючої п'ятки.

3. Фактична глибина загортання насіння обома робочими органами зменшується зі збільшенням робочої швидкості, сошники виглиблюються, але ступінь залежності для експериментальної секції значно нижчий, ніж для дводискового сошника.

Список літератури

1. Машини для сівби, садіння та догляду за посівами : навч. посіб. / В. Сало, С. Лещенко, П. Лузан, Л. Сало. Кропивницький : Лисенко В.Ф., 2022. 220 с. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/items/1fac47a7-80b6-4a6f-beb7-eb76e3f661fe> (дата звернення: 02.10.2024)
2. Сало В.М. Нюанси прямого способу сівби зернових культур / В.М. Сало, О.М. Гайденко. *Агробізнес сьогодні*. № 20. 2016. URL: <https://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-ark/item/1240-niuanisy-priamoho-sposobu-sivby-zernovykh-kultur.html> (дата звернення: 02.10.2024)
3. Деградації ґрунтів одна із основних проблем Українських чорноземів. *Журнал ECOBUSINESS. Екологія підприємства*. №9. 2020. URL: <https://ecolog-ua.com/articles/degradaciyi-gruntiv-odna-iz-osnovnyh-problem-ukrayinskyh-chornozemiv> (дата звернення: 02.10.2024)
4. Технологія виробництва продукції рослинництва : навч. посібник: в 2-х ч. Ч. 1. / С.І. Мельник, О.Д. Муляр, М.Й. Кочубей, П.Д. Іванцов. Київ : Аграрна освіта, 2010. 282 с. URL: <http://repozitory.zhatk.zt.ua/handle/123456789/249> (дата звернення: 04.10.2024)
5. Лузан О.Р. Обґрунтування параметрів загортаючих робочих органів для прямої сівби зернових культур : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11, Кіровоград. нац. техн. ун-т. Кіровоград, 2013. 200 с.
6. Механічна стернова сівалка Green Plains 1500/2000 з дисковими сошниками. URL: <http://www.agro.kr.ua/uk/sivalka-cph-15002000> (дата звернення: 05.10.2024)
7. Посівна секція : пат. 156272 Україна: МПК А01 С7/00, А01 С7/20 / Вовнянко Б.Г., Лещенко С.М., Сало В.М., Сало Л.В. Власник: Центральноукраїнський національний технічний університет. № u2023 06147, заявл. 18.12.2023; опубл. 29.05.2024, бюл. № 22/2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1801165/> (дата звернення: 05.10.2024)
8. Машини для обробітку ґрунту та сівби : посібник ; за ред. Кравчука В.І., Мельника Ю.Ф. Дослідницьке : УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, 2009. 288 с.
9. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку : підручник / Д.Г. Войтюк, Л.В. Аніскевич, В.М. Барановський та ін.; за ред. Д.Г. Войтюка: 2-ге вид., перероб. та допов. Київ : Науково-методичний центр ВФПО, 2019. 508 с.
10. Artemenko, D., S. Leshchenko, V. Onopa, V. Majara, and V. Deikun. Analysis of the combined coulter point of the precision seed drill. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 24(4), 2022: 57-71. URL: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/7435/3947> (дата звернення: 10.10.2024)
11. Kuş, E. and Yıldırım, Y. Effects of Seed Drop Height and Tillage System on the Emergence Time and Rate in the Single Seed Planters. *Alinteri Journal of Agriculture Sciences*. 2020. 35(1): pp. 69-76. <https://doi.org/10.28955/alinterizbd.739387>
12. Добранський С. С. та ін. Методика експериментальних досліджень роботоздатності дводискових сошників зернових сівалок на ґрунтах різної вологості / С.С. Добранський, І.О. Бучко, А.В. Кравчук. *Вісник Житомирського агротехнічного фахового коледжу*. 2024. № 5(1). С. 17-27.
13. Investigation of the influence of winter wheat's location on plant's germination energy / V. Zubko, T. Kuzina. *Teka. Commission of motorization and energetics in agriculture*. Lviv, 2015. Vol. 15. No. 4. С. 103-106.
14. Новітні техніко-технологічні рішення для різних систем обробітку ґрунту і сівби при вирощуванні зернових культур: Проект «АгроОлімп 150» / В. Кравчук, В. Погорілий, Л. Шустік. *Техніка і технології АПК*. 2010. №7. С. 9-14.
15. Механізація, електрифікація та автоматизація сільськогосподарського виробництва : підруч. у 2 т: Т. 1 / А.В. Рудь, І.М. Бендера, Д.Г. Войтюк та ін.; за ред. А.В. Рудя. Київ : Агроосвіта, 2012. 584 с.

Referencis

1. Salo, V.M., Leshchenko, S.M., Luzan, P.G., & Salo, L.V. (2022). *Machines for sowing, planting and caring for crops: Training manual*. Kropyvnytskyi: Lysenko V.F. <https://dspace.kntu.kr.ua/items/1fac47a7-80b6-4a6f-beb7-eb76e3f661fe> [in Ukrainian].
2. Salo, V.M., & Haidenko, O.M. (2016). Nuances of the direct method of sowing grain crops]. *Ahrobiznes sohodni*, 20. <https://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/1240-niuansy-priamoho-sposobu-sivby-zernovykh-kultur.html> [in Ukrainian].
3. Soil degradation is one of the main problems of Ukrainian chernozems. *Zhurnal ECOBUSINESS. Ekolohiia pidpriemstva*, 9. <https://ecolog-ua.com/articles/degradaciyi-gruntiv-odna-iz-osnovnyh-problem-ukrayinskyh-chornozemiv>[in Ukrainian].
4. Melnyk, S.I., Muliar, O.D., Kochubei, M.I., & Ivantsov, P.D. (2010). *Tekhnolohiia vyrobnytstva produktsii roslynnystva: Navch. posibnyk: v 2-kh ch. Ch. 1. [Plant production technology]*. Ahrarna osvita <http://repozitory.zhatk.zt.ua/handle/123456789/249>[in Ukrainian].
5. Luzan, O.R. (2013). *Justification of parameters of wrapping working bodies for direct sowing of grain crops*. Kirovohrad. [in Ukrainian].
6. Green Plains 1500/2000 mechanical stubble seeder with disc coulter. *Agrsgroup*. <https://www.agrs.group/http://www.agro.kr.ua/uk/sivalka-cph-15002000> [in Ukrainian].
7. Vovnianko, B.H., Leshchenko, S.M., Salo, V.M., & Salo, L.V. (2024). Patent na korysnu model (Ukraine) № 156272; MPK A01 S7/00, A01 S7/20. Posivna sektsiia. [Utility model patent (Ukraine) No. 156272; MPK A01 S7/00, A01 S7/20. Seeding section.]. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1801165/> [in Ukrainian].
8. Kravchuka, V.I., & Melnyka, Yu.F. (Eds.) (2009). *Machines for tillage and sowing. Manual*. Doslidnytske: UkrNDIPVT im. L. Pohoriloho. [in Ukrainian].
9. Voitiuk, D.H., Aniskevych, L.V., Baranovskyi, V.M. et al.; (). *Agricultural machines. Basics of theory and calculation: Textbook*. D.H. Voitiuka (Ed.). Kyiv: Naukovo-metodychnyi tsentr VFPO. [in Ukrainian].
10. Artemenko, D., S. Leshchenko, V. Onopa, V. Majara, & Deikun V.. (2022). Analysis of the combined coulter point of the precision seed drill. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 24(4), 57-71. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/7435/3947>[in English].
11. Kuş, E., & Yıldırım, Y. (2020) Effects of Seed Drop Height and Tillage System on the Emergence Time and Rate in the Single Seed Planters. *Alinteri Journal of Agriculture Sciences*, 35(1), 69-76. [in English]. <https://doi.org/10.28955/alinterizbd.739387>
12. Dobranskyi, S.S., Buchko, I.O., & Kravchuk, A.V. (2024). Methodology of experimental studies of the performance of two-disc coulters of grain planters on soils of different humidity. *Visnyk Zhytomyrskoho ahrotekhnichnoho fakhovoho koledzh.*, 5(1), 17-27. [in Ukrainian].
13. Zubko, V., & Kuzina, T. (2015). Investigation of the influence of winter wheat's location on plant's germination energy. *Teka. Commission of motorization and energetics in agriculture*, 15, 4, 103-106. [in English].
14. Kravchuk, V., Pohorilyi, V., & Shustik, L. (2015). The latest technical-technological solutions for various systems of soil cultivation and sowing in the cultivation of grain crops: Project "AgroOlymp 150". *Tekhnika i tekhnolohii APK*, 7, 9-14. [in Ukrainian].
15. Rud, A.V., Bendera, I.M., Voitiuk, D.H. et al (2012). *Mechanization, electrification and automation of agricultural production*. (Vols 1-2, Volume 1). A.V. Rudia. (Es.). Kyiv. Ahrosvita [in Ukrainian].

Vasyl Salo, Prof., DSc., **Serhii Leshchenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Bohdan Vovnianko**, post-graduate, **Serhii Moroz**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Comparative Performance of Two Types of Coulter

The article considers specific features of ensuring quality indicators of the technological process of sowing crops using coulters of various types. The existing designs of coulters are analysed, indicating their advantages and disadvantages. It is emphasised that the use of disc coulters for direct sowing is limited due to the need to apply significant efforts to deepen them into the soil. A well-known alternative design of operating parts for seed placement into the soil is a coulter with a sharp angle of entry, but its design and parameters need further improvement. The paper proposes the design of a sowing section for sowing spiked grain crops on the soil after no-till tillage methods with the presence of plant residues in the upper soil layers. The basis of this sowing section is a coulter with a sharp angle of entry into the soil, the design of which provides the use of a holding heel.

The article presents methodology for conducting field comparative tests of coulters with a sharp angle of soil penetration, which are represented by an experimental sowing section and a serial double-disc coulter

with a packer roller. The section consists of a coulter with a sharp angle of penetration equipped with a holding heel. The performance was assessed by two indicators – uniformity of seed placement over the depth of seedbed and compliance with the specified seed placement depth. The working speed and the set seeding depth were taken as influential factors. The experimental section was mounted on a SZ-3.6 “Astra” grain seeder instead of one of the serial coulters being compared. The preliminary tillage was chiselling with surface disking. The coulters with a sharp angle of entry into the soil, which are equipped with the sowing section, are less dependent on the sowing speed, which makes it possible to perform sowing processes at higher operating speeds without reducing quality indicators.

It was found that the sowing section demonstrated a 7.5% better uniformity of seed distribution over the depth. This is most likely a positive consequence of the work of the holding heel. The actual seeding depth of both operating parts decreases with increasing working speed, the coulters deepen, but the degree of dependence for the experimental section is much lower than for the double disc coulter.

sowing, coulter, seed, sowing depth, process quality, coulter with a sharp angle of entry into the soil, disc coulter

Одержано (Received) 18.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 27.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

УДК 631.437; 631.31

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.167-174>

В.В. Амосов, доц., канд. техн. наук, **О.М. Васильковський**, проф., канд. техн. наук, **А.С. Богуславський**, магістр

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: v_vas_a@ukr.net, olexa74@ukr.net

Використання фізико-механічних властивостей лаванди для сепарації насіння

Метою досліджень є підвищення продуктивності та якості сортування насіння лаванди. Методи досліджень: математичне моделювання, лабораторний експеримент, методи математичної статистики. Визначено фізико-механічні властивості насіння лаванди вузьколистої. Використано знання цих властивостей для сортування насіння. На основі моделі процесу руху насіння по похилій площині визначено конструктивні параметри та виготовлено експериментальну установку для сепарації насіння лаванди. Проведені лабораторні експерименти підтвердили її працездатність.

насіння лаванди, фізико-механічні властивості, сепарація, експериментальна установка

Постановка проблеми. Лаванда – рослина, яка широко використовується як сировина у виробництві ліків, косметики, парфумів. Основні плантації лаванди залишились на території тимчасово окупованого Криму [1]. Тому виникла потреба розширення сировинної бази вирощування ефіроолійних культур у інших регіонах України. Зацікавленість до вирощування та переробки лаванди потребує розширення використання засобів механізації технологічних процесів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експериментальні дослідження Свиденко Л. та Єжова В.[2] показали, що умови Степу Південного придатні для промислового вирощування лаванди.

Успішно розвивається лавандовий бізнес у інших регіонах. Наприклад, лаванда, вирощена на Лавандовій горі поблизу Перечина (займає площу понад 10 гектарів у Закарпатській області) [3] є основним компонентом багатьох органічних продуктів місцевого виробництва (напоїв, сиропів, солодоців, приправ, косметичних засобів).

Невеликі ділянки лаванди культивують у Львівській, Закарпатській, Тернопільській, Чернівецькій, Волинській, Кіровоградській, Житомирській, Київській, Полтавській та інших областях України [4]. Вони використовуються також для залучення туристів.

Процес вирощування лаванди не надто складний, але потребує високих витрат ручної праці, чіткості та своєчасності виконання всіх технологічних операцій. При збільшенні площі ділянок під лавандою (використання ділянок розміром до одного гектара економічно недоцільне [5]) потрібно або залучати додаткових сезонних робітників або використовувати засоби механізації. Технологічні операції з обробки ґрунту, внесення добрив виконують універсальними знаряддями (плугами, боронами, культиваторами, розкидачами). Висадку розсади здійснюють вручну [6]. Лаванду збирають також вручну (можливо використовувати електроножиці), бо довжина її квітконосів не перевищує 10 см.

А от лавандин – вищий і жорсткіший. Лавандин – це міжвидовий гібрид двох різновидів лаванди: вузьколистої та широколистої, врожайність якого у 2–3 рази більша, ніж у лаванди. Його простіше вирощувати і легше збирати комбайном, він дає високий вихід ефірної олії. У Євросоюзі набули розповсюдження комбайни для збирання лавандин у італійської компанії «Боніно» (Bonino) [7]. В Болгарії випускають лавандові комбайни "LAVENDER" фірми «Madara Agro LTD» [8] та серію однорядних начіпних комбайнів MKL фірми «Бізон-Інс» (Bizon-Ins) [9] у варіантах для переміщення зрізаних стебел з квітками до платформи або причепа. Наукові дослідження властивостей рослин лаванди, які важливі при їх комбайновому збиранні, були проведені [10].

Для ручного збору насіння лаванди зрізані стебла з насінневими коробочками розміщують у паперовому пакеті «вниз головою» та залишають сушитися на кілька днів. Потім акуратно струшують насінневі коробочки над пакетом або іншою ємністю. Знімають їх зі стебла, розтирають між пальцями, поки насіння не вискочить. Насіння лаванди вузьколистої мають довжину 2,1–2,8 мм, ширину 0,9–1,3 мм і товщину 0,5–0,8 мм, довгасто-еліптичної форми, злегка сплюснуті; гладенькі, від світло-коричневого забарвлення до темно-коричневого, майже чорного кольору, глянцево-блискучі [10]. У ґрунтово-кліматичних умовах України ми можемо отримати насіння зі специфічними фізичними характеристиками, які потребують визначення. Лавандини насінням не розмножуються.

Для механізованого відокремлення бутонів від стебел і листя запатентовано пристрій і спосіб переробки сушеної лаванди [11]. Пристрій для просіювання насіння лаванди [12] автоматично сортує насіння за розміром, виділяючи насінини з найкращими посівними якостями. Аналогічне призначення, але складнішу конструкцію з багатостадійним процесом сепарації має установка для сортування насіння лаванди [13].

Метою досліджень є підвищення продуктивності та якості сортування насіння лаванди шляхом вивчення та використання їх фізико-механічних властивостей.

Методи досліджень. Математичне моделювання. Лабораторний експеримент. Обробка результатів проводилась методами математичної статистики.

Результати досліджень і їх обговорення. Аналіз публікацій про властивості лаванди показав, що вони недостатньо вивчені, зокрема ті, які стосуються первинної

переробки насіння. Для механізації технологічного процесу відокремлення насіння лаванди від насінневих коробочок необхідно вивчити такі фізико-механічні властивості як довжина, ширина, товщина насінини, коефіцієнт тертя по поверхнях різних матеріалів, коефіцієнт опору повітря.

Для дослідження фізико-механічних властивостей використовуємо достиглі суцвіття лаванди вузьколистої, яка набула найбільшого розповсюдження у різних ґрунтово-кліматичних зонах України.

Розміри 100 насінин вимірюємо оптичним методом за допомогою цифрового мікроскопа [14], проводимо статистичну обробку результатів та заносимо їх до табл. 1.

Таблиця 1 – Результати вимірювань розмірів насінин

Показник	Довжина a , мм	Ширина b , мм	Товщина c , мм
Мінімальна	1,67	0,93	0,49
Максимальна	2,64	1,32	0,84
Середня	2,15	1,11	0,64
Середньоквадратичне відхилення	0,18	0,08	0,07
Закон розподілу	Нормальний	–	–

Джерело: розроблено авторами

Методику визначення коефіцієнта тертя обираємо стандартну, з використанням установки ТММ-21 (рис. 1). Кладемо досліджувану насінину або коробочку з насінням на поверхню досліджуваного матеріалу, закріпленого на установці. Плавню змінюємо кут нахилу поверхні установки від нуля до кута, при якому частка починає рухатись. Таким чином визначаємо коефіцієнт статичного тертя частки по даному матеріалу ($f_{ст} = \text{tg}(\varphi)$).

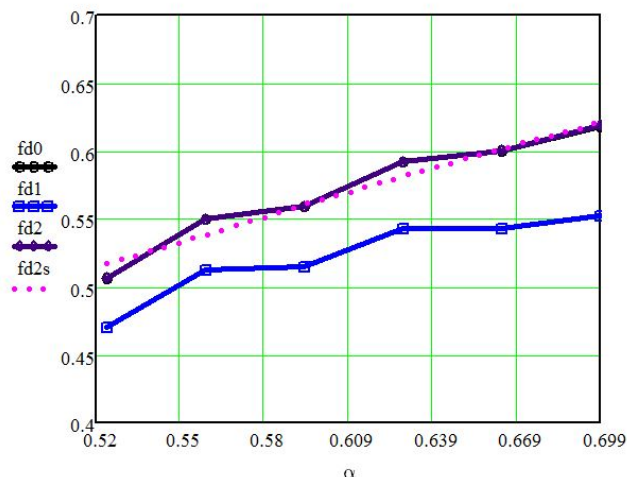


Рисунок 1 – Установка ТММ-21

Джерело: розроблено авторами

Вимірювання проводимо у десятиразовій повторності. Для насіння лаванди кут статичного тертя виявився $26 \pm 0,5^\circ$, для насінневих коробочок – $29 \pm 0,5^\circ$. Відповідно, коефіцієнт статичного тертя насіння лаванди по алюмінію дорівнює $f_{ст} = 0,49$, насінневих коробочок – $f_{ст} = 0,55$.

Коефіцієнт динамічного тертя визначаємо, пускаючи насінини по поверхні, нахиленій під кутом, який перевищує кут статичного тертя, та фіксуємо електронним секундоміром час подолання ділянки поверхні довжиною 1 метр. Вимірювання проводимо при шести значеннях кутів ($\alpha=30^\circ; 32^\circ; 34^\circ; 36^\circ; 38^\circ; 40^\circ$) у десятиразовій повторності. Обробляємо результати методами математичної статистики та будуємо графіки залежностей (рис. 2) [15].



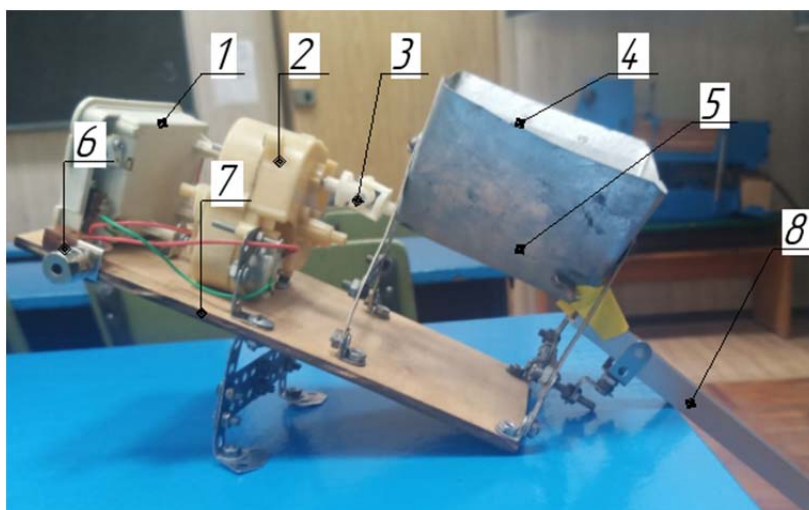
fd0 – без урахування опору повітря; fd1 – з урахуванням опору повітря (пропорційно першому ступеню швидкості руху частки); fd2 – з урахуванням опору повітря (пропорційно другому ступеню швидкості руху частки); fd2s – «згладжені» значення

Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта динамічного тертя fd від кута α нахилу поверхні до горизонту

Джерело: на підставі [15]

Порівнюємо отримані з урахуванням та без урахування опору повітря значення часу руху насінини.

Використовуємо отримані результати при розробці конструкції експериментальної установки для сортування насіння лаванди (рис. 3).



1 – блок живлення; 2 – електродвигун; 3 – вал з карданною передачею; 4 – бункер; 5 – шнек; 6 – кнопка ввімкнення/вимкнення; 7 – основа; 8 – розгінний жолоб.

Рисунок 3 – Будова установки для сортування насіння лаванди

Джерело: розроблено авторами

Вона складається з блока живлення 1; електродвигуна 2;вала з карданною передачею 3;бункера для неочищеного насіння 4;шнека 5;кнопки ввімкнення/вимкнення електродвигуна 6;основи 7; розгінного жолоба 8; похилої площини та набору місткостей для відсортованого насіння [16].

Установка працює наступним чином. Завантажуємо довільну порцію неочищеного насіння у бункер 4, вмикаємо привід шнека 2, спрямовуємо насіння в алюмінієвий розгінний жолоб П-подібного профілю 8, розташований під кутом α до горизонту.

Частки насіння та бутонів потрапляють з розгінного жолоба на площину, яка нахилена у поперечному (відносно вектору швидкості руху) напрямку на кут γ , з початковою швидкістю v_0 , вектор якої спрямований під кутом α до горизонту в поздовжній площині. Оскільки насінини, бутони, домішки мають різні фрикційні властивості, то вони будуть рухатись по площині за різними траєкторіями і, відповідно, потраплять до різних місткостей (коробочок), які пронумеровані від 1 до 14 у напрямку переміщення насінин. Ширина кожної коробочки дорівнює 1 см, довжина – 3 см. Розміри похилої площини підбираємо експериментально так, щоб усі насінини потрапили до коробочок (за необхідності, можемо скорегувати і кількість коробочок).

Підраховуємо кількість насінин, які потрапили до кожної коробочки, та записуємо до табл. 2.

Таблиця 2 – Результати вимірювань розподілу насінин за довжиною фрикційної поверхні

Порядковий номер коробочки N	1	2	3	4	5	6	7
Кількість насіння K	2	4	4	9	23	28	64
Порядковий номер коробочки N	8	9	10	11	12	13	14
Кількість насіння K	119	266	335	285	145	78	33

Будуємо стовбчастий графік залежності $K=f(N)$ (рис. 4).

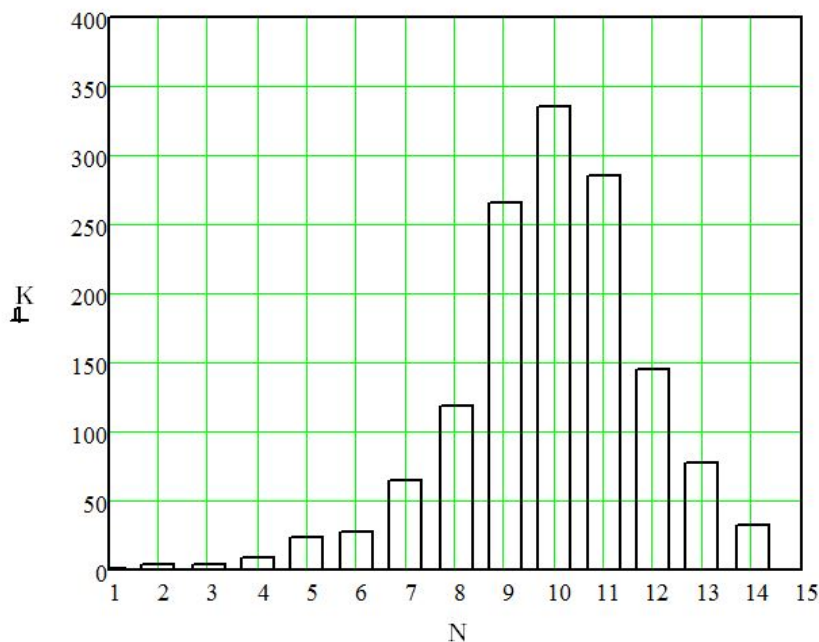


Рисунок4 – Графік залежності розподілу насінин вздовж фрикційної поверхні

Джерело: розроблено авторами

Візуально закон розподілу насінин вздовж фрикційної поверхні близький до нормального.

Висновки. Насіння лаванди мають довжину 1,67–2,64 мм, ширину 0,93–1,32 мм і товщину 0,49–0,84 мм. Розподіл розмірів за довжиною відповідає нормальному закону. Аеродинамічні властивості насінин впливають на закономірності їх руху та потребують подальшого вивчення. Доцільно також проаналізувати зв'язок схожості насінин з їх фрикційними властивостями. Розроблена установка для сортування насіння лаванди в невеликих приватних господарствах дозволить підвищити продуктивність та якість відокремлення насінин лаванди від насінневих коробочок

Список літератури

1. Кременчук Р.І. Формування агроценозу лаванди вузьколистої за різних способів розмноження та технології вирощування в Лісостепу: дис. ... канд. с.-г наук . 06.01.09 «Рослинництво». Інститут садівництва НААН; ННЦ «Інститут землеробства НААН». Київ, 2020. 237 с. URL: <https://zemlerobstvo.com/wp-content/uploads/2020/11/dis-kremenchuk.pdf>
2. Свиденко Л., Єжов В. Перспективи вирощування деяких ефіроолійних культур у Степу Південному. *Bulletin of Agricultural Science*. 2015. Т. 93. № 6. С. 20–24. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201506-04>
3. Бедзір Василь. В ароматних обіймах лаванди. *Урядовий кур'єр*. 24 липня 2021р. URL: <https://ukurier.gov.ua/uk/articles/v-aromatnih-obijmah-lavandi/>
4. Єрмоленко О. Лавандовий бізнес – прибуток на красі та ароматі. *Пропозиція*. 2020. №5 URL: <https://propozitsiya.com/ua/lavandovy-biznes-pribyl-na-krasote-i-aromate>
5. Рівненська сім'я вирощує гектар лаванди. *Волинь*. 26.07.2021р. URL: <https://www.volyn.com.ua/news/188705-z-odnoho-hektara-lavandy-mozhna-otrymaty-1-mln-hrn-za-rik>
6. Квітковзбиральні комбайни. *Агробізнес Сьогодні*. 28 вересня 2020 р. URL: <http://agrobusiness.com.ua/ahrotekhnolohiyi/item/18952-kvitkozbyralni-kombainy.html>
7. Bonino Super Custom Machines. *BONINO s.r.l.* <https://www.boninoitaly.com/en/aromatic-herbs-harvester-machines/>
8. LAVENDER HARVESTER "LAVENDER". Series KL. *MADARA AGRO*. URL: <https://www.madaraagro.com/en/product/270/lavender-harvester-lavender/>
9. *Lavender Harvester. BIZON-INS*. <https://www.bizon-ins.com/en/>
10. Physical and Aerodynamic Properties of Lavender in relation to Harvest Mechanisation / С. I. Dimitriadis, J. L. Brighton, M. J. O'Dogherty, M. I. Kokkora, and A. I. Darras. *International Journal of Agronomy*. Volume 2014. P.1–8. URL: <https://doi.org/10.1155/2014/276926>
11. Dried lavender flower separator system and method : пат. US7028844B2 United States. № 10/892,753; заявл. 16.07.04; опубл. 18.04.06. URL: <https://patents.google.com/patent/US7028844B2/en>
12. Lavender seed screening device : пат. CN104226602A China. № 201410465856.6; заявл. 12.09.14; опубл. 24.12.14. URL: [https://patents.google.com/patent/CN104226602A/en?q=\(lavender+seed\)&oq=lavender+seed](https://patents.google.com/patent/CN104226602A/en?q=(lavender+seed)&oq=lavender+seed)
13. A kind of lavender seed screening plant : пат. CN206997089U China. № 201720291594.5; заявл. 23.03.17; опубл. 13.02.18. URL: [https://patents.google.com/patent/CN206997089U/en?q=\(lavender+seed\)&oq=lavender+seed](https://patents.google.com/patent/CN206997089U/en?q=(lavender+seed)&oq=lavender+seed)
14. phenoSeeder – A robot system for automated handling and phenotyping of individual seeds. Jahnke, S., Roussel, J., Hombach, T., Kochs, J., Fischbach, A., Huber, G., Scharr, H. *Plant Physiology*. November 2016. Vol.172. P. 1358-1370. URL: <https://academic.oup.com/plphys/article/172/3/1358/6115817>
15. Амосов В., Васильковський О., Богуславський А., Ветохін В. Визначення коефіцієнта динамічного тертя насіння лаванди. *Наукові доповіді XXIV Міжнародної наукової конференції «Науково-технічні засади розроблення, випробування та прогнозування сільськогосподарської техніки і технологій»*, присвяченої 90-річчю від дня народження Леоніда Погорілого, 13 вересня 2024 року, УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого; Україна, Дослідницьке, 2024. С. 167–171. URL: https://www.ndipvt.com.ua/uploads/ЗБІРНИК_ТЕЗ_2024.pdf
16. Моделювання руху насіння лаванди по похилій площині / В. Амосов, О. Васильковський, А. Богуславський. *Мат. XIV Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки»*. Кропивницький, 8–10 листопада 2023 р. Кропивницький : ЦНТУ, 2023. С.248–250. URL: <http://www.kntu.kr.ua/doc/science/zahody/vikl/2023/8-tez.pdf>

References

1. Kremenchuk, R.I. (2020) The formation of agrocenosis of narrow-leaved lavender according to different methods of reproduction and growing technology in the Forest Steppe: dys. ... kand. s.-h nauk . 06.01.09 «Roslynyntstvo». Instytut sadivnytstva NAAN; NNTs «Instytut zemlerobstva NAAN». Kyiv. <https://zemlerobstvo.com/wp-content/uploads/2020/11/dis-kremenchuk.pdf> [in Ukrainian]
2. Cvydenko, L., & Yezhov, V. (2015) Prospects for the cultivation of some essential oil crops in the Southern Steppe. *Bulletin of Agricultural Science*. 93, 6, 20–24. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201506-04> [in Ukrainian]
3. Bedzir, Vasyly (2021, 24 lypnia). In the fragrant embrace of lavender. *Uriadovyi kurier*. <https://ukurier.gov.ua/uk/articles/v-aromatnih-obijmah-lavandi/> [in Ukrainian]
4. Yermolenko, O. (2020) Lavender business - profit on beauty and aroma. *Propozyttsiia*. №5 <https://propozitsiya.com/ua/lavandovyy-biznes-pribyl-na-krasote-i-aromate> [in Ukrainian]
5. A family from Rivne grows a hectare of lavender. *Volyn*. 26.07.2021r. <https://www.volyn.com.ua/news/188705-z-odnoho-hektara-lavandy-mozhna-otrymaty-1-mln-hrn-za-rik> [in Ukrainian]
6. Flower harvesters. *Ahrobiznes Sohodni*. (28 veresnia 2020 r.). <http://agro-business.com.ua/ahrotekhnolohiyi/item/18952-kvitkozbyralni-kombainy.html> [in Ukrainian]
7. Bonino Super Custom Machines. *BONINO s.r.l.* <https://www.boninoitaly.com/en/aromatic-herbs-harvester-machines/>
8. LAVENDER HARVESTER "LAVENDER". Series KL. *MADARA AGRO*. <https://www.madaraagro.com/en/product/270/lavender-harvester-lavender/>
9. *Lavender Harvester. BIZON-INS*. <https://www.bizon-ins.com/en/>
10. Physical and Aerodynamic Properties of Lavender in relation to Harvest Mechanisation / C. I. Dimitriadis, J. L. Brighton, M. J. O'Dogherty, M. I. Kokkora, and A. I. Darras. *International Journal of Agronomy*. Volume 2014. P.1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/276926>
11. Dried lavender flower separator system and method : pat. US7028844B2 United States. № 10/892,753; zaiavl. 16.07.04; opubl. 18.04.06. <https://patents.google.com/patent/US7028844B2/en>
12. Lavender seed screening device : pat. CN104226602A China. № 201410465856.6; zaiavl. 12.09.14; opubl. 24.12.14. [https://patents.google.com/patent/CN104226602A/en?q=\(lavender+seed\)&oq=lavender+seed](https://patents.google.com/patent/CN104226602A/en?q=(lavender+seed)&oq=lavender+seed)
13. A kind of lavender seed screening plant : pat. CN206997089U China. № 201720291594.5; zaiavl. 23.03.17; opubl. 13.02.18. [https://patents.google.com/patent/CN206997089U/en?q=\(lavender+seed\)&oq=lavender+seed](https://patents.google.com/patent/CN206997089U/en?q=(lavender+seed)&oq=lavender+seed)
14. Jahnke, S., Roussel, J., Hombach, T., Kochs, J., Fischbach, A., Huber, G., Scharr, H. (2016). phenoSeeder – A robot system for automated handling and phenotyping of individual seeds. *Plant Physiology*. November, 172, 1358-1370. <https://academic.oup.com/plphys/article/172/3/1358/6115817>
15. Amosov V., Vasylykovskiy O., Bohuslavskiy A., Vetokhin V. (2024) Determination of the coefficient of dynamic friction of lavender seeds. *Naukovi dopovidi XXIV Mizhnarodnoi naukovoï konferentsii «Naukovo-tekhnichni zasady rozroblennia, vyprovuvannia ta prohnozuvannia silskohospodarskoi tekhniki i tekhnolohii», prysviachenoi 90-richchiiu vid dnia narodzhennia Leonida Pohoriloho*, 13 veresnia 2024 roku, UkrNDIPVT im. L. Pohoriloho; Ukraina, Doslidnytske, S. 167–171. https://www.ndipvt.com.ua/uploads/ЗБІРНИК_ТЕ3_2024.pdf [in Ukrainian]
16. Amosov V., Vasylykovskiy O., Bohuslavskiy A. (2023) Modeling the movement of lavender seeds on an inclined plane. *Mat. XIV Mizhnar. nauk.-prakt. konf. «Problemy konstruiuvannia, vyrobnytstva ta ekspluatatsii silskohospodarskoi tekhniki»*. Kropyvnytskyi, 8–10 lystopada 2023 r. Kropyvnytskyi : TsNTU. S.248–250. <http://www.kntu.kr.ua/doc/science/zahody/vykl/2023/8-tez.pdf> [in Ukrainian]

Volodymyr Amosov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksii Vasylykovskiy**, Prof., PhD tech. sci., **Andrii Bohuslavskiy**, M.Sc

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Use of Physical and Mechanical Properties of Lavender for Medium Separation

The development of the lavender business requires the expansion of the use of mechanization of technological processes, in particular, when sorting lavender seeds. The purpose of the research is to increase the productivity and quality of sorting lavender seeds by studying and using its physical and mechanical properties. Research methods: mathematical modeling, laboratory experiment, methods of mathematical statistics.

An analysis of existing lavender cultivation technologies and technical means for sorting seeds was carried out. The length, width and thickness of narrow-leaved lavender seeds and their frictional properties were determined. The influence of the angle of inclination of the surface on the coefficient of dynamic friction of lavender seeds was studied. The need to take into account the aerodynamic properties of seeds was identified.

Based on the knowledge of these patterns, the design parameters were determined and an experimental installation for separating lavender seeds was manufactured. Its main elements are a screw seed dispenser with an electric drive, an inclined acceleration chute, an inclined friction sorting plane and a set of containers for sorted seeds. Laboratory experiments have confirmed its efficiency and high quality of sorting lavender seeds.

Lavender seeds have a length of 1.67–2.64 mm, a width of 0.93–1.32 mm and a thickness of 0.49–0.84 mm. The size distribution along the length corresponds to the normal law. The aerodynamic properties of seeds affect the patterns of their movement and require further study. It is also advisable to analyze the relationship between seed germination and their frictional properties. The developed installation for sorting lavender seeds in small private farms will allow to increase the productivity and quality of sorting lavender seeds.

lavender seeds, physical and mechanical properties, separation, experimental setup

Одержано (Received) 19.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 25.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

УДК 631.331.024.2

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.174-184>

Д.Ю. Артеменко, доц., канд. техн. наук, **О.А. Кислун**, доц., канд. техн. наук,
В.А. Онопа, доц., канд. техн. наук, **Д.В. Богатирьов**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: artemenkodyu@kntu.kr.ua

Дослідження конструкції дискового пружинного загортача просапної сівалки

В роботі представлено результати теоретичних досліджень параметрів дискового пружинного загортача просапної сівалки. В результаті проведеного аналізу по розташуванню загортачів в конструкції секції було встановлено, що ефективніше розташовувати загортачі після сошника, що дозволяє укривати насіння вологим шаром ґрунту та створювати сприятливі умови для його проростання. З метою підвищення ефективності роботи загортачів був розроблений новий дисковий загортач пружинного типу. У процесі його дослідження було визначено, що основними параметрами, які впливають на процес роботи загортача є його кут атаки, швидкість руху сівалки та дальність переміщення ґрунту в бік борозни. Отримана теоретична залежність, що показує вплив кута атаки на дальність переміщення ґрунту загортачем в залежності від фізико-механічних властивостей ґрунту.

сприятливі умови, загортач, загортання насіння, дисковий пружинний загортач, підвищення врожайності просапних культур

Постановка проблеми. Відомо [1–3], що неякісно виконаний процес посіву насіння просапних культур може призводити до зниження врожайності на 10–15%, навіть за сприятливих погодних умов. Ключовим завданням для забезпечення підвищення врожайності є підвищення якості технологічних операцій, виконуваних елементами секцій робочих органів. Оскільки посів це сукупність операцій розміщення і загортання насіння, то саме вони направлені на формування оптимальних умов для його проростання і розвитку. Укладання насіння проводиться сошниками сівалки, і їх конструкція останнім часом досягла своєї максимальної ефективності, а от загортання насіння реалізується різними способами – використанням загортачів, прикочуванням, шлейфуванням і комбінацією цих робочих органів, тобто вплив на формування сприятливих умов росту може змінюватись в залежності від використаних елементів загортальних систем.

© Д.Ю. Артеменко, О.А. Кислун, В.А. Онопа, Д.В. Богатирьов, 2024

Дослідження [4–6] показують, що швидкість проростання насіння найбільше залежить від укриття його нижніми вологими шарами ґрунту та формування над ним рівномірного шару дрібногрудкуватого ґрунту, який сприяє легкому виходу паростків на денну поверхню. Найбільш оптимальним є загортання насіння одразу після його потрапляння на дно борозни. З цього випливає, що загортачі слід розташовувати безпосередньо після сошника, а їх конструкція має забезпечувати розділення руху ґрунтових шарів у зоні розташування насіння. На даний час більшість сучасних просапних сівалок комплектуються загортальними системами пасивної дії, робота яких направлена на поступальне переміщення шару ґрунту який знаходиться на поверхні. З цією метою використовуються пластинчасті і криволінійні загортачі та плоскі шлейфи. Це призводить до змішування сухих верхніх і вологих нижніх шарів ґрунту, що за умов нестачі вологи може негативно впливати на швидкість проростання.

Таким чином, вдосконалення конструкції загортачів просапних сівалок і технології загортання насіння, спрямоване на покращення умов проростання і забезпечення швидкого росту рослин, є актуальним завданням.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Залежно від розташування, загортачі виконують певні завдання в технологічному процесі посіву насіння. Зокрема, загортачі, встановлені безпосередньо після сошника (рис. 1), відповідають за закриття борозни з висіяним насінням і формування над ним ґрунтового шару. Цей шар згодом ущільнюється прикочуючим котком, що входить до складу секції робочих органів, створюючи оптимальні умови для швидкого проростання насіння [7–10].

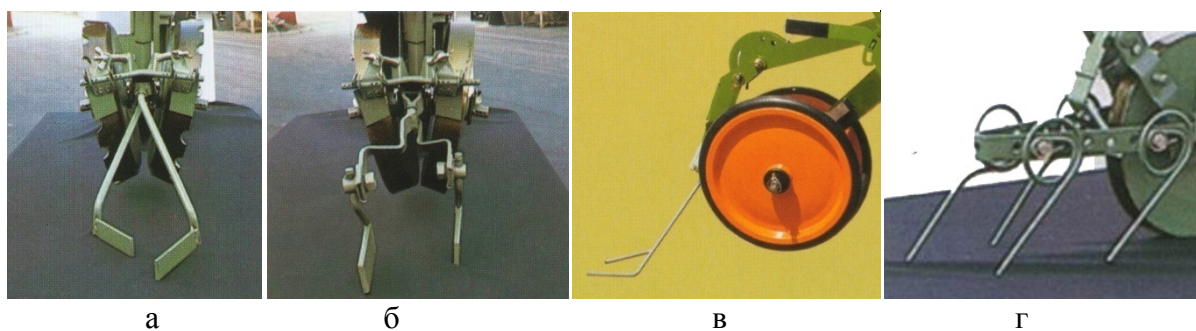


а – Kuhn; б – Elvorti

Рисунок 1 – Загортачі, які розташовані після сошника секції робочих органів

Джерело: розроблено авторами з використанням [8,10]

Загортачі, які розташовані за прикочуючим котком [9, 11–13], здебільшого виконують функцію мульчування поверхні рядка та її вирівнювання. Це сприяє зниженню втрат вологи і створює оптимальні умови для проростання насіння (рис. 2). Конструктивно вони здебільшого мають пластинчасту форму (рис. 2, а, б) або виконані з пружинними (рис. 2, в, г).



а, б – Nodet gougis; в – Amazon; г – Nodet gougis

Рисунок 2 – Загортачі, що розміщуються після котків секції робочих органів

Джерело: розроблено авторами з використанням [11, 12]

Різноманіття конструкцій загортачів демонструє значну увагу дослідників до процесів загортання насіння та вдосконалення цих елементів. Наприклад, у дослідженнях [14, 15] було встановлено, що перспективним напрямом модернізації загортачів є поетапне загортання насіння, починаючи з укриття вологими шарами ґрунту, а потім завершуючи сухішими верхніми. Автори наголошують на необхідності подальшого розвитку конструкцій загортачів і пропонують підходи, які, на їхню думку, покращать ефективність процесу.

Зокрема, Мюррей Ж.Р. в [16], акцентує увагу на значущості пружинних загортачів, які вирівнюють глибину розміщення насіння, знищують дрібні бур'яни, мульчують і вирівнюють поверхню рядка. Вони, зазвичай, виконуються пальцевими або прутковими та монтуються в кінці секції робочих органів, підвищуючи продуктивність роботи сівалки в цілому.

Зубко В.М. [17] наголошує, що найбільш раціонально встановлювати загортачі одразу після сошника, а проведені експериментальні дослідження показали, що такий підхід забезпечує кращі умови для проростання насіння завдяки якісному формуванню ґрунтового шару в зоні його розміщення.

Драйер Х. [18] рекомендує спочатку встановлювати після сошника коткові системи, а вже потім – пружинні загортачі. В такій схемі роботи котки виконують функцію загортання насіння, а загортачам відводиться більше функція планування поверхні рядка, ніж загортання.

В той же час, дослідження комбінованих пружинних загортачів [19] показали ефективність послідовного загортання – спочатку вологий ґрунт переміщується на насіння, потім борозна закривається сухим мульчованим шаром. Такий підхід може значно покращувати умови для проростання насіння. Але запропонована авторами конструкція пружинного загортача не в повній мірі може розкрити переваги такого підходу, за рахунок наявності декількох робочих поверхонь, які здійснюють дію в різних площинах.

Аналіз сучасних конструкцій та досліджень роботи загортачів сівалок вказує на сформований підхід до технологічного процесу загортання насіння, який базується на послідовному переміщенні змішаних шарів ґрунту різних горизонтів. Однак цей підхід має значні недоліки, зокрема порушення структури ґрунту, що може негативно впливати на проростання насіння. При цьому дискові і пружинні загортачі мають значний потенціал для подальшого вдосконалення. Дискові загортачі дають можливість відділяти шар ґрунту потрібного горизонту і укривати ним насіння, не порушуючи послідовності, а використання в їх конструкції обмежуючих і пружинних елементів дозволить більш якісно виконати процес загортання насіння. Комбіноване конструктивне виконання загортачів дозволить усунути основні недоліки загортальних систем, забезпечуючи послідовне загортання насіння вологими та сухими шарами ґрунту. Ці властивості роблять дискові пружинні загортачі перспективними для подальших досліджень і розробки їх нових конструкцій.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка дискового пружинного загортача та теоретичне дослідження його технологічних характеристик.

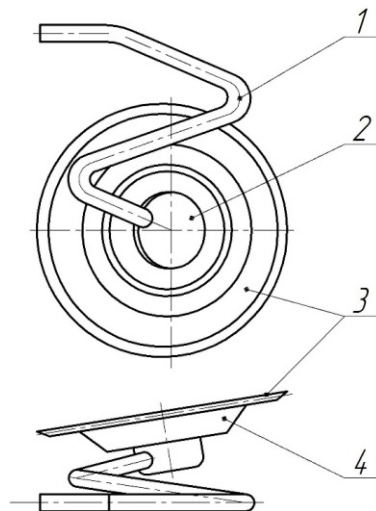
Виклад основного матеріалу. З метою вдосконалення функціонування загортаючих робочих органів і усунення недоліків існуючих загортальних систем була розроблена [20] нова конструкція комбінованого пружинно-дискового загортача (рис. 3). Загортач є комбінацією плоского диска з однобічним загостренням, розташованого під кутом атаки до напрямку руху. На зовнішній частині диска встановлений конічний ущільнювач, який з'єднується через маточину з N-подібною пружиною вертикального

тиску. Пружина вертикального тиску забезпечує навантаження на робочу поверхню загортача та розташована під кутом у вертикальній площині до осі рядка.

До складу загортача входять: пружина вертикального тиску 1, маточина 2, загострений диск 3 та конічний ущільнювач 4.

Під час роботи, при русі сівалки, пружина вертикального тиску 1 створює навантаження на диск 3, утримуючи його на заданій глибині. Загострений диск, занурюючись у ґрунт, обмежує свій хід по глибині завдяки дії конічного ущільнювача 4, який, під впливом пружини, ущільнює край борозни. Це забезпечує стабільність роботи диска у горизонтальній площині та покращує процес формування ґрунтового шару для загортання насіння. Оскільки загортач встановлений під кутом атаки до осі борозни, то під час руху він спрямовує ґрунт у бік борозни, створюючи над насінням рівномірний шар у формі невеликого пагорба.

Ефективна робота дискового пружинного загортача досягається завдяки таким особливостям: конічний ущільнювач у поєднанні з пружиною вертикального тиску забезпечує рівномірний рух загортача на заданій глибині, що дозволяє відокремлювати оптимальну кількість ґрунту для загортання борозни і створення пагорба над насінням; завдяки розхилу пружини вертикальної дії в горизонтальній площині та обертанню диска досягається ефект мульчування, а нахил у вертикальній площині створює необхідний тиск у зоні борозни, що сприяє якісному загортанню борозни; у випадках підвищеної засміченості ґрунту рослинними рештками або при збільшенні його вологості, конструкція загортача забезпечує ефективне самоочищення, що підвищує його функціональність і надійність.



1 – пружина вертикального тиску; 2 – маточина; 3 – однібічно загострений диск;
4 – конічний ущільнювач

Рисунок 3 – Дисковий пружинний загортач просапної сівалки

Джерело: розроблено авторами з використанням [20]

Для обґрунтування конструктивних параметрів удосконаленого загортача необхідно розглянути процес його роботи. Під час руху сівалки зі швидкістю посіву V , під дією пружини вертикального тиску, диск загортача, рухаючись під кутом атаки α відділяє шар ґрунту і переміщує його в бік борозни на відстань l (рис. 4).

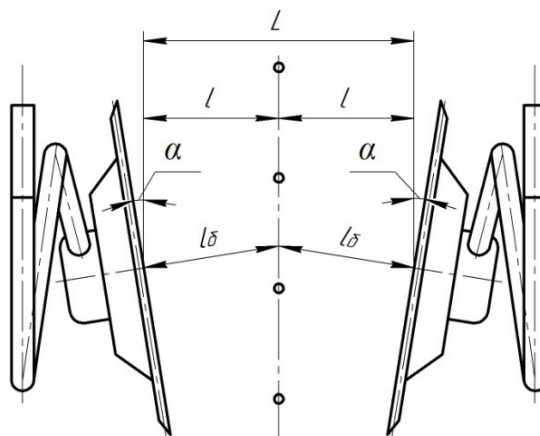


Рисунок 4 – Схема до визначення відстані між дисками загортачів

Джерело: розроблено авторами

Із схеми (рис. 4) видно, що відстань між осями дисків загортачів

$$L = 2l_0, \quad (1)$$

де l_0 – дальність переміщення часток ґрунту в бік борозни.

Під час руху сівалки зі швидкістю посіву V , диск загортача має поступальний і обертальний рух, а кожна частка, яка взаємодіє з робочою поверхнею загортача, здійснює складний рух, який характеризується відносною, переносною і абсолютною швидкостями. Відносна швидкість V_0 , яка виникає при переміщенні частки ґрунту M по поверхні загортача, спрямована проти руху сівалки і відхилена від нього на кут α (рис. 5)

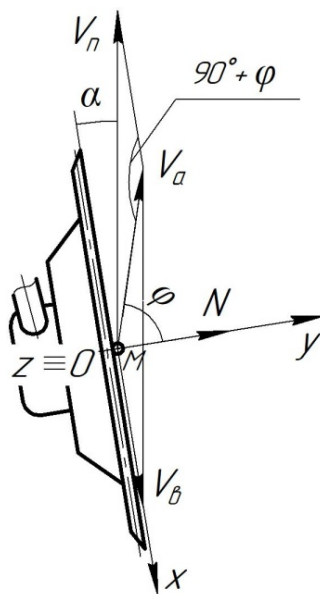


Рисунок 5 – Схема сил взаємодії поверхні загортача з ґрунтом

Джерело: розроблено авторами

Переносна швидкість V_n частки ґрунту M дорівнює швидкості руху сівалки і виникає при її взаємодії з іншими частинками ґрунту та спрямована в бік руху.

Абсолютна швидкість V_a частки ґрунту M має напрям під кутом тертя φ до нормальної реакції N ґрунту на поверхню загортача.

Аналізуючи рис. 5, бачимо співвідношення

$$\frac{V_a}{\sin \alpha} = \frac{V_n}{\sin(90^\circ + \varphi)}. \quad (2)$$

Враховуючи, що $\sin(90^\circ + \varphi) = \cos \varphi$, тоді

$$\frac{V_a}{\sin \alpha} = \frac{V_n}{\cos \varphi}, \quad (3)$$

або

$$V_a = V_n \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos \varphi}. \quad (4)$$

Залежність (4) дозволяє визначити абсолютну швидкість ґрунту від дії загортача в залежності від швидкості руху сівалки і кута атаки загортача.

Диски загортача під час обертання зміщують шар ґрунту в бік борозни з насінням по параболічній траєкторії (рис. 6).

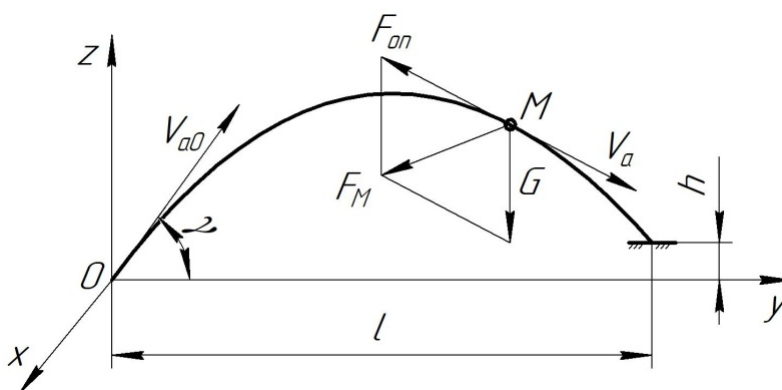


Рисунок 6 – Схема для визначення дальності відкидання ґрунту в бік борозни
Джерело: розроблено авторами

Згідно агротехнічних вимог, рух сівалки при висіві насіння просапних культур повинен знаходитись в діапазоні швидкостей від 6 до 8 км/год, тому на кожен частинку ґрунту, яка знаходиться в повітрі, крім сили тяжіння G , яка направлена вертикально вниз, діє сила опору повітря F_{on} .

Вона спрямована протилежно напрямку абсолютної швидкості V_a і по дотичній до траєкторії руху часток ґрунту в бік борозни, протилежно їх руху.

Розгляд результуючої сил, що діють на частинки ґрунту, що відкидається, представлено на основі опису руху матеріальної точки M в декартовій тривимірній системі координат та визначається

$$F_M = F_{on} + G, \quad (5)$$

де $G = mg$ – сила тяжіння частки ґрунту;

$F_{on} = kSV^2$ – сила опору повітря;

k – коефіцієнт опору повітря;

S – площа поперечного перерізу частинки ґрунту.

Враховуючи фактичні значення S та V , вплив F_{on} несуттєвий, тому в рамках даного дослідження його доцільно в подальших розрахунках виключити.

Врахуємо нульові початкові умови, прийнявши, що час відриву частинки від диска є початком руху, для якого

$$\begin{cases} V_x(0) = \left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = 0 \\ V_y(0) = \left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=0} = V_{a0} \cdot \cos \gamma, \\ V_z(0) = \left. \frac{dz}{dt} \right|_{t=0} = V_{a0} \cdot \sin \gamma \end{cases} \quad (6)$$

де γ – кут між поверхнею поля і початковим напрямом руху частинки.

Траєкторія руху частинки визначається системою рівнянь

$$\begin{cases} x(t) = 0 \\ y(t) = V_{a0} t \cdot \cos \gamma \\ z(t) = V_{a0} t \cdot \sin \gamma - \frac{gt^2}{2} \end{cases} \quad (7)$$

Оскільки по диску під час роботи загортача рухається не одна частка, а їх сукупність, то закінчуючи свій шлях після відокремлення і руху в бік борозни, по осі рядка формується невеличкий пагорб висотою h (рис. 6), який в цілому залежить від конструктивних і технологічних параметрів загортача, тоді горизонтальна дальність переміщення часток буде

$$l_z = y = \frac{V_{a0}^2 \cdot \sin 2\gamma}{2g} + \sqrt{\left(\frac{V_{a0}^2 \cdot \sin 2\gamma}{2g}\right)^2 - \frac{2h \cdot V_{a0}^2 \cdot \cos^2 \gamma}{g}} \quad (8)$$

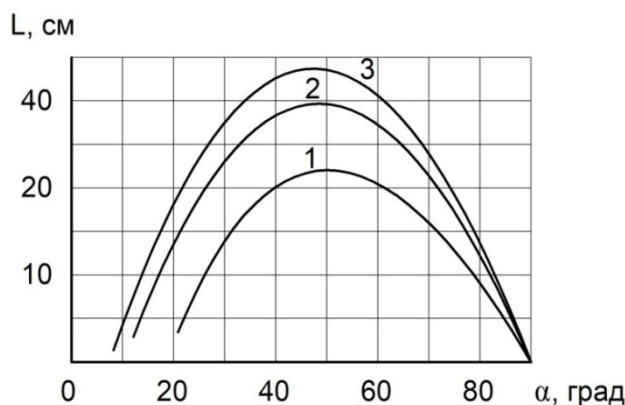
Так як диск загортача встановлений під кутом атаки α до напрямку руху сівалки, то частинки ґрунту перемістяться в бік борозни на відстань

$$l_o = l_z \cdot \cos \alpha = \frac{V_{a0}^2 \cdot \sin 2\gamma \cdot \cos \alpha}{2g} + \sqrt{\left(\frac{V_{a0}^2 \cdot \sin 2\gamma \cdot \cos \alpha}{2g}\right)^2 - \frac{2h \cdot V_{a0}^2 \cdot \cos^2 \gamma \cdot \cos^2 \alpha}{g}} \quad (9)$$

Підставивши (8) в (1), і з урахуванням (4), можна визначити відстань між дисками загортачів

$$L = \frac{V_n^2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot \sin 2\gamma \cdot \cos \alpha}{g \cdot \cos^2 \varphi} + \sqrt{\left(\frac{V_n^2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot \sin 2\gamma \cdot \cos \alpha}{g \cdot \cos^2 \varphi}\right)^2 - \frac{2h \cdot V_n^2 \cdot \sin^2 2\alpha \cdot \cos^2 \gamma}{g \cdot \cos^2 \varphi}} \quad (10)$$

Таким чином, відстань між дисками загортачів залежить від швидкості руху сівалки, кута атаки та фізико-механічних властивостей ґрунту. Підставивши значення параметрів, що входять в рівняння (10), отримали теоретичні залежності їх впливу на дальність відкидання ґрунту робочих поверхонь загортачів (рис. 7).



1 – $\gamma=20^\circ$; 2 – $\gamma=25^\circ$; 3 – $\gamma=30^\circ$ при $V=8$ км/год

Рисунок 7 – Залежність дальності переміщення ґрунту загортачем від кута атаки

Джерело: розроблено авторами

Таким чином, проведене теоретичне дослідження показало, що отримана залежність (10) дає можливість теоретично визначити основні технологічні параметри розробленого дискового пружинного загортача. Для встановлення раціональних значень параметрів, які можуть впливати на якість виконання робочого процесу загортачем, необхідне подальше проведення експериментальних досліджень за методикою повного факторного випробовування. Такі дослідження допоможуть встановити раціональні межі конструктивних параметрів диска загортача, вертикальної пружини тиску і конічного ущільнювача. На основі цих результатів можна буде остаточно прийняти розміри конструктивних елементів дискового пружинного загортача.

Висновки:

1. Проведений аналіз існуючих конструкцій загортачів та технологічного процесу їх роботи показав, що сучасні загортачі не забезпечують необхідних умов для загортання насіння. Зокрема, вони не виконують послідовного укриття насіння спочатку вологими, а потім сухими шарами ґрунту. У більшості випадків загортачі встановлюються після прикочуючих котків і лише мульчують та вирівнюють поверхню борозни, змішуючи шари ґрунту різних горизонтів. Встановлено, що ефективнішим є технологічний процес, за якого загортачі спершу покривають насіння нижніми вологими шарами ґрунту, а потім – верхнім сухим мульчованим шаром. Для цього загортачі слід розташовувати одразу за сошником, що дозволить накривати насіння одразу після його потрапляння в борозну.

2. Теоретичні дослідження показали, що ключовими факторами, які впливають на переміщення ґрунту до осі борозни, є кут атаки загортача, швидкість руху сівалки та фізико-механічні характеристики ґрунту. Отримано залежність (10), яка описує взаємозв'язок між конструктивними і технологічними параметрами загортача та дальністю відкидання ґрунту в сторону борозни.

Список літератури

1. Гончарук Г.С. Якісна сівба цукрових буряків запорука високого врожаю. *Цукрові буряки*. 2001. №2. С. 8–9.
2. Коломієць О.П., Гончарук Г.С., Ломако Т.Н. Передумови якісної сівби. *Цукрові буряки*. 1999. №2. С. 17.
3. П'ятківський М.К. Сівбі цукрових буряків високу агротехніку. *Цукрові буряки*. 2001. № 2. С. 7.
4. Артеменко Д.Ю., Магопець О.С., Соломашенко П.М. Дослідження і розробка удосконаленої конструкції сошника просапної сівалки. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кіровоград : КНТУ, 2010. Вип. 40, Ч.1. С. 136-142. <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/bitstream/123456789/1795/1/26.pdf>*
5. Артеменко Д.Ю. Математична модель роботи удосконалених щік сошника просапної сівалки. *Техніка в с.-г. виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту. Вип. 25, Ч. 1. Кіровоград : КНТУ, 2012. С. 41–45.*
6. Загортаючі робочі органи для прямої сівби зернових культур : монографія / В.М. Сало, О.Р. Лузан, П.Г. Лузан, Ю.В. Мачок; М-во освіти і науки, молоді та спорту України; Кіровоград. нац. техн. ун-т. Кіровоград : СПД ФО Лисенко В.Ф., 2012. 164 с. <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/5473>
7. Pneumatic precision seed drills. *Prospect of the Gaspardo Company*. 2017. SP Range. Italy. URL: <https://www.maschio.com/assets/Uploads/Leaflet-SP-RANGE-17-2017-09-W00230043R-EN.pdf>
8. Planter 3. Precision seed drills : *Prospect of the Kuhn Company*. 2015. Kuhn farm machinery (UK). URL: <http://www.kuhn.co.uk/uk/range/seeding/pneumatic-precision-seed-drills/planter-3-m-single-bar.html>
9. Precision Seeding. Maschinenfabrik SCHMOTZER GmbH. URL: <http://www.schmotzer.de>
10. Product Catalog Elvorti. *Chervona zirka. 2016. Technology in harmony with the nature. Кропивницький/Ukraine. URL: https://www.elvorti.com/content/pdf/2016/KATALOG_2016_EN_SITE.pdf*
11. Seed drill. “Contour” : *Prospect of the company “Amazon”*. Germany, 2012. 8 с.
12. Prospect of the Ribouleau Company. 2018. The precision Planter specialist. MECA V4. Ribouleau MONOSEM – FRANCE. URL: <https://www.monosem.com/Range/Planter-range/MECA-V4>
13. Сівалка “Pneumasem II”. *Проспект фірми “Nodet gougis”*. Франція, 2008. 6 с.
14. Конструктивні особливості сошникових систем сучасних сівалок та їх відповідність вимогам точного землеробства / Л. В. Аніскевич, Ю. О. Росамаха. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК*. 2016. Вип. 241. С. 269-278. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnuu_tech_2016_241_38 2016
15. Бойко А.І. Нові конструкції ґрунтообробних та посівних машин / [Бойко А.І., Свірень М.О., Шмат С.І., Ножнов М.М.]. К., 2003. 206 с.
16. Murray J.R., Tullberg J.N. and Basnet B. Planters and their components: types, attributes, functional requirements, classification and description. *ACIAR Monograph*. . 2006. No. 121. ISBN 186320 4628.
17. Зубко В.М., Мельник В.І., Проценко А.М., Комісар Е.О. Техніко-технологічна ефективність начіпної сівалки для посіву кукурудзи. *Біоресурси і природокористування*. Т. 10. 2018. №5-6. С.229–234. <https://doi.org/10.31548/bio2018.05.029>
18. Драйер Х. Детальний розгляд сошника сівалки Primera DMC. *Amazone Primera DMC. AMAZONEN-WERKE H. DREYER GmbH & Co. KG*. 2010, 2 с. URL: <http://www.amazone.de>
19. Артеменко Д.Ю., Магопець О.С. Теоретичне дослідження основного технологічного параметру удосконаленої конструкції пружинного загортача просапної сівалки. *Вісник аграрної науки Причорномор'я: науково-теоретичний фаховий журнал / В.С. Шибанін (гол. ред.) та ін. Миколаїв, 2011. Вип. 4 (61), Т.1. С. 244–250.*
20. Артеменко Д.Ю., Кучер Д.Ю. Розробка і обґрунтування конструкції дискового пружинного загортача просапної сівалки. *The 17th International scientific and practical conference “The latest technologies in the development of science, business and education” (April 30 – May 03, 2024) London, Great Britain. International Science Group. 2024. С. 402–406. <https://isg-konf.com/uk/the-latest-technologies-in-the-development-of-science-business-and-education/>*

Referencis

1. Honcharuk, H.S. (2001). High-quality sowing of sugar beets is the key to a high yield. *Tsukrovi buriaky*, №2, 8–9 [in Ukrainian].
2. Kolomiets, O.P., Honcharuk, H.S., & Lomako, T.N. (1999). Prerequisites for quality sowing. *Tsukrovi buriaky*, 2, 17 [in Ukrainian].
3. Piatkivskiy, M.K. (2001). Sugar beet sowing high agricultural technology. *Tsukrovi buriaky*, 2, 7 [in Ukrainian].
4. Artemenko, D., Mahopets, O. & Solomashenko, P. (2010). Research and working out of an advanced design steel seeders. *Konstruiuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil'skohospodars'kykh mashyn: zahal'noderzh. mizhvid. nauk.-tekhn. zb.*, 40, part 1. 136-142. <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/bitstream/123456789/1795/1/26.pdf> [in Ukrainian].
5. Artemenko, D.Yu. (2012). Mathematical model of the improved coulter cheeks of a row drill. *Tekhnika v sil'skohospodars'komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduuvannya, avtomatyzatsiia: zb. nauk. pr. Kirovohrads'koho nats. tekhn. un-tu*. Issue 25, Part 1, 41–45 [in Ukrainian].
6. Salo, V.M., Luzan, O.R., Luzan, P.G., & Machok, Yu.V. (2012). Wrapping working bodies for direct sowing of grain crops: monograph / Ministry of Education and Science, Youth and Sports of Ukraine, Kirovohrad. national technical Univ. Kirovohrad: SPD FD Lysenko V.F. <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/5473> [in Ukrainian].
7. Prospect of the Gaspardo Company. (2017). SP Range. Pneumatic precision seed drills. Italy. <https://www.maschio.com/assets/Uploads/Leaflet-SP-RANGE-17-2017-09-W00230043R-EN.pdf>
8. Prospect of the Kuhn Company. (2015). Planter 3. Precision seed drills. Kuhn farm machinery (UK). URL: <http://www.kuhn.co.uk/uk/range/seeding/pneumatic-precision-seed-drills/planter-3-m-single-bar.html>
9. Precision Seeding. *Maschinenfabrik SCHMOTZER GmbH*. <http://www.schmotzer.de>
10. Product Catalog Elvorti. *Chervona zirka*. (2016). Technology in harmony with the nature. Kropyvnytskyi/Ukraine. https://www.elvorti.com/content/pdf/2016/KATALOG_2016_EN_SITE.pdf
11. (2012). Seed drill. “Contour”. Prospect of the company “Amazon”. Germany, 8.
12. (2018). The precision Planter specialist. MECA V4. *Prospect of the Ribouleau Company*. Ribouleau MONOSEM – FRANCE. <https://www.monosem.com/Range/Planter-range/MECA-V4>
13. (2008). Seed drill. “Pneumasem II”. *Prospect of the company “Nodet gougis”*. France, 6.
14. Aniskevych, L.V., & Rosamakha, Yu.O.. (2016). Design features of coulter systems of modern seed drills and their compliance with the requirements of precision agriculture. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrainy. Seriya : Tekhnika ta enerhetyka APK - Scientific Bulletin of the National University of Life Resources and Environmental Sciences of Ukraine. Series: Engineering and Energy of the Agricultural Complex. Part. 241, 269-278* [in Ukrainian]. http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2016_241_38 2016
15. Boiko, A.I. (2003). Novi konstruktsii gruntoobrobnykh ta posivnykh mashyn. [New designs of tillage and seeding machines] / [Boiko A.I., Sviren M.O., Shmat S.I., Nozhnov M.M.]. K., 206. [in Ukrainian].
16. Murray, J.R., Tullberg, J.N. & Basnet, B.B. (2006). Planters and their components: types, attributes, functional requirements, classification and description. *ACIAR Monograph*. No. 121. ISBN 186320 4628.
17. Zubko, V.M., Melnyk, V.I., Protsenko, A.M., & Komisar, E.O. (2018). Tehniko-tehnologichna efektyvnist nachipnoyi sivalki dlya posiv kukurudzi. [Technical and technological efficiency of the trailed seeder for sowing corn]. *Bioresursi i pryrodokorystuvannya - Bioresources and nature management*. Volume 10, №5-6, 229 – 234 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31548/bio2018.05.029>
18. Dryer, H. (2010). Detailed view of the seeder coulter Primera DMC. *Amazone Primera DMC. AMAZONEN-WERKE H. DREYER GmbH & Co. KG. 2* [in Ukrainian]. <http://www.amazone.de>
19. Artemenko, D.Yu., & Magopets, O.S. (2011). Theoretical study of the main technological parameter of the improved design of the spring wrapper of the row drill. *Visnik agrarnoyi nauki Prichornomor'ya: naukovo-teoretichnyi fahoviy zhurnal*. V.S. Shebanin (Es.) and others. Mykolayiv, Part. 4 (61), Vol.1, 244 – 250 [in Ukrainian].
20. Artemenko, D.Yu., & Kucher, D.Yu. (2024). [Development and justification of the design of a disc spring wrapper for a row seeder. *The 17th International scientific and practical conference “The latest technologies in the development of science, business and education”* (April 30 – May 03, 2024) London,

Great Britain. International Science Group. 402-406 [https://isg-konf.com/uk/the-latest-technologies-in-the-development-of-science-business-and-education/\[in Ukrainian\]](https://isg-konf.com/uk/the-latest-technologies-in-the-development-of-science-business-and-education/[in Ukrainian]).

Dmytro Artemenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleh Kyslun**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,
Volodymyr Onopa, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Dmytro Bogatyryov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Research of the Design of a disc Spring Closing Device for a Row Crop Planter

The study presents the results of theoretical research on the design and technological parameters of the spring-loaded disc covering device for row crop seeders. The analysis of existing covering devices and their technological processes revealed that they do not provide optimal sequential seed covering with moist soil layers followed by drier ones. Most designs, positioned after pressing rollers, primarily perform mulching and leveling of the furrow surface, which leads to mixing soil layers of different depths. It was determined that placing the covering devices immediately after the seed opener is more effective. This allows seeds to be covered with a moist soil layer immediately after being placed in the furrow, followed by a mulched drier layer. This approach helps retain moisture in the seed zone and creates favorable conditions for germination. To address the shortcomings of the reviewed covering devices, a new spring-loaded disc covering device was developed. This device combines a flat, single-edged disc positioned at an angle of attack to the direction of movement. A conical press is mounted on the outer edge of the disc, connected via a hub to a vertical pressure spring. The vertical pressure spring applies force to the working surface of the covering device and is positioned at an angle in the vertical plane relative to the row axis.

The efficient operation of the spring-loaded disc covering device is achieved through several features: the combination of the conical press and vertical pressure spring ensures consistent movement at a specified depth, allowing optimal amounts of soil to be separated for furrow coverage and forming a mound over the seeds. The horizontal deflection of the vertical spring, combined with the rotation of the disc, produces a mulching effect, while the vertical deflection generates the required pressure in the furrow zone, enabling high-quality furrow coverage. In cases of increased soil contamination with plant residues or higher soil moisture, the device's design ensures effective self-cleaning, enhancing its functionality and reliability.

The study determined that the main parameters influencing the operation of the disc covering device for row crop seeders include its angle of attack, seeder movement speed, and the distance the soil is displaced toward the furrow. A theoretical dependency was obtained, showing the impact of the covering device's angle of attack on the distance of soil displacement based on the soil's physical and mechanical properties. These findings open up possibilities for further improvement of spring-loaded covering devices, particularly for adapting them to the modern requirements of row crop cultivation technologies.

favorable conditions, covering device, seed covering, spring-loaded disc covering device, increasing yield of row crops

Одержано (Received) 24.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 25.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

УДК 631.3

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.185-192>

К.В. Васильковська, доц., канд. техн. наук, **С.М. Мороз**, доц., канд. техн. наук,
О.О. Андрієнко, доц., канд. с.-г. наук, **М.О. Васильковський**, здобувач
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: vasilkovskakv@ukr.net

Агроробот для міжрядного обробітку просапних культур

Метою написання статті є аналіз існуючих конструкцій агророботів для міжрядного обробітку ґрунту, знищення бур'янів та обприскування в міжряддях.

Проведено аналіз функціональних можливостей агророботів для міжрядної обробки, боротьби із бур'янами та обприскування. Проаналізовані їх переваги та недоліки. Запропоновано конструкцію агроробота для забезпечення якісної роботи в міжряддях просапних культур. Також, для уніфікації робіт на одному корпусі агроробота пропонується можливість створення конструкцій різних варіацій агроробота, як транспортний агрегат та інтелектуальний обприскувач.

агроробот, міжрядний обробіток, знищення бур'янів, обприскування, конструкція

Постановка проблеми. Протягом всієї історії розвитку сільського господарства, землеробство розвивалось від простих ручних інструментів та агрегатів, запряжених тваринами, до складного автоматизованого устаткування [1].

Перехід від простих знарядь та устаткування для обробітку ґрунту та догляду за посівами до складних систем та комплексів машин, які працюють в режимі паралельного водіння, навігації та моніторингу біло здійснено не за один день. Майбутнє набагато ближче, і ми розуміємо, що запроваджуються новітні технології машинного навчання, штучний інтелект, візуальне розпізнавання образів та інше.

Таким чином, сільське господарство, з використанням роботизованих рішень є основою для сталого сільського господарства в майбутньому [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Подальше підвищення продуктивності продукції сільськогосподарського виробництва можливе за рахунок новітніх технологічних рішень в землеробстві, що не просто гарантуватиме продовольчу та харчову безпеку в країні, а надасть можливість збільшити валютні надходження до казни [3, 4].

Саме автоматизація, механізація сільського господарства та пошук новітніх оптимальних засобів для заміни кропіткої ручної праці є актуальною задачею сьогодення.

Одним із перспективних технологічних рішень в аграрному виробництві є використання агророботів для забезпечення якісного та вчасного технологічного процесу. Агророботи відносяться до розумних роботів, керування якими можливе за допомогою різних програм і програмного забезпечення, що адаптоване під різні технологічні операції [1, 5].

Привнесення інтелекту у сільське господарство, збільшуючи при цьому ефективність і стійкість аграрного виробництва, забезпечує майбутнє, в якому продукти харчування виробляються з мінімальною шкодою для навколишнього середовища [6].

Точне землеробство продемонструвало переваги такого підходу, але тепер ми можемо перейти до нового покоління машин. Саме поява автономного устаткування надає можливість розробити цілий спектр сільськогосподарського обладнання на основі невеликих інтелектуальних машин, які зможуть робити потрібну роботу, в потрібному місці, в потрібний час і в потрібний спосіб [7].

Постановка мети статті. Метою написання статті є аналіз існуючих конструкцій агророботів для міжрядного обробітку ґрунту, знищення бур'янів та обприскування в міжряддях.

Проведено аналіз функціональних можливостей агророботів міжрядної обробки, боротьби із бур'янами та обприскування. Проаналізовані їх переваги та недоліки. Запропоновано конструкцію агроробота для міжрядного обробітку просапних культур.

Виклад основного матеріалу. На сьогоднішній день, на ринку представлено багато різноманітних роботів для сільськогосподарського виробництва, тому що існуючі технологічні потреби вимагають виконання стільки ж технологічних операцій, для яких можливе застосування роботів у сільському господарстві. Найбільш складними роботами є ті, які потребують інтелектуального підходу для виконання технологічних операцій: підготовка ґрунту, висів насіння, знищення бур'янів.

Розглянемо роботи для міжрядного обробітку посівів та боротьби із бур'янами.

Лідером серед роботів за об'ємами продаж є агродрон XAG R150. Наземний агроробот для сільського господарства XAG R150 – це безпілотний наземний транспортний засіб для ведення робіт в сільському господарстві (рис. 1).

Агроробот являє собою платформу, яка може модифікуватись у різні конструкції для різних технологічних процесів. Багатофункціональна платформа швидко перетворюється на специфічну для виконання широкого спектра операцій: обприскування, моніторинг полів, знищення бур'янів та підстригання рослин, а також перевезення різноманітних матеріалів.

Агроробот XAG R150 здатен виконувати обприскування на 360° та ефективно виконує операції із захисту рослин від хвороб і шкідників у садівництві та плодоовочівництві.

Керування агророботом виконується за допомогою пульта дистанційного керування. Існують три модифікації цього агроробота: SprayModel (для обприскування), RevoMower (для боротьби із бур'янами) та транспортна платформа для перевезення до 200 кг вантажу.



а



б

а – конструкція SprayModel з ємністю для обприскування; б – конструкція RevoMower із подвійними лезами для знищення бур'янів і підстригання рослин

Рисунок 1 – Загальний вигляд модифікацій агроробота XAG R150

Джерело: на підставі [9]

Максимальна швидкість такого агрегату становить 1,2 м/с. Номінальна потужність синхронного двигуна з постійними магнітами складає 1500 W. Електричний привід оснащений двома інтелектуальними літій-полімерними батареями. Номінальна ємність батарей 960 Вт·год. Тривалість роботи на двох батареях (без навантаження) складає близько 4 годин, а при повному навантаженні – 1 годину. Наступний представник – агроробот ROBOTTI LR від компанії Aggointelli. Агроробот може бути оснащений стандартним знаряддям для виконання широкого спектру польових робіт протягом усього сезону (рис. 2).

Агроробот оснащений одним дизельним двигуном, який має бак ємністю 300 л, що дозволяє виконувати роботу безперервно протягом 60 год. Агроробот ROBOTTI LR має вантажопідйомність 1,2 т.



Рисунок 2 – Загальний вигляд агроробота ROBOTTI LR

Джерело: на підставі [9]

ROBOTTI – є багатоцільовим, що означає, що він може виконувати різні види польових робіт. Він може використовуватись, як транспортний перевізник, а також виконавець певних завдань. Він може виконувати висів, прополювання, боронування та обприскування. Крім того, він може бути налаштований для розпушування ґрунту, для чого використовується вал відбору потужності 540 об/хв потужністю 14 кВт/18 к.с.

Швидкість руху агроробота становить до 8 км/год. ROBOTTI оснащений пультом дистанційного керування з функцією E-stop. Для моніторингу поля та роботи використовується система GPS, а також лазерний сканер LIDAR.

Наступний представник агророботів – FendtXaver (рис. 3). Цей агроробот обладнано системою PrecisionPlanting, яка керує за допомогою електроприводу інтегрованим висівним апаратом vSet, що розкладає насінини в рядку із заздалегідь заданою точністю (+/-1 см).

Конструкція агроробота має три колеса, управління відбувається на задню вісь (рис. 3). Великі колеса збільшують площу контакту з поверхнею поля, забезпечуючи більший кліренс та більший кут розвороту на краю поля. Вага передніх коліс допомагає збільшити тиск на сошник при висіві на важких ґрунтах.

Вага агроробота 150 кг, довжина 2 м. При повному оснащенні вага збільшується до 250 кг. Об'єм бункера для насіння складає 20 л, що забезпечує висів на площі до 0,5 га при нормі висіву 90 тис. насінин/га.

Насіннєвий матеріал поступає до борозни за допомогою гнучкого насіннєпровода. Заднє колесо виконує роль прикочуючого для ущільнення ґрунту над борозною.

Ємність літій-іонної батареї складає 2,6 кВт·год., завдяки чому агроробот може працювати до 1,5 години, після чого повертається на дозарядку на базову станцію.

Агроробот оснащений системою навігації VarioGuide, а платформа FendtONE дозволяє отримувати інформацію про стан поля.



Рисунок 3 – Загальний вигляд агроробота FendtXaver

Джерело: на підставі [11]

Багатофункціональний агроробот BoniRob (рис. 4) – наступний представник роботів для роботи в полі.

Це чотириколісний польовий робот створений для спостереження за рослинами за допомогою двох камер. Він також може оцінювати стан посівів, вносити добрива та знищувати бур'яни. Швидкість роботи BoniRob складає 3,7 см/с, але залежить від щільності бур'янів. При меншій щільності, швидкість може збільшуватись до 9 см/с.

За допомогою вбудованого алгоритму на базі завантажених зображень агроробот розрізняє бур'яни та культурні рослини, порівнюючи колір, форму та розмір листя. За допомогою спеціального маніпулятора бур'яни загортаються в ґрунт.

Робот BoniRob працює автономно, обробляючи до 150 кг матеріалу, а генератор енергії працює без підзарядки 24 години.



Рисунок 4 – Загальний вигляд агроробота BoniRob

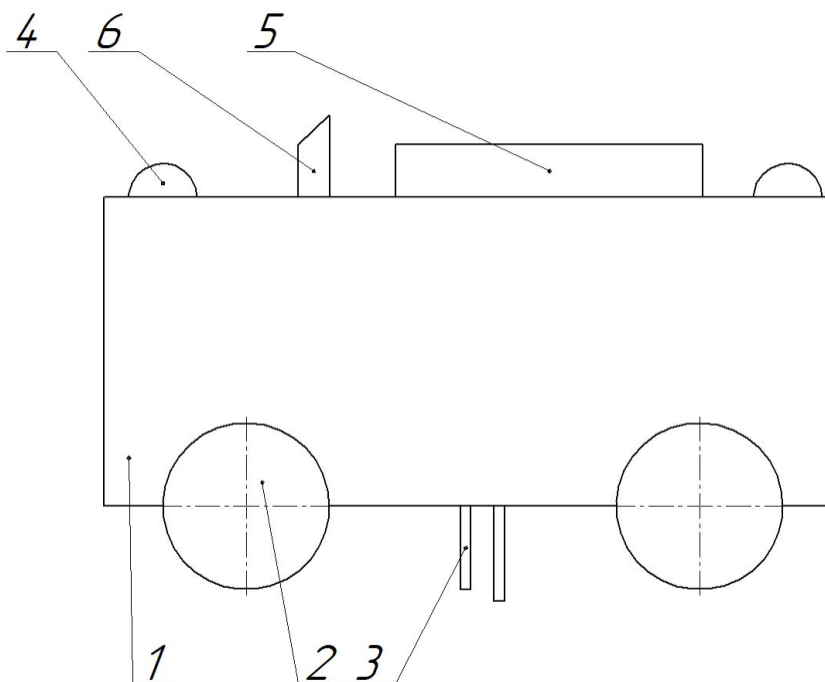
Джерело: на підставі [12]

Всі перераховані конструкції агророботів забезпечують якісне виконання одного або декількох технологічних процесів. Однак, є один величезний мінус – вони є дуже високовартісними. В умовах війни не всі агровиробники можуть дозволити собі такий девайс. З метою розробки агроробота для роботи у міжряддях нами запропоновано конструкцію агроробота, яка забезпечувала якісну роботу в міжряддях просапних культур і була, в той же час, достатньо простою.

Для виконання технологічної операції розпушення ґрунту та знищення бур'янів потрібно дотримуватись певної ширини міжряддя. Так, ширина міжряддя для висіву цукрових буряків становить 45 см, для соняшнику та кукурудзи – 70 см. Тому, для роботи із просапними культурами нами обрано ширину міжрядь в 70 см. Вихідними даними для дослідної конструкції обрано:

1. Габарити (не більше):
 - ширина: 500 мм (для міжряддя в 70) та регульовану зміну ширини міжосьової відстані коліс для менших міжрядь,
 - довжина повинна не перевищувати 700 мм,
 - кліренс повинен бути достатнім для безперебійної роботи робочих органів: більше 100 мм;
2. Наявність акумулятора;
3. Наявність системи орієнтування в просторі (2 камери);
4. Наявність робочих органів (розпушувач);
5. Наявність модуля зв'язку та управління;
6. Наявність системи позиціонування.

Запропоновано схему агроробота для міжрядного обробітку просапних культур (рис. 5).



- 1 – корпус; 2 – кероване колесо; 3 – стійки для кріплення робочих органів;
4 – відеокамера; 5 – акумуляторна батарея; 6 – GPS передавач

Рисунок 5 – Загальний вигляд запропонованої конструкції агродрона для міжрядного обробітку просапних культур

Джерело: розроблено авторами

Для роботи в міжряддях запропоновано конструкцію агроробота, яка включає в себе корпус 1, який рухається за допомогою гумових коліс. Привід здійснюється на керуючі колеса 2, розміщені на передній осі. Для розпушування міжряддя та боротьби із бур'янами до корпусу агроробота на стійку 3 кріпляться робочі органи, які йдуть в комплекті (голчасті розпушувачі або стрілочасті лапи). На корпусі встановлено дві відеокамери 4, з'ємну акумуляторну батарею 5 та GPS передавач 6.

Перед роботою агроробота задається маршрут. Перед початком операції, робочі органи опускаються на задану глибину, вмикається робочий режим і агроробот починає рухатись по заданому маршруту. Крім того, в режимі реального часу можна слідкувати за роботою робота на екрані планшета.

Для вдосконалення конструкції передбачено невдовзі провести польові дослідження. Також, для уніфікації робіт на одному корпусі агроробота пропонується можливість створення конструкцій різних варіацій агроробота, як транспортний агрегат та інтелектуальний обприскувач.

Інтелектуалізація сільськогосподарського господарства рухається шляхом надання існуючим машинам здатності працювати автономно та без втручання людини. Збільшується рівень складності робіт, які можуть виконуватись аграрними роботами.

Висновки. Агророботи, як новітня технологія для сільськогосподарського виробництва, не тільки заощаджують витрати на робочу силу, але покращують можливості контролю якості та збільшують здатність протистояти природним ризикам. Тому, запропонована конструкція простого та надійного агроробота для забезпечення якісної роботи в міжряддях просяпаних культур – є актуальним і своєчасним рішенням для аграрного виробництва нашої країни.

Список літератури

1. Васильковська К.В. Системний аналіз агророботів в сільськогосподарському виробництві. Аграрні інновації. – Херсон: Видавничий дім «Гельветика», 2024. – Вип. 24. С. 31-36. (DOI: <https://doi.org/10.32848/agra.innov.2024.24.4>)
2. Vasylykova K.V., Leshchenko S.M., Vasylykovskyi O.M., Petrenko D.I. Improvement of equipment for basic tillage and sowing as initial stage of harvest forecasting. INMATEH - Agricultural Engineering. 2016. Vol. 50(3). P. 13-20.
3. Білінська В. Сучасні інноваційні технології в сільському господарстві: основна характеристика та перспективи впровадження. Вісник Київського національного університету імені Т. Шевченка: Економіка. 2015. Вип. 7 (172). С. 74-80. (DOI: <https://dx.doi.org/10.17721/1728-2667.2015/172-7/11>)
4. Васильковська К.В., Андрієнко О.О., Шепілова Т.П. Ефективність агродронів в системі точного землеробства. Аграрні інновації. – Херсон: Видавничий дім «Гельветика». 2023. Вип. 16. С. 13-18. (DOI: <https://doi.org/10.32848/agra.innov.2023.17.2>)
5. Васильковська К.В., Андрієнко О.О., Малаховська В.О. Аналіз ефективності агродронів для внесення технологічних матеріалів в системі точного землеробства. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Кропивницький: ЦНТУ. Вип. 53. 2023. С. 131-138. (DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.131-138>)
6. Komitov G., Mitkov I., Harizanov V., Neshev N., Yanev M. Justification of Agrotechnical Indicators of Agrobot. 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE), 2020. (DOI: <https://doi.org/10.1109/EEAE49144.2020.9279046>)
7. Blackmore S., Stout B., Wang M. & Runov B. Robotic agriculture – the future of agricultural mechanisation? Precision Agriculture, 5. 2000. pp. 621–628. (DOI: https://doi.org/10.3920/978-90-8686-549-9_077)

8. Santos Valle, S. et Kienzle, J. Agriculture 4.0: Robotique agricole et matériel automatisé au service d'une. 2021. URL: https://www.naio-technologies.com/wp-content/uploads/2016/02/naoi-oz-lafranceagricole.fr_.jpg (дата звернення 05.10.2024)
9. Наземний дрон XAG R150 2022 XAUV Spray Model. ГектарUA. URL: <https://hectare.ua/internet-magazin/product/view/681/1382638> (дата звернення 20.10.2024)
10. ROBOTTI LR. FarmConcepts. URL: <https://farmconcepts.com.au/solutions/autonomous/robotti/> (дата звернення 09.11.2024)
11. Fendt удосконалив інноваційного агроробота Xaver. TRAKTORIST.UA. URL: <https://traktorist.ua/news/fendt-udoskonaliiv-innovatsiynogo-agrorobota-xaver> (дата звернення 08.11.2024)
12. Багатофункціонального агроробота Bosch запускають у серійне виробництво. KURKUL – онлайн асистент фермера. URL: <https://kurkul.com/news/11500-bagatofunktsionalnogo-agrorobota-bosch-zapustyat-u-seriynе-virobnitstvo> (дата звернення 08.11.2024)

Referencis

1. Vasylykowska, K.V. (2024). System analysis of agricultural robots in agricultural production. *Ahrarni innovatsii*, 24. 31-36. (DOI: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.24.4>) [in Ukrainian]
2. Vasylykowska, K.V., Leshchenko, S.M., Vasylykovskiy, O.M., & Petrenko, D.I. (2016). Improvement of equipment for basic tillage and sowing as initial stage of harvest forecasting. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 50(3). 13-20.
3. Bilinska, V. (2015). Modern innovative technologies in agriculture: main characteristics and prospects for implementation. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni T. Shevchenka: Ekonomika*, 7 (172). 74-80. (DOI: <https://dx.doi.org/10.17721/1728-2667.2015/172-7/11>) [in Ukrainian]
4. Vasylykowska, K.V., Andriienko, O.O., & Shepilova, T.P. (2023). Efficiency of agrodrones in the precision farming system. *Ahrarni innovatsii*. 16. 13-18. DOI: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.17.2> [in Ukrainian]
5. Vasylykowska, K.V., Andriienko, O.O., & Malakhovska, V.O. (2023). Analysis of the effectiveness of agrodrones for the introduction of technological materials in the system of precision agriculture]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery*, 53. 131-138. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.131-138> [in Ukrainian]
6. Komitov, G., Mitkov, I., Harizanov, V., Neshev, N., & Yanev, M. (2020). Justification of Agrotechnical Indicators of Agrobot. 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE). DOI: <https://doi.org/10.1109/EEAE49144.2020.9279046>
7. Blackmore, S., Stout, B., Wang, M. & Runov, B. (2005). Robotic agriculture – the future of agricultural mechanisation? *Precision Agriculture*, 5. 621–628. DOI: https://doi.org/10.3920/978-90-8686-549-9_077
8. Santos, Valle, S. & Kienzle, J. (2021). Agriculture 4.0: Robotique agricole et matériel automatisé au service d'une. https://www.naio-technologies.com/wp-content/uploads/2016/02/naoi-oz-lafranceagricole.fr_.jpg 05.10.2024
9. Наземний дрон XAG R150 2022 XAUV Spray Model [Ground drone XAG R150 2022 XAUV Spray Model]. *HektarUA*. <https://hectare.ua/internet-magazin/product/view/681/1382638> [in Ukrainian]
10. ROBOTTI LR. FarmConcepts. <https://farmconcepts.com.au/solutions/autonomous/robotti/>
11. Fendt improves innovative agricultural robot Xaver]. *TRAKTORIST.UA*. <https://traktorist.ua/news/fendt-udoskonaliiv-innovatsiynogo-agrorobota-xaver/> 08.11.2024 [in Ukrainian]
12. Bosch multifunctional agricultural robot to be put into mass production. (2024). *KURKUL: onlain asystent fermera*. <https://kurkul.com/news/11500-bagatofunktsionalnogo-agrorobota-bosch-zapustyat-u-seriynе-virobnitstvo> 08.11.2024 [in Ukrainian]

Kateryna Vasylykowska, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhii Moroz**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olha Andriienko**, Assoc. Prof., PhD agr. sci., **Mykhailo Vasylykovskiy**, student
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Agrobot for Inter-Row Cultivation of Row Crops

Throughout the history of agriculture, farming has evolved from simple hand tools and animal-drawn machines to sophisticated automated equipment. One of the most promising technological solutions in agricultural production is the use of agricultural robots to ensure a high-quality and timely technological process.

Agricultural robots are smart robots that can be controlled by various programs and software adapted to different technological operations. Bringing intelligence to agriculture, while increasing the efficiency and sustainability of agricultural production, ensures a future in which food is produced with minimal environmental damage.

The purpose of this article is to analyze the existing designs of agricultural robots for inter-row tillage, weed control, and spraying in the inter-row.

All of the analyzed designs of agricultural robots provide high-quality performance of one or more technological processes. However, there is one huge disadvantage: they are very expensive. In times of war, not all agricultural producers can afford such a device.

The functional capabilities of agricultural robots for inter-row tillage, weed control and spraying were analyzed. Their advantages and disadvantages are analyzed. The design of an agricultural robot is proposed to ensure high-quality work in the row spacing of row crops. Also, to unify the work of the agro-robot on one body, it is possible to create designs of various variations of the agro-robot, such as a transport unit and an intelligent sprayer.

The intellectualization of agriculture is moving towards enabling existing machines to work autonomously and without human intervention. The level of complexity of work that can be performed by agricultural robots is increasing. Agricultural robots, as the latest technology for agricultural production, not only save labor costs, but also improve quality control capabilities and increase the ability to withstand natural risks. Therefore, the proposed design of a simple and reliable agricultural robot to ensure high-quality work in the rows of row crops is a relevant and timely solution for agricultural production in our country.

agricultural robot, inter-row cultivation, weed control, spraying, design

Одержано (Received) 25.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 25.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

УДК 631.362

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.192-202>

І.М. Бажан, асп., **О.М. Васильковський**, проф., канд. техн. наук, **С.М. Лещенко**, доц., канд. техн. наук, **В.В. Амосов**, доц. канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна
e-mail:olexa74@ukr.net*

Інтенсифікація процесу сепарації зерна на плоскому коливальному решеті із зигзагоподібним розташуванням отворів

У статті викладені результати теоретичного аналізу шляхів підвищення ефективності роботи плоских коливальних решіт. Встановлено, що підвищення ефективності сепарації можливо досягти лише шляхом інтенсифікації процесів взаємного переміщення (сегрегації) часток всередині шару матеріалу у вертикальній і горизонтальній площинах. Висловлено припущення, що найбільш ефективною є активізація внутрішньшарових процесів у оброблюваному матеріалі, яка забезпечується двома способами – встановленням оптимального кінематичного режиму коливальних і конструкційними параметрами самого решета. Наведено нове, запатентоване технічне рішення – решето із зигзагоподібним розташуванням отворів і сформовано основні задачі і елементи методики попередніх досліджень. Сформульовано висновки за результатами проведеного аналізу.

зерно, зерновий матеріал, очищення, решето, сепаратор, інтенсифікація, сепарація, ефективність, внутрішньшарові процеси, активізація, зигзаг

© І.М. Бажан, О.М. Васильковський, С.М. Лещенко, В.В. Амосов, 2024

Постановка проблеми. Підвищення ефективності решітного очищення зерна – важливе завдання для інженерів і дослідників, що працюють у сфері аграрної інженерії, переробки та зберігання сільськогосподарської продукції. Ефективність – емний термін, який полягає у покращенні багатьох показників роботи сепаратора. До них відносять підвищення продуктивності і якості очищення, збільшення ресурсу і міжремонтного часу, зниження енергоємності і часу на технічне обслуговування, спрощення конструкції тощо. Покращення зазначених вище показників ефективності, у кінцевому рахунку, слугує одній цілі – зниженню собівартості машини і зменшенню собівартості переробленої продукції. Досягнення цілі дозволить отримати економічний ефект як виробнику, так і споживачу ефективної техніки, а також підвищити її конкурентоздатність на ринку.

Найбільш важливими показниками ефективності роботи зерноочисних машин є показники, що характеризують технологічну ефективність – продуктивність та якість очищення і мають найбільший вплив на економічні характеристики процесу сепарації. Відомо, що підвищення показників технологічної ефективності роботи коливальних плоскорешітних систем досягається шляхом інтенсифікації внутрішньошарових процесів у оброблюваному матеріалі під час обробки, які сприяють переміщенню проходових часток у вертикальній і горизонтальній площинах для отримання можливості просіювання крізь отвори. Інтенсифікації внутрішньошарових процесів можна досягти кількома шляхами. Одним з них є забезпечення оптимального кінематичного режиму за рахунок механізму приводу. Іншим шляхом є встановлення різного роду активаторів-інтенсифікаторів. Обидва шляхи не можна вважати однозначно ефективними, оскільки кінематичний режим забезпечує інтенсифікацію внутрішньошарових процесів переважно у вертикальній площині, а активатори – у горизонтальній, при цьому останні ще й ускладнюють і здорожують конструкцію сепаратора.

Найбільш органічним шляхом підвищення інтенсифікації внутрішньошарових процесів у вертикальній і горизонтальній площинах є поєднання обох способів, при цьому питання активізації поперечного переміщення часток, що можуть розташовуватися між отворами решета, доцільно здійснювати альтернативним способом – без застосування додаткових конструктивних елементів, наприклад, шляхом зигзагоподібного розташування отворів на плоскому решеті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У наукових роботах [1–17] численних науковців наведено результати досліджень, спрямованих на пошук оптимальної конструкції та обґрунтування раціональних конструкційних і режимних параметрів решітних сепараторів зерна, які б дозволили інтенсифікувати процес [1, 2] і забезпечити високі показники продуктивності і якості очищення, збільшення ресурсу і міжремонтного періоду роботи, зниження енергоємності і часу на технічне обслуговування, спрощення конструкції і налаштувань. Однак, на сьогоднішній день немає єдиного технічного рішення, яке б могло задовольнити всі вимоги, наведені вище. Більш того, як зазначено авторами [3], за рядом конструкційних і технологічних параметрів, існуючі решітні сепаратори можна розділити на п'ять поколінь, які суттєво відрізняються за закладеними принципами розділення. При цьому, питання інтенсифікації і активізації внутрішньошарових процесів поставало при дослідженні робочих органів кожного покоління сепараторів [4–17].

Найбільш класичним рішенням інтенсифікації внутрішньошарових процесів з метою їх орієнтації вздовж отворів пробивних решіт є їх профілювання (рис. 1), в результаті якого, частинки, що розташовуються між отворами над перетинками,

перебувають у стані нестійкої рівноваги і процес їх переміщення до отворів пришвидшується.

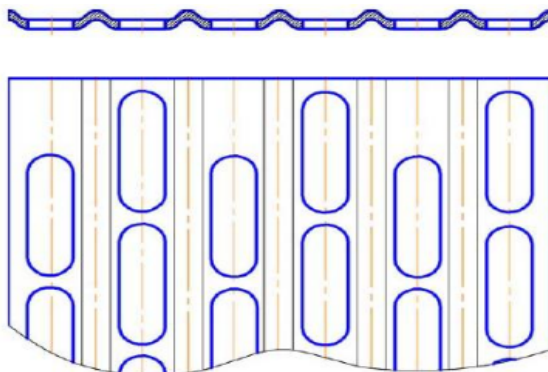


Рисунок 1 – Профільоване решето

Джерело: розроблено авторами

Аналогічні рішення знайшли застосування і досліджувалися як у плоскорешітних, так і у циліндричних сепараторах. Такі решета дозволяють підвищити показники технологічної ефективності, проте складність виготовлення, проблема якісного очищення від забивання не дозволила їм отримати масове використання. Крім того, інтенсифікація поперечного переміщення часток у верхніх шарах зернової маси викликає сумніви.

Іншим шляхом підвищення показників технологічної ефективності решітних сепараторів є використання пруткових елементів, як направляючих для зерна. При цьому вони виступають як повздовжні перетинки, що утворюють робочі отвори решіт (рис. 2).

Пруткові решета інтенсифікують процес сепарації аналогічно до профільованих, при цьому плоске решето Л. Фадєєва [9] (рис. 2 ліворуч) є більш технологічним, ніж профільоване, має менші розміри перетинок між отворами, що збільшує площу його живого перерізу. Дугоподібне пруткове решето [3, 17] (рис. 2 праворуч) також є більш технологічним, ніж профільоване, однак має меншу площу живого перерізу ніж решето Л. Фадєєва. Більші показники технологічної ефективності сепарації на ньому отримуються за рахунок більш жорстких режимів роботи, що не підходить для обробки зерна певних сільськогосподарських культур, які мають низькі показники механічної міцності і можуть пошкоджуватися.

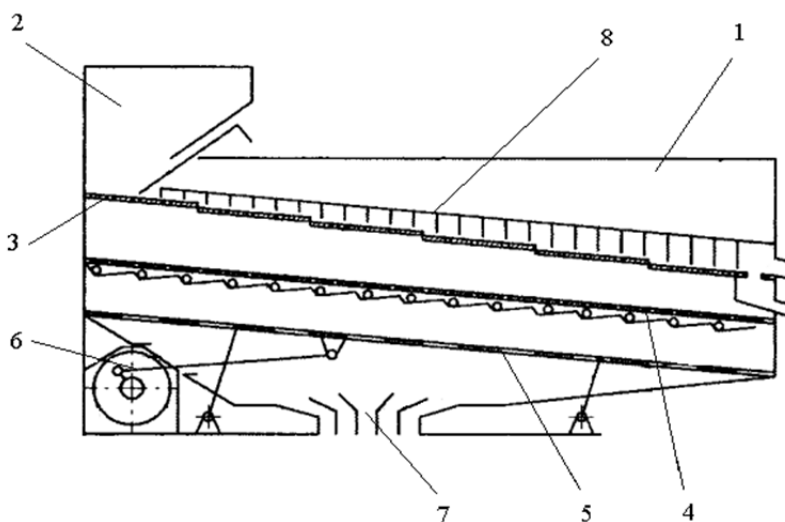


Рисунок 2 – Пруткові решета

Джерело: розроблено авторами

Відомі також аналогічні технічні рішення [15, 16], які дозволяють підвищити ефективність розділення, хоча при цьому також не задіяна у повній мірі складова поперечного переміщення часток у зерновій масі.

Найбільш характерним пристроєм, що інтенсифікує внутрішньосарові процеси у поперечному напрямку є пристрій [5–8] (рис. 3), у якому пасивні розпушувачі створюють відповідні умови. Негативним моментом даного рішення є «віднімання» пасивними активаторами площі живого перерізу решета і ускладнення конструкції додатковими елементами.



1– корпус; 2– бункер з дозатором; 3, 4, 5 – сита; 6– механізм приводу; 7 – дифузор повітряний;
8– пасивні стрижневі розпушувачі.

Рисунок 3 – Схема зерноочисної машини з пасивними розпушувачами

Джерело: розроблено авторами

Інтенсифікація внутрішньосарових процесів шляхом забезпечення оптимального режиму також дозволяє отримати позитивний ефект. Зокрема, такі дії як створення коливань, вібрацій [4–6, 13, 14, 18–20] із заданими обґрунтованими параметрами – амплітудою, частотою і напрямом, забезпечення розшарування маси за рахунок суттєвого підвищення поступальної швидкості часток тощо реалізують загальну концепцію активізації внутрішньосарових процесів, однак, як показує практика, лише у одному повздовжньому напрямку. При цьому прохідні частки, яких менше на підсвічних решетах, можуть не дістатися отворів для просіювання на всій їх площі. Крім того, встановлення жорстких режимів роботи решітних сепараторів негативно відбивається на травмуванні зерна внаслідок заклинювання і травмування обробочі крайки отворів решіт. Відомі способи режимної інтенсифікації за рахунок створення додаткових поперечних коливань решітного стану, однак дані способи не досліджені і існують лише у вигляді гіпотез, пропозицій і корисних моделей [18–20]. Крім того, аналіз таких можливостей говорить про виникнення невірноважених сил і моментів, які можуть негативно вплинути на стійкість конструкції та надмірне її ускладнення.

Постановка завдання. Актуальною задачею наших досліджень є розробка конструкції і підготовка до проведення експериментальних досліджень решітного полотна коливального сепаратора, яка б задовольняла вимогам конструкційної простоти, технологічності виготовлення, при цьому забезпечувала високі показники

технологічної ефективності розділення зернових матеріалів за рахунок інтенсифікації внутрішньосферних процесів.

Виклад основного матеріалу. У основу концепції інтенсифікації внутрішньосферних процесів на плоскому решеті лягло усвідомлення того, що відносний вміст проходової фракції у оброблюваному матеріалі на підсівному решеті незначний і може складати до 10% для зерноочисних машин загального призначення. Внутрішньосферне перемішування часток у вертикальній площині забезпечується встановленням оптимального режиму коливань. Інтенсифікації переміщення часток у горизонтальній площині (у поперечному напрямку) без застосування додаткових пристроїв і ускладнення конструкції, можна досягти шляхом виготовлення решітних полотен із зигзагоподібним розташуванням отворів[21] (рис. 4).



Рисунок 4 – Фрагмент решітного полотна із зигзагоподібним розташуванням отворів
Джерело: розроблено авторами

Дане технічне рішення збільшує до $P=1$ ймовірність потрапляння часток у площину отворів. При русі вздовж запропонованого решета із зигзагоподібним розташуванням отворів, проходові частки, що можуть розміститися на повздовжніх перетинках між отворами, обов'язково будуть спрямовані до останніх. Даний ефект обумовлений тим, що площина отвору дещо відхилена від напрямку повздовжнього переміщення часток. При цьому вся зернова маса буде зміщуватися упоперек решета на величину зміщення отворів від повздовжньої вісі. Дане зміщення буде скомпенсоване отворами наступного ряду, яке має аналогічне розташування, але у дзеркальному відображенні.

Перевірку працездатності і ефективності роботи запропонованого технічного рішення будемо проводити шляхом проведення експериментальних досліджень на лабораторному решітному коливальному сепараторі PetkusWuthaK 294 A (рис. 5).

Для проведення дослідів нами спроектовано і виготовлено решітні полотна із зигзагоподібним розташуванням продовговуватих отворів 2x30 мм (рис. 6), які мають кути відхилення від повздовжньої вісі 10° (рис. 6 ліворуч), 5° (рис. 6 у центрі), і стандартне – 0° (рис. 6 праворуч). З метою отримання достовірних результатів експериментів, розміри, кількість отворів і площа живого перерізу всіх решіт однакова.

Для визначення ефективності роботи дослідних решіт нами заплановано провести серію попередніх експериментів, для чого обрано найбільш впливові змінні фактори:

- питома подача q_b , кг/дм³год, якою визначається продуктивність сепаратора – один з основних показників технологічної ефективності;
- кут нахилу решета α , що визначає швидкість повздовжнього переміщення;
- кут нахилу отворів решета β відносно повздовжньої вісі – дослідний параметр, що визначає ступінь інтенсивності внутрішньосферного переміщення часток у площині решета;
- частота коливань n , яка регулює ступінь інтенсивності внутрішньосферного переміщення часток у вертикальній площині.



Рисунок 5 – Лабораторний сепаратор PetkusWuthaK 294 A

Джерело: розроблено авторами



Рисунок 6 – Загальний вигляд експериментальних решіт

Джерело: розроблено авторами

Для проведення дослідів обрано післякомбайновий зерновий ворох озимої пшениці природної вологості. Для уникнення забивання отворів решета, підвищення однорідності експерименту і зменшення часу на проведення дослідів з зернового вороху вилучено «складні» частки шляхом багаторазової попередньої обробки і видалення зерен, що застрягли у отворах.

Регулювання частоти коливань будемо здійснювати за допомогою частотного перетворювача HE200-T3S-2R2G(рис. 7 ліворуч), тарування якого проводили за допомогою механічного годинникового тахометра ІО-30 (рис. 7 праворуч).

Результати тарування частотного перетворювача HE200-T3S-2R2G наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати тарування частотного перетворювача HE200-T3S-2R2G

№ досліду	Частота струму ν , Гц	Частота коливань решета n , колів/хв
1	50	500
2	45	450
3	40	400
4	35	340
5	30	275
6	25	235

Як видно з таблиці 1, частота струму і коливань решета мають пряму кореляцію в межах $\nu=40\text{--}50$ Гц. При подальшому зменшенні частоти струму, приріст зниження частоти коливань решета дещо зростає.



Рисунок 7 – Регулювання і контроль частоти коливань

Джерело: розроблено авторами

Попередні дослідження запропонованого технічного рішення, окрім встановлення працездатності, повинні дати відповіді на наступні питання:

- виявити міру ефективності запропонованого удосконаленого решітного полотна із зигзагоподібним розташуванням отворів у порівнянні з базовим – прямолінійним;
- встановити раціональне значення кута нахилу осей отворів для забезпечення найбільшої ефективності сепарації;
- узгодити конструкційні і режимні параметри сепаратора.

Висновки. Провівши огляд засобів і способів підвищення ефективності процесу сепарації зерна на плоскорешітних коливальних сепараторах можна зробити наступні висновки:

- підвищення ефективності роботи плоскорешітних коливальних робочих органів можливо досягти лише шляхом інтенсифікації внутрішньосарових процесів у оброблюваному матеріалі;
- активізація внутрішньосарових процесів досягається двома основними шляхами – встановленням оптимальних режимів (за рахунок механізму приводу робочих органів) та шляхом застосування конструкційних активаторів, причому, напрями їх дії переважно не співпадають. Застосування режимного способу активізації інтенсифікує процеси здебільше у вертикальній площині, сприяючи сегрегації часток, використання ж конструкційних елементів дозволяє покращити умови у горизонтальній площині (у площині решета). При цьому застосування додаткових пристроїв ускладнює конструкцію;
- найбільш органічним способом інтенсифікації внутрішньосарових процесів у оброблюваному матеріалі є застосування плоских решіт із зигзагоподібним розташуванням продовгуватих отворів, що активізують їх взаємодію з частками зернової суміші у повздовжньому і поперечному напрямках, та узгодження конструкційних параметрів решета з режимними параметрами коливальних органів.

Список літератури

1. Васильковський О.М., Мачок Ю.В. Аналіз способів інтенсифікації процесу сепарації зернових матеріалів на решетах. *Матеріали V міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання»*. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2018. С. 127–129.
2. Котов Б. І., Степаненко С. П., Пастушенко М. Г. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерно матеріалів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин* : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кіровоград, 2003. Вип. 33. С.53–59.
3. Лузан П.Г., Васильковський О.М. Нові конструкції решіткових сепараторів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин* : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Вип. 27. 1999. С. 123–127.
4. Тіщенко Л. М. Наукові основи процесів вібровідцентрового сепарування зернових сумішей : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11 / Харків, 2004. 403 с.
5. Котов Б. І., Степаненко С. П., Калініченко Р. А. Теоретичне обґрунтування руху частинки зерна на вібропневморешеті при дії розпушуючих робочих органів. *Науковий вісник Національного аграрного університету*. 2007. Вип. 115. С. 112–117.
6. Степаненко С. П. Підвищення ефективності вібропневматичних сепараторів зерна : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Глеваха, 2008. - 21 с.
7. Степаненко С. П. Аналіз взаємодії пасивного розпушувача із віброзрідженим зерновим шаром. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України* : зб. наук. пр. Дослідницьке, 2005. Вип. 8 (22). Кн. 2. С. 290–297.
8. Степаненко С. П. Вплив параметрів пасивних розпушувачів на ефективність вібропневматичної сепарації зерна. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. 2006. Вип.41. С. 153–160.

9. Решето Фадєєва: пат. 37527 Україна: МПК В07В 1/46, № u200809604; заявл. 22.07.2008; опубл. 25.11.2008, Бюл. № 22.
10. Решето: пат 82093 Україна: МПК В 07 В 1/00, u2012 14385; заявл. 17.12.2012; опубл. 25.07.2013, Бюл. № 14.
11. Решето з прямокутними отворами: пат. 55286 Україна: МПК В07В 1/00, А01В 76/00. № u 2010 06635; заявл. 31.05.10; опубл. 10.12.2010, Бюл. №23.
12. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I. Theoretical research of separation process grain mixtures. *Tehnika Ta Energetika*. 2019. 10 (4). P.137–143.
13. Тищенко Л.М., Ольшанський В.П., Харченко Ф.М., Харченко С.О. Моделювання динаміки зернової суміші при сепарації на рифленому решеті вібросепаратора. *Інженерія природокористування*. 2014. № 2 (2). С. 134–137.
14. Ольшанський В. П. Про рух неоднорідної дрібнозернистої суміші по плоскому віброрешету. *Інженерія переробних і харчових виробництв*. 2017. 2(1). С. 17–22.
15. Мороз С.М., Васильковський М.І., Васильковський О.М. Обґрунтування діаметрів стержнів пруткового решета. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація* : зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту. Вип. 14. Кіровоград : КНТУ, 2004. С. 72–78.
16. Васильковський О.М., Лещенко С.М., Мороз С.М., Нестеренко О.В. До створення концепції «ідеального» решета зернового сепаратора. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* Вип. 50, 2020. Кропивницький: ЦНТУ. С. 52–58.
17. Васильковський О.М. Розробка конструкції та обґрунтування параметрів відцентрового решітного сепаратора зерна: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11 «Машини та засоби механізації сільськогосподарського виробництва». Кіровоград, 2001. 18 с.
18. Спосіб інтенсифікації сепарації насінневих сумішей на плоских решетах : пат 50874 Україна: МПК В 07 В 1/00; № u 2009 13 683; заявл. 28.12.2009; опубл. 25.06.2010, Бюл. № 12.
19. Спосіб інтенсифікації сепарації насінневих сумішей на штапованих решетах: пат. 58042 Україна: МПК В 07 В 1/28; № u 2010 11 203; заявл. 20.09.2010; опубл. 25.03.2011, Бюл. № 16.
20. Спосіб інтенсифікації сепарації насінневих сумішей на решетах з прямокутними отворами: пат. 84498 Україна: МПК В07В 1/00; u 2013 04 561; заявл. 11.04.2013; опубл. 25.10.2013, Бюл. № 20
21. Плоске решето: пат 154304 Україна: МПК 01F12/00, В07В13/02; u202302258; заявл. 12.05.2023, опубл. 01.11.2023, бюл. № 44.

References

1. Vasytkovskyi, O.M., & Machok, Yu.V. (2018). Analysis of methods for intensification of the process of separation of grain materials on sieves. *Materialy V mizhnarodnoi naukovо-tekhnichnoi konferentsii «Kramarovski chytannia»*. Kyiv: Vydavnychiy tsentr NUBiP Ukrainy, 127–129. [in Ukrainian].
2. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P., & Pastushenko, M. H. (2003). Trends in the development of designs of machines and equipment for cleaning and sorting grain materials. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia s-h mashyn. Kirovohrad*, Vol. 33, 53–59 [in Ukrainian].
3. Luzan, P.H., & Vasytkovskyi, O.M. (1999). New designs of sieve separators. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, Vol. 27, 123–127 [in Ukrainian].
4. Tishchenko L. M. (2004). *Scientific foundations of the processes of vibrocentrifugal separation of grain mixtures*. Doctor's thesis . Kharkiv [in Ukrainian].
5. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P., & Kalinichenko, R. A. (2007). Theoretical justification of the movement of grain particles on a vibropneumatic sieve under the action of loosening working bodies. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho ahrarnoho universytetu*, Vol. 115, 112–117 [in Ukrainian].
6. Stepanenko, S. P. (2008). *Increasing the efficiency of vibropneumatic grain separators*. Extended abstract of doctor's thesis . Hlevakha [in Ukrainian].
7. Stepanenko, S. P. (2005). Analiz vzaemodii pasyvnogo rozpushuvacha iz vibrozridzhenym zernovym sharom. [Analysis of the interaction of a passive loosener with a vibrofluidized grain layer.] *Tekhniko-tekhnologichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannia novoi tekhniki i tekhnologii dlia silskoho hospodarstva Ukrainy: Zb. nauk. pr. Doslidnytske*, Vol. 8 (22), part 2, 290–297 [in Ukrainian].
8. Stepanenko, S. P. (2006). The influence of passive openers parameters on the efficiency of vibropneumatic grain separation. *Pratsi Tavriiskoi derzhavnoi ahrotekhnichnoi akademii*. Vol. 41. 153–160. [in Ukrainian].

9. Fadeev sieve: pat. 37527 Ukraina: MPK B07B 1/46 № u200809604; zaiavl. 22.07.2008; opubl. 25.11.2008, Biul. № 22 [in Ukrainian].
10. Sieve: pat 82093 Ukraina: MPK V 07 V 1/00 u 2012 14385; zaiavl. 17.12.2012; opubl. 25.07.2013, Biul. № 14 [in Ukrainian].
11. Sieve with rectangular holes: pat. 55286 Ukraina: MPK V07V 1/00, A01V 76/00. № u 2010 06635; zaiavl. 31.05.10; opubl. 10.12.2010, Biul. №23. [in Ukrainian].
12. Stepanenko, S. P., & Kotov, B. I. (2019). Theoretical research of separation process grain mixtures. *Tehnika Ta Energetika*. Vol. 10 (4). 137–143. [in England].
13. Tishchenko, L.M., Olshanskyi, V.P., Kharchenko, F.M., & Kharchenko, S.O. (2014). Modeling the dynamics of a grain mixture during separation on a corrugated sieve of a vibrating separator. *Inzheneriia pryrodokorystuvannia*. Vol 2 (2). 134–137 [in Ukrainian].
14. Olshanskyi V. P. (2017). Pro rukh neodnorodnoi dribnozernystoi sumishi po ploskomu vibroreshetu. [On the movement of a heterogeneous fine-grained mixture on a flat vibrating sieve] *Inzheneriia pererobnykh i kharchovykh vyrobnytstv*. 2(1). 17–22. [in Ukrainian].
15. Moroz, S.M., Vasytkovskyi, M.I., & Vasytkovskyi, O.M. (2004). Justification of the diameters of the rods of a bar sieve. *Tekhnika v sil's'kohospodars'komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia: zb. nauk. pr. Kirovohrads'koho nats. tekhn. un-tu*, 14, 72–78 [in Ukrainian].
16. Vasytkovskyi, O.M., Leshchenko, S.M., Moroz, S.M., & Nesterenko, O.V. (2020). To create the concept of an "ideal" sieve for a grain separator. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn: zahal'noderzh.mizhvid.nauk.-tekhn. zb.* Vol. 50, 52–58 [in Ukrainian].
17. Vasytkovskyi O.M. (2001). *Design development and justification of the parameters of a centrifugal sieve grain separator*. Extended abstract of candidate's thesis. Kirovohrad [in Ukrainian].
18. Method of intensification of separation of seed mixtures on flat sieves: pat 50874 Ukraina: MPK V 07 V 1/00; № u 2009 13 683; zaiavl. 28.12.2009; opubl. 25.06.2010, Biul. № 12. [in Ukrainian].
19. Method of intensification of separation of seed mixtures on stamped sieves: pat. 58042 Ukraina: MPK V 07 V 1/28; № u 2010 11 203; zaiavl. 20.09.2010; opubl. 25.03.2011, Biul. № 16. [in Ukrainian].
20. Method of intensification of separation of seed mixtures on sieves with rectangular holes: pat. 84498 Ukraina: MPK V07V 1/00; u 2013 04 561; zaiavl. 11.04.2013; opubl. 25.10.2013, Biul. № 20. [in Ukrainian].
21. Flat sieve: pat 154304 Ukraina: MPK 01F12/00, B07B13/02; u202302258; zaiavl. 12.05.2023, opubl. 01.11.2023, biul. № 44. [in Ukrainian].

Ihor Bazhan, Engineer, **Oleksii Vasytkovskyi**, Prof., PhD tech. sci., **Serhii Leshchenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Amosov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Intensification of the Grain Separation Process on a Flat Oscillating Sieve with a Zigzag Arrangement of Holes

Increasing the quantitative and qualitative performance of agricultural machinery is a pressing task for scientists conducting research in the field of agricultural engineering. This article is devoted to the analysis of methods and means of intensification of intralayer processes occurring in grain material during sieve separation in order to increase the efficiency of grain cleaning by size on flat-screen vibrating machines.

A review of technical solutions that ensure increased efficiency of sieve cleaning of grain materials on flat-screen vibrating separators was conducted. Analysis of technical solutions allowed to identify the physical bases of the appearance of the effect of increasing the indicators of technological efficiency of sieve processing of grain. It was established that an increase in separation efficiency can be achieved only by intensifying the processes of mutual movement (segregation) of particles inside the layer of material in the vertical and horizontal planes. It was assumed that the most effective is the activation of intralayer processes in the processed material, which is provided in two ways – by establishing the optimal kinematic mode of oscillations and the structural parameters of the sieve itself. A new, patented technical solution is presented – a sieve with a zigzag arrangement of holes and the main tasks and elements of the methodology of previous studies are formed.

Conclusions. Increasing the efficiency of the flat-screen vibrating working bodies can be achieved only by intensifying the intralayer processes in the processed material. Activating the intralayer processes is achieved in two main ways – by establishing optimal modes and by using structural activators, and their directions of action mostly do not coincide. The use of the regime activation method intensifies the processes mostly in the vertical plane, contributing to the segregation of particles, while the use of structural elements allows improving the conditions in the horizontal plane (in the plane of the sieve). At the same time, the use of additional devices complicates the design. The most organic way to intensify intralayer processes in the processed material is to use

flat sieves with a zigzag arrangement of oblong holes, which activate their interaction with particles of the grain mixture in the longitudinal and transverse directions and to match the structural parameters of the sieve with the operating parameters of the oscillations.

grain, grain material, cleaning, sieve, separator, intensification, separation, efficiency, intralayer processes, activation, zigzag

Одержано (Received) 28.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 26.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

УДК 631.3:66.081.3+537.226

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.202-214>

Б.І. Котов, проф., д-р техн. наук

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», сел. Глеваха, Україна

В.Г. Мироненко, проф., д-р техн. наук, **С.П. Степаненко**, д-р техн. наук, ст. наук. співр.

Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва НААН України, сел. Глеваха, Україна

В.О. Грищенко, доц., канд. техн. наук

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

Ю.І. Панцир, доц., канд. техн. наук, **І.Д. Герасимчук**, доц., канд. техн. наук

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», сел. Глеваха, Україна

e-mail: stepanenko_s@ukr.net

Математичне моделювання процесу сушіння матеріалу в барабанній сушарці, як об'єкта автоматичного керування

В даній роботі розроблено математичний опис сушіння в барабанних сушарках у вигляді системи диференціальних рівнянь, що моделює залежність температури та вологості матеріалу від параметрів сушильного агента та конструктивних характеристик. Створено спрощені моделі в MatlabSimulink. Запропоновано концепцію автоматичного керування з компенсацією перехресних зв'язків, що підвищує ефективність регулювання, стабільність роботи сушарки та оптимізує енергоспоживання.

процес сушіння, моделювання, зернові матеріали, барабанна сушарка, автоматичне керування

Постановка проблеми. Сушіння рослинних матеріалів є одним із важливих і енергоємним процесом післязбиральної обробки урожаю рослинних культур. Враховуючи широкий асортимент продукції, яка потребує зневоднення для тривалого зберігання, найбільш універсальними установками є прямоточні пневмобарабанні агрегати. Сама за універсальності стосовно різноманіття матеріалів, які можна висушувати, в обертовому барабані, при різній початковій вологості і засміченості, пневмобарабанні агрегати знайшли широке застосування і розповсюдження в різних країнах і галузях виробництва. Але не зважаючи на суттєві переваги і розповсюдження пневмобарабанних агрегатів, процеси регулювання

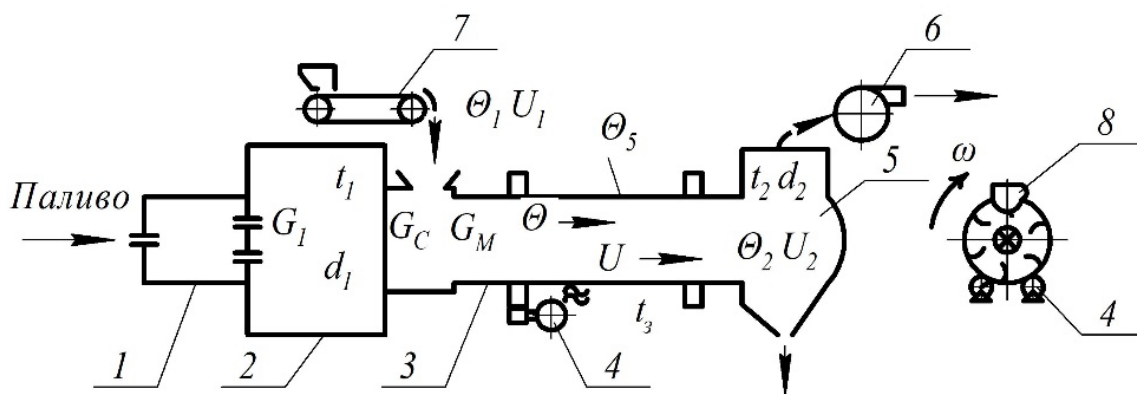
© Б.І. Котов, В.Г. Мироненко, С.П. Степаненко, В.О. Грищенко, Ю.І. Панцир, І.Д. Герасимчук, 2024

температурно-вологісних режимів не набули досконалої форми, незважаючи на значні досягнення в галузі цифрової автоматики. Визначення алгоритму раціональними (оптимальними) режимами сушіння нерозривно пов'язано із складністю математичного опису процесів, тепло- і масообмінних сушильного агента елементів і конструкцій барабанів з матеріалом і процесом його транспортування, при чергуванні відлежування частинок та контактування їх з сушильним агентом. Взаємопов'язаність тепломасообмінних і механічних процесів значно утруднює вибір способу автоматичного керування процесом сушіння в обертовому барабані. Для вибору енергоефективного способу автоматизації керування режимом сушки, необхідно мати математичний опис динаміки зміни параметрів сушильного агента і матеріалу, який визначає усі впливові зв'язки між регулюємими і регулюючими параметрами та зовнішніми збуреннями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологію сушіння в барабанних агрегатах, методи розрахунків і вибори параметрів режиму описано в монографіях [1-3], але у цих роботах описана статика процесу і визначення показників функціонування барабанних сушарок. Методи підвищення ефективності процесу сушіння рослинного матеріалу в барабанних сушарках висвітлені в роботах [4-6]. Основні положення сушіння, які можна використати в теоретичних дослідженнях наведені в роботах [3-12]. Висвітлені математичні моделі, являють собою системи нелінійних рівнянь, які адекватно описують процеси сушіння за умови незмінності регулюючих параметрів: витрат матеріалу і сушильного агента, тому потребують числових методів розрахунку. У зв'язку з цим виникає задача математичного опису динаміки зміни основних параметрів сушарки при змінних регулюючих параметрах.

Постановка завдання. Визначення динаміки зміни параметрів пневмобарабанної сушарки та статичні характеристики процесу придатних для синтезу систем автоматичного керування режимами функціонування сушильного агрегата.

Виклад основного матеріалу. Процес сушіння в пневмобарабанних сушарках з подовжнім рухом сушильного агента і матеріалу – плановий процес з розподіленими параметрами. В процесі переміщення вздовж обертового барабана матеріал періодично пересипається з лопатевої насадки, і при цьому частинки контактують з сушильним агентом. Температура і вологість матеріалу та сушильного агента змінюються за довжиною барабана. Технологічно-конструктивна схема на рис. 1.



1 – топка; 2 – камера змішування; 3 – барабан; 4 – привод барабана;

5 – вивантажувальна частина; 6 – димовсмоктувач; 7 – живильник; 8 – насадка.

Рисунок 1 – Конструктивно-технологічна схема пневмобарабанної сушарки

Джерело: розроблено авторами

Для побудови математичної моделі процесу сушіння зробимо ряд спрощуючих припущень. Параметри матеріалу і сушильного агента розподілені за довжиною барабана і зосередженні у поперечному перетині теплофізичні характеристики матеріалу і сушильного агента і елементів конструкції барабана постійні і дорівнюють середнім за процес значенні. Теплопередача випромінюванням, теплопровідністю і конвекцією враховуються коефіцієнтами теплообміну.

Швидкість зміни вологовмісту матеріалу можна прийняти лінійно залежній від температурного напору (різниці температур сушильного агента і матеріалу) [12].

Правомірність такого підходу впливає з аналізу рівняння кінетики О. Ликова [10]:

$$\alpha F(t - \theta) = m_M r \frac{dU}{d\tau} (1 + R_B) \quad (1)$$

де $R_B = \frac{cd\theta}{rdU}$ – критерій Ребіндера;

m_M – маса тіла (об'єму дисперсного матеріалу, $m_M = V_M \rho_M$);

r – питома теплота пароутворення;

C – питома теплоємність матеріалу;

F – поверхність матеріалу (теплообміну);

α – коефіцієнт складного теплообміну;

U – вологовміст матеріалу;

t_1, θ – температура сушильного агента і матеріалу;

τ – час.

Температура сушильного агента; t не є постійною. Тому запишемо рівняння теплового балансу для сушильного агента

$$\alpha F(t - \theta) = m_C C_P \frac{dt}{d\tau} \quad (2)$$

де m_C – маса сушильного агента в об'ємі барабана; C_P – питома теплоємність сушильного агента при сталому тиску

Рівняння теплового балансу для матеріалу з урахуванням очевидного співвідношення:

$$-\frac{dU}{d\tau} = \frac{C_M}{rR_B} \cdot \frac{d\theta}{d\tau} \quad (3)$$

можна записати у вигляді:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{\alpha F}{C_M m (1 + R_B^{-1})} (t - \theta) \quad (4)$$

Рівняння матеріального балансу для сушильного агента

$$m_M \frac{dd}{d\tau} = -m_M \frac{dU}{d\tau} \quad (5)$$

де d – вологовміст сушильного агента; m_M – маса матеріалу в барабані

Розкриваючи повні диференціали параметрів (U, θ, t, d) в рівняннях (1,2,4,5) ($dT = \frac{\partial T}{\partial \tau} d\tau + \frac{\partial T}{\partial y} dy$) і враховуючи, що $\frac{dy}{d\tau} = V$, (де V – швидкість переміщення потоку матеріалу, сушильного агента; y – координата довжини), матимемо після перетворень

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + V_M \frac{\partial \theta}{\partial y} = k_\theta (t - \theta); \quad k_\theta = \frac{\alpha F}{C_{Mm}(1+R_{VB}^{-1})m_M}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + V_C \frac{\partial t}{\partial y} = k_t (t - \theta); \quad k_t = \frac{\alpha F}{m_C C_P}; \quad (7)$$

$$-\frac{\partial U}{\partial \tau} + V_M \frac{\partial U}{\partial y} = k_C (t - \theta); \quad k_C = \frac{\alpha F}{r R_{VM} m_M}; \quad (8)$$

$$\frac{\partial d}{\partial \tau} + V_C \frac{\partial d}{\partial y} = -\frac{m_M}{m_C} \left(\frac{\partial U}{\partial \tau} + V_M \frac{\partial U}{\partial y} \right); \quad (9)$$

де τ – питома поверхня матеріалу.

Отримана система рівнянь в частинних похідних визначає зміну параметрів матеріалу і сушильного агента в часі і за координатою. Втрати теплоти барабаном в оточуюче середовище, можна врахувати збільшенням величини питомої теплоти пароутворення ($r' = r + \Delta r$).

Оскільки система рівнянь (8-9) строгого аналітичного розвитку немає, скористуємось наближеним методом дослідження [12].

Для стаціонарного режиму сушіння (після перехідного процесу розігріву) в кожній точці об'єму барабана параметри в часі не змінюються, параметри матеріалу і сушильного агента будуть змінними відносно координати y (довжини барабана). Отже прирівнюючи похідні за часом до нуля отримаємо систему звичайних диференціальних рівнянь.

$$\frac{d\theta}{dy} = k_1 (t - \theta) \quad (10)$$

$$\frac{dt}{dy} = k_2 (\theta - t) \quad (11)$$

$$\frac{dU}{dy} = k_3 (t - \theta) \quad (12)$$

$$\text{де } k_1 = \frac{k_\theta}{V_M}; \quad k_2 = \frac{k_t}{V_C}; \quad k_3 = \frac{k_C}{V_M};$$

з граничними умовами: $y = 0$; $\theta = \theta_1$; $U = U_1$; $t = t_1$; $d = d_1$; де $(\theta_1, U_1, t_1, d_1)$ параметри матеріалу і сушильного агента на вході в барабан.

Розв'язок рівнянь (10) і (12) за прийнятих граничних умов відносно шуканих змінних $\theta(y)$, $t(y)$, $(t - \theta)(y)$, отримано у вигляді

$$\theta(y) = \theta_1 + \frac{k_1}{k} \Delta T_1 (1 - e^{-ky}); \quad (13)$$

$$t(y) = t_1 + \frac{k_2}{k} \Delta T_1 (1 - e^{-ky}); \quad (14)$$

$$\Delta T(y) = t_y - \theta_y = \Delta T_1 e^{-ky}; k = k_1 + k_2. \quad (15)$$

Підставляючи значення $\Delta T(y)$ з рівняння (15) в рівняння (12), матимемо

$$-\frac{dU(y)}{dy} = k_3 \cdot \Delta T_1 e^{-ky}, \quad (16)$$

або після розв'язку (за умови: $y = 0; U = U_1$)

$$U(y) = U_1 - \frac{k_3}{k} \Delta T_1 (1 - e^{-ky}). \quad (17)$$

Аналогічно для вологовмісту сушильного агента з рівнянь (9) і (16)

$$\frac{dd(y)}{dy} = \frac{m_M}{m_C} k_3 \Delta T_1 e^{-ky}, \quad (18)$$

$$d(y) = d_1 + \frac{k_3}{k} \cdot \frac{m_M}{m_C} \Delta T_1 e^{-ky}. \quad (19)$$

Отриманні рівняння (13,14,17,19) визначають статичну характеристику сушильного барабана, а саме – розподіл параметрів матеріалу і сушильного агента за довжиною барабана в залежності від режиму процесу (t , d , V_M , $V_{c.a.}$, θ_M , U).

Взявши похідні від параметрів $\theta(y)$ і $t(y)$ за координатою і підставивши отримані значення $d\theta/dy$ і dt/dy в рівняння (6) і (7), а (16) і (19) в рівняння (7) і (8) матимемо систему рівнянь, що описує перехідний режим функціонування сушильного барабана:

$$\frac{d\theta(\tau)}{d\tau} = -k_\theta \Delta T_1 e^{-ky} + k_\theta (t - \theta), \quad (20)$$

$$\frac{dt(\tau)}{d\tau} = k_t \Delta T_1 e^{-ky} + k_t (\theta - t), \quad (21)$$

$$\frac{dU(\tau)}{d\tau} = -k_C \Delta T_1 e^{-ky} + k_C (t - \theta), \quad (22)$$

$$\frac{dd(\tau)}{d\tau} = -k_C \frac{m_M}{m_{c.a.}} \Delta T_1 e^{-ky} + k_C (t - \theta). \quad (23)$$

Рівняння системи (20-23) є нелінійними тому, що до коефіцієнтів k_θ, k_t, k_C входить змінна маса матеріалу, величину якої можна визначити через вологовміст матеріалу

$$m_M = m_0 (1 + U), \quad (24)$$

де m_0 – маса абсолютно сухого матеріалу в барабані.

Маса сушильного агента в барабані складається із маси сухого повітря ($m_{оп}$) та маси води видаленої з матеріалу $m_0(U_1 - U)$. Таким чином, враховуючи, що $m_{оп} \ll m_0(u_1 - u)$, масу сушильного агента можна виразити

$$m_{c.a.} = m_0 (U_1 - U) \quad (25)$$

Теплоємність барабана з насадкою можна додати до теплоємності матеріалу, враховуючи те, що він більшість часу знаходиться на поверхні барабана і насадки. Таким чином, коефіцієнти k_θ, k_t, k_c в рівняннях (20-23) можна записати в такому вигляді:

$$k'_\theta = \frac{\alpha F}{C_M^* m_0 (1+U) + C_6 m_6}; \quad (26)$$

$$k'_t = \frac{\alpha F}{C_{ca} m_0 (U_1 - U)}; \quad (27)$$

$$k'_c = \frac{\alpha F}{r R_b m_0 (1+U)}; \quad (28)$$

$$k = \frac{k_\theta}{V_M} + \frac{k_t}{V_{ca}}, \quad (29)$$

де $C_M^* = C_M(1 + R_b^{-1})$; C_6, m_6 – питома теплоємність матеріалу барабана та його маса.

Сформульована система нелінійних рівнянь (20–23) із співвідношеннями (26–29), при початкових умовах: $\tau = 0$; $t = t_1$; $\theta = \theta_1$; $U = U_1$; $d = d_1$; $y = 0$; $V_M = V_1$; $V_{ca} = V_{ca1}$ визначає динамічні характеристики сушильного барабана (зміну в часі параметрів сушильного процесу) з урахуванням розподіленості за довжиною сушильного тракту і може бути розв’язана в комп’ютерних середовищах *MathCad* або *MatLab* (остання програма має переваги).

Розв’язком системи нелінійних диференціальних рівнянь (у звичайних похідних) (20–23) визначається зміна параметрів сушильного агента і матеріалу в часі та за координатою.

Розроблена модель процесу сушіння в середовищі *MatLabSimulink*, схема наведена на рис. 2.

Величина маси сухого матеріалу в барабані залежить від частоти обертання барабана $m_0(\omega)$.

Задача керування процесом сушіння полягає у забезпеченні висушування вологого матеріалу до заданої вологості при певній продуктивності установки по сухому матеріалу і не перевищенні температури матеріалу критичного значення. Основним збуренням процесу є зміна початкової вологості матеріалу. Основна регулюєма величина процесу – вологість матеріалу на виході барабана і контролюєма температура сухого матеріалу.

На рис. 3 – рис. 5 наведено розподіл параметрів зерна і сушильного агента за довжиною барабана зерносушарки СЗПБ-2 та залежність швидкості зневоднення зерна в барабані сушарки СЗПБ-2 від різниці температур сушильного агента і зерна.

Тому для аналізу і вибору способу керування процесом сушіння більш інформативною моделлю процесу сушіння буде структурна модель динаміки теплових процесів в барабанній сушарці, на основі лінеаризації нелінійних рівнянь шляхом відомої процедури розкладення в ряд Тейлора навколо точки усталеного процесу Z_0 [15] та заміною змінних у часі параметрів (t, θ, U) через їх прирости відносно встановлених (статичних) значень ($Z = Z_0 + \Delta Z$). Використовуючи лінеаризації складових рівнянь ($e^{-ky} = 1 - ky$; $\frac{1}{1+U} = c - bU$), та заміну змінних: $U = U_0 + \Delta U$; $t = t_0 + \Delta t$; $\theta = \theta_0 + \Delta \theta$, після підстановки отриманих значень в рівняння (20 і 22), множення і нехтування складовими другого порядку малосності, віднімання рівнянь

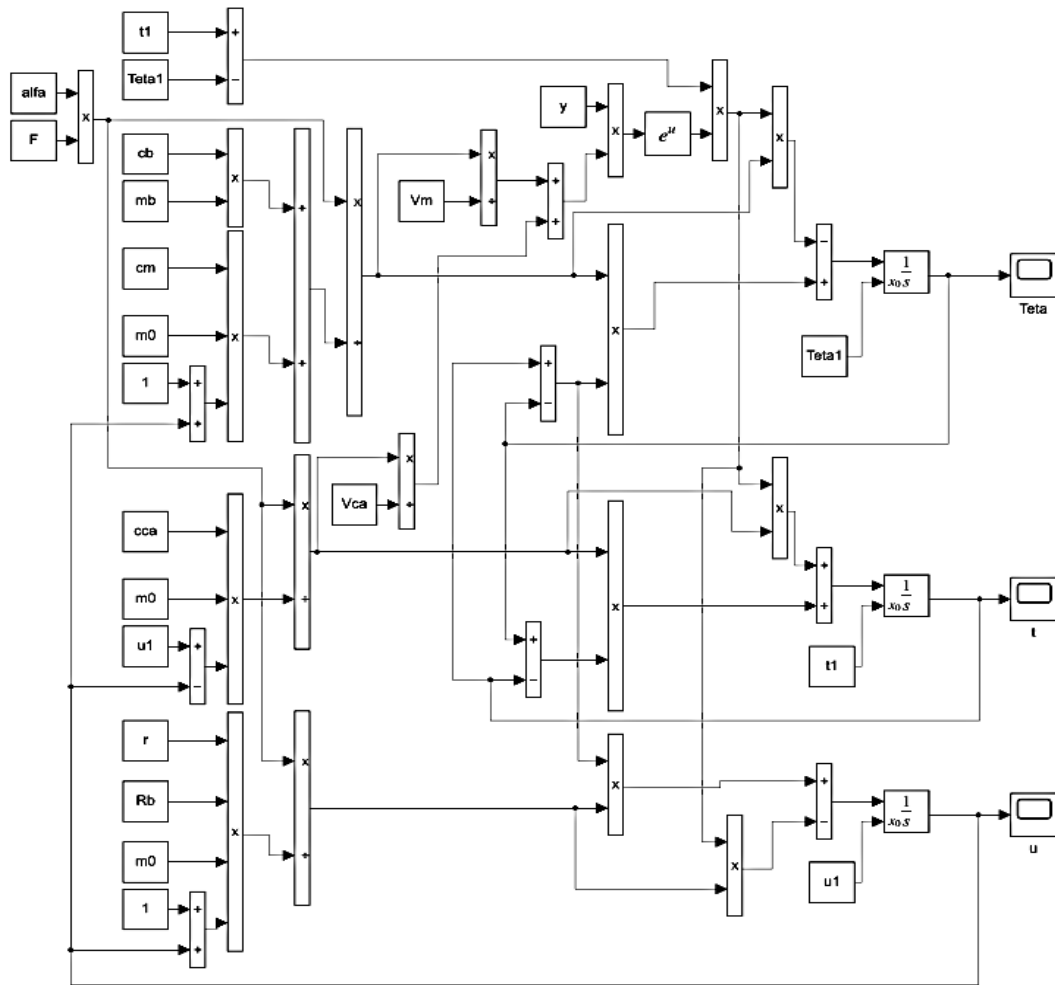
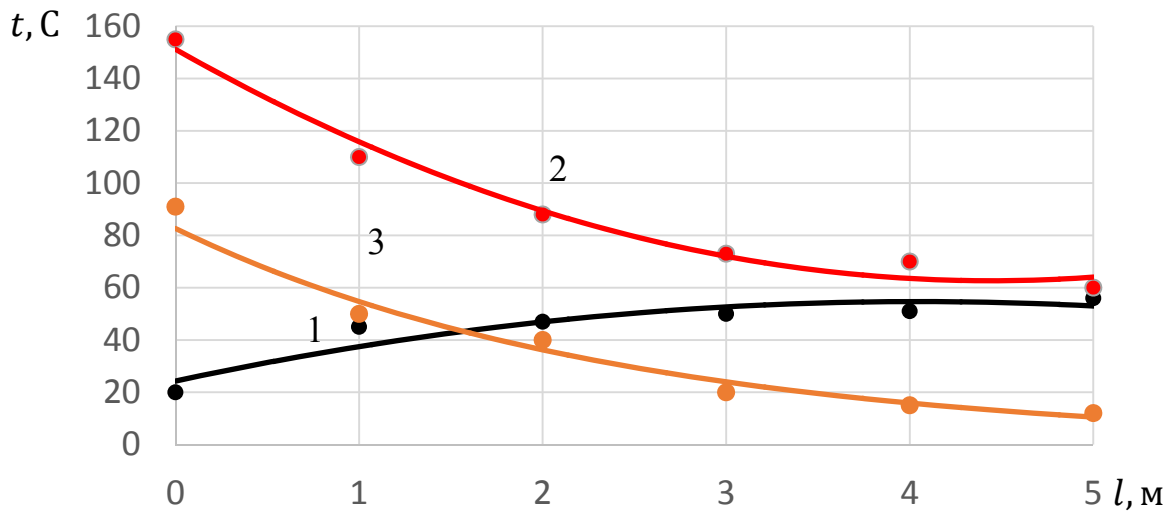


Рисунок 2 – Схема імітаційної моделі сушіння в барабанній сушарці в комп'ютерному середовищі *MatLab Simulink*

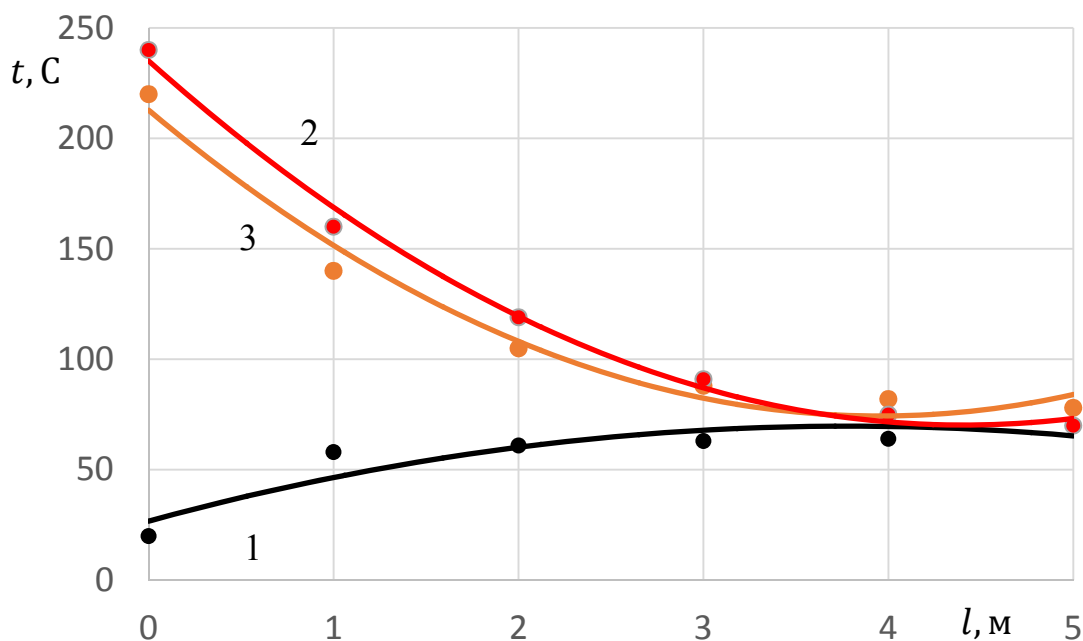
Джерело: розроблено авторами



1 - θ ; 2 - t ; 3 - U .

Рисунок 3 – Розподіл параметрів зерна і сушильного агента за довжиною барабана зерносушарки СЗПБ-2

Джерело: розроблено авторами



1 - θ ; 2 - t; 3 - U.

Рисунок 4 – Зміна параметрів процесу сушіння зерна за довжиною в барабані зерносушарки СЗПБ-2

Джерело: розроблено авторами

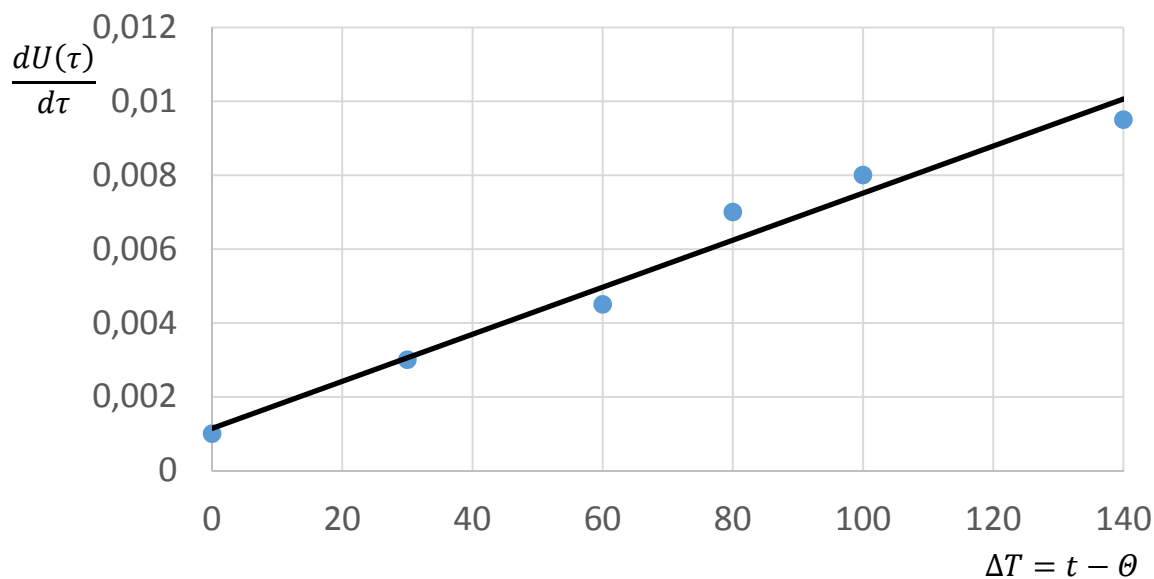


Рисунок 5 – Залежність швидкості зневоднення зерна (в барабані сушарки СЗПБ-2) від різниці температур сушильного агента і зерна

Джерело: розроблено авторами

статисти і, застосовуючи перетворення Лапласа [15], отримано систему рівнянь (20–22) в операторній формі:

$$(T_1 p + 1)\Delta\theta(p) = k_1\Delta t_1(p) + k_2\Delta\theta_1(p) + k_3\Delta U(p) + k_4\Delta V_M(p) + k_5\Delta V_C(p) + k_6\Delta t(p) \quad (30)$$

$$(T_2 p + 1)\Delta t(p) = k_7 \Delta t_1(p) + k_8 \Delta \theta_1(p) + k_9 \Delta U_1(p) + k_{10} \Delta U(p) + k_{11} \Delta V_M(p) + k_{12} \Delta V_C(p) + k_{13} \Delta \theta(p) \quad (31)$$

$$(T_3 p + 1)\Delta U(p) = k_{14} \Delta t_1(p) + k_{15} \Delta \theta_1(p) + k_{16} \Delta \theta(p) + k_{17} \Delta V_M(p) + k_{18} \Delta V_C(p) + k_{19} \Delta t(p) \quad (32)$$

де $T_1 = \frac{c_M^* m_0 + c_b m_b}{\alpha F}$; $T_2 = \frac{c_M m_0}{\alpha F}$; $T_3 = \frac{r R_b m_0}{\alpha F}$;

$k_1 - k_{20}$ – коефіцієнти – сталі величини, які виражаються через коефіцієнти лінеаризації, та сталі величини статичної характеристики;

R_b – коефіцієнт Ребіндера.

З рівнянь (30–32) визначені передаточні функції основних динамічних ланок по каналах керування. За керовані параметри прийнято $\Delta U_2(p)$ і $\Delta \theta_2(p)$, а управляючими параметрами визначені: зміна витрат сушильного агента, визначає швидкість $\Delta V_C(p)$ та швидкість переміщення матеріалу вздовж барабана, яка залежить від швидкості сушильного агента $V_C(p)$ та частоти обертання барабана W_6 . Температура сушильного агента стабілізується на вході барабана $t_1 = t$ задане значення.

Передаточні функції динамічних ланок визначені за очевидними співвідношеннями [15–18]:

$$\begin{aligned} W_1(p) &= \frac{\Delta \theta_1(p)}{\Delta t_1(p)} = \frac{k_1}{T_1 p + 1}; W_3(p) = \frac{\Delta \theta(p)}{\Delta u(p)} = \frac{k_3}{T_1 p + 1}; W_4(p) = \frac{\Delta \theta(p)}{\Delta V_M(p)} = \frac{k_4}{T_1 p + 1}; \\ W_5(p) &= \frac{\Delta \theta(p)}{\Delta V_C(p)} = \frac{k_5}{T_1 p + 1}; W_6(p) = \frac{\Delta \theta(p)}{\Delta V_C(p)} = \frac{k_6}{T_1 p + 1}; \\ W_7(p) &= \frac{\Delta t(p)}{\Delta t_1(p)} = \frac{k_7}{T_2 p + 1}; W_{10}(p) = \frac{\Delta t(p)}{\Delta u(p)} = \frac{k_{10}}{T_2 p + 1}; \\ W_{11}(p) &= \frac{\Delta t(p)}{\Delta V_M(p)} = \frac{k_{11}}{T_2 p + 1}; W_{12}(p) = \frac{\Delta t(p)}{\Delta V_C(p)} = \frac{k_{12}}{T_2 p + 1}; \\ W_{14}(p) &= \frac{\Delta u(p)}{\Delta t_1(p)} = \frac{k_{14}}{T_3 p + 1}; W_{16}(p) = \frac{\Delta u(p)}{\Delta \theta(p)} = \frac{k_{16}}{T_3 p + 1}; \\ W_{17}(p) &= \frac{\Delta u(p)}{\Delta V_M(p)} = \frac{k_{17}}{T_3 p + 1}; W_{18}(p) = \frac{\Delta u(p)}{\Delta V_C(p)} = \frac{k_{18}}{T_3 p + 1}; \\ W_{19}(p) &= \frac{\Delta u(p)}{\Delta t(p)} = \frac{k_{19}}{T_3 p + 1}; \end{aligned}$$

Рівняння динаміки теплогенератора для сушильного барабана на основі теплового балансу визначено [17–21] у вигляді

$$(T_4 p + 1)\Delta t_1(p) = k_{19} \Delta G_n + k_{20} \Delta G_c(v_2) \quad (33)$$

де G_n – витрати палива;

$\Delta G_c = S_6 \Delta V_C S_c$ – витрати сушильного агента;

S_6 – поперечний перетин барабана;

V_C – швидкість сушильного агента;

На основі рівнянь (30–32) та визначених передаточних функцій складена структурна схема лінійної моделі (рис. 6.)

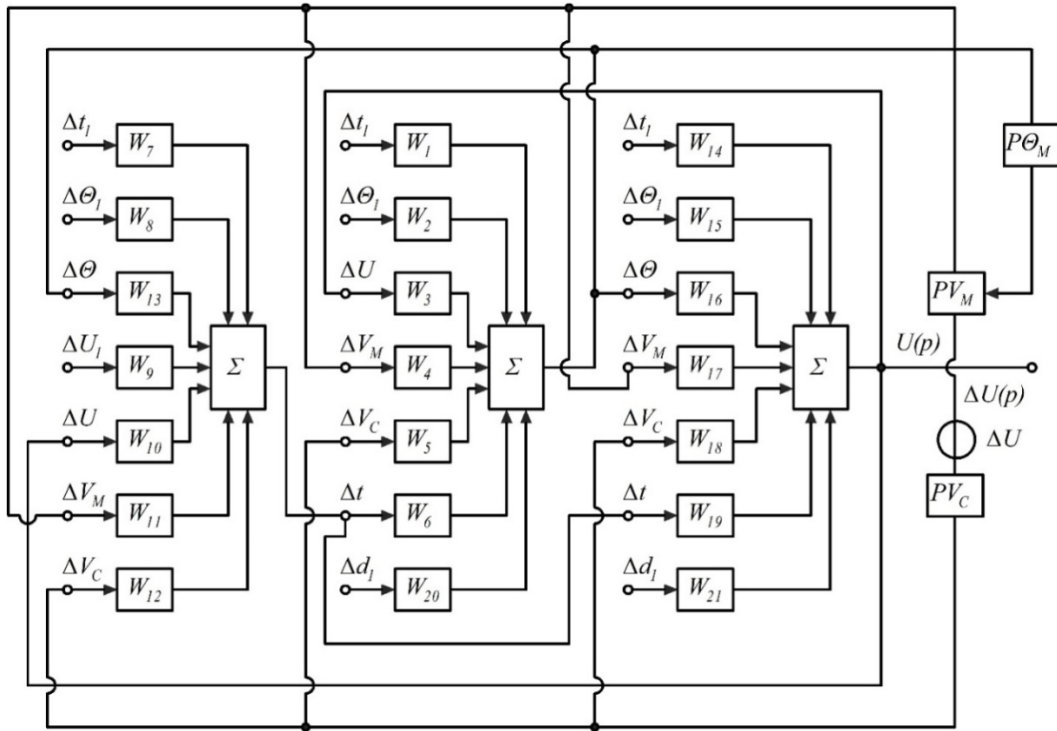


Рисунок 6 – Структурна схема лінійної моделі процесу сушки в барабані з контуром керування
Джерело: розроблено авторами

На основі аналізу структурної моделі визначено напрямки автоматизації процесу керування режимом сушки за алгоритмом реалізації [19–22]: температура сушильного агенту стабілізується на заданому рівні t_1 та розроблена структурно-логічна схема об'єкта керування рис. 7.

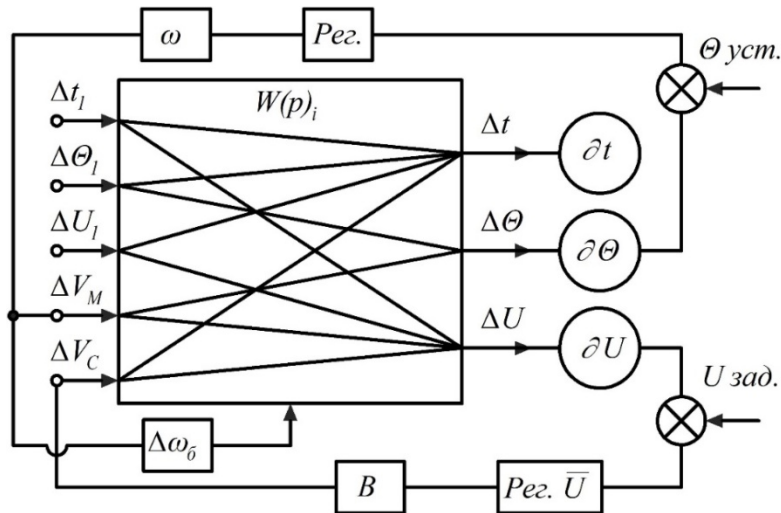


Рисунок 7 – Структурно-логічна схема об'єкта керування
Джерело: розроблено авторами

Вологість матеріалу на виході барабана регулюється зміною подачі сушильного агенту в барабан $G_c(v_2)$.

Температура матеріалу на виході барабана регулюється швидкістю переміщення матеріалу в барабані, тобто кількістю матеріалу в барабані. Швидкість переміщення матеріалу в барабані регулюється зміною частоти обертання барабана. Тобто пропонується принцип кількісного (кількість теплоти) регулювання процесу сушки.

Висновки. Сформульований математичний опис, як системи нелінійних диференціальних рівнянь, в частинних похідних, визначає нестационарний температурно-вологісний режим сушіння матеріалу в барабанних сушарках і дозволяє визначити температуру і вологість матеріалу в залежності від параметрів сушильного агенту і матеріалу з урахуванням конструктивних параметрів барабана.

1. Для використання прикладних комп'ютерних середовищ *MathCad* або *MatLab* для дослідження динаміки барабанної сушарки з урахуванням розподілу параметрів процесу за довжиною барабана сформульовані спрощені математичні моделі, реалізовані в середовищі *MatlabSimulink* та у вигляді лінійної структурної моделі, яка характеризує перехресні зв'язки параметрів матеріалу $\theta(y, \tau)$ і $u(y, \tau)$.

2. При синтезі САК для підвищення якості регулювання слід застосовувати методи компенсації перехресних зв'язків. Запропонована концептуальна модель керування процесом сушіння в обертальному барабані.

Список літератури

1. Калініченко Р. А., Войтюк В. Д. Енергоефективні режими роботи машин для високоєфективної термообробки зернових матеріалів. Ніжин : Вид. центр НДУ ім. Гоголя, 2017. 261 с.
2. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилування, охолодження) : монографія / Б. І. Котов та ін. Ніжин : ПП Лисенко, 2017. 551 с.
3. Ткаченко С. Й., Співак О. Ю. Сушильні процеси та установки. Вінниця : ВНТУ, 2007. 76 с.
4. Котов Б. І. Технологічні та теплоенергетичні основи підвищення ефективності сушіння рослинної сировини : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Глеваха, 1994. 40 с.
5. Калініченко Р. А., Котов Б. І., Спірін А. В. Математична модель сушіння рослинної сировини в обертальному барабані за комбінованого підведення енергії. *Науковий вісник НУБіП України. Серія. Техніка та енергетика АПК*. 2017. Т. 261. С. 217–225.
6. Незведська І. В. Теоретичні передумови визначення залежності технологічних параметрів процесу сушіння від конструктивних параметрів сушильного барабана. *Науковий вісник НУБіП України*. 2012. № 170 (2). С. 95–101.
7. Гірник М. Л., Мазяк З. Ю., Гербей В. М. Математичне моделювання процесів конвективного сушіння. Київ : Будівельник, 1993. 248 с.
8. Активне вентилування та сушіння зерна : навч. посіб. / О. І. Гапонюк та ін. Одеса : ВНВ, 2014. 326 с.
9. Diduh V., Kirchuk R., Tsiz T. Modeling of energy saving methods of soybean drying for oil production. *TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture*. 2015. Vol. 15, no. 3. P. 9–14
10. Simulation of the grain drying process in bunker dryers using heliocollectors / B. Kotov et al. *Energy and automation*. 2022. Vol. 2022, no. 3. URL: <https://doi.org/10.31548/energiya2022.03.038>
11. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Спірін А. В. Математичне моделювання процесу сушіння рослинних матеріалів в барабанній сушарці при змінній швидкості переміщення матеріалу. *Інженерія природокористування*. 2017. № 2(8). С. 19–23.
12. Котов Б. І., Степаненко С. П., Швидя В. О. Врахування розподіленості параметрів при моделюванні динамічних режимів сушарок сільськогосподарських матеріалів. *Сільськогосподарські машини*. 2016. № 34. С. 74–80.
13. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Ліпунов М. І. Аналітичне визначення динамічних тепловологісних режимів зерносушарок безперервної дії. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2012. № 42 (2). С. 17–23.
14. Возняк О. М., Бабин І. А. Автоматизована система сушки жому цукрового виробництва. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 1 (116). С. 65–76.
15. Остапенко Ю. А. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування : підручник. Київ : Задруга, 1999.
16. Influence of vacuum on diffusion of moisture inside seeds of cereals / V. O. Shvidia et al. *Bulletin of the Karaganda University. "Physics" Series*. 2022. Vol. 107, no. 3. P. 90–98. URL: <https://doi.org/10.31489/2022ph3/90-98>
17. Теоретичні дослідження процесу охолодження зернового матеріалу при переміщенні у вібровідцентровому шарі / Б. І. Котов та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2016. № 46. С. 54–60.

18. The mathematical modeling of changes in grain moisture and heat loss on adsorption drying from parameters of grain dryer / I. L. Rogovskii et al. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 548. P. 082057. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/8/082057>
19. Kaletnik H. The usage of the elemental base of the vibratory mill with the spatial circulation movement of material to create drying rig. *Przegląd elektrotechniczny*. 2024. Vol. 1, no. 3. P. 234–239. URL: <https://doi.org/10.15199/48.2024.03.41>
20. Математичне моделювання процесу охолодження зерна в установках з радіальною подачею повітря / Б. Котов та ін. *Bulletin of Lviv National Environmental University Agroengineering Research*. 2024. № 27. С. 101–107. URL: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.101> (дата звернення: 05.12.2024).
21. Kotov B., Bandura V. Construction of a mathematical model of extraction process in the system "solid body – liquid" in a microwave field. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5, no. 6 (95). P. 33–43. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.145232>
22. Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes / O. Burdo et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 4, no. 11 (88). P. 34–42. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108843>

References

1. Kalinichenko, R. A., & Voitiuk, V. D. (2017). *Energy-efficient operating modes of machines for highly efficient heat treatment of grain materials*. Publishing Center of the Gogol National University [in Ukrainian].
2. Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A., Stepanenko, S. P., Shvydia, V. O., & Lisetskyi, V. O. (2017). *Modeling of technological processes in typical facilities for post-harvest processing and storage of grain (separation, drying, active ventilation, cooling)*. PP Lysenko [in Ukrainian].
3. Tkachenko, S. Y., & Spivak, O. Yu. (2007). Drying processes and installations. *VNTU* [in Ukrainian].
4. Kotov, B. I. (1994). Technological and heat-energy foundations for increasing the efficiency of drying plant raw materials []. dys. ... d. tekhn. n]. [in Ukrainian].
5. Kalinichenko, R. A., Kotov, B. I., & Spirin, A. V. (2017). Mathematical model of drying of plant raw materials in a rotating drum with combined energy supply. *Scientific Bulletin of NUBiP of Ukraine. Series. Engineering and Energy of the Agricultural Complex*, 261, 217–225 [in Ukrainian].
6. Nezvedska, I. V. (2012). Theoretical prerequisites for determining the dependence of technological parameters of the drying process on the design parameters of the drying drum. *Scientific Bulletin of the NUBiP of Ukraine.*, (170 (2)), 95–101 [in Ukrainian].
7. Hirnyk, M. L., Maziak, Z. Yu., & Herbei, V. M. (1993). *Matematychni modeliuvannia protsesiv konvektivnoho sushinnia*. Budivelnik [in Ukrainian].
8. Haponiuk, O. I., Ostapchuk, M., Stankevych, H. M., & Haponiuk, I. I. (2014) Active ventilation and drying of grain. *VNV* [in Ukrainian].
9. Diduh, V., Kirchuk, R., & Tsiz, T. (2015). Modeling of energy saving methods of soybean drying for oil production. *TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture*, 15(3), 9–14.
10. Kotov, B., Kalinichenko, R., Stepanenko, S., Hryshchenko, V., Pantsyr, Y., & Herasymchuk, I. (2022). Simulation of the grain drying process in bunker dryers using heliocollectors. *Energy and automation*, 2022(3). <https://doi.org/10.31548/energiya2022.03.038>
11. Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A., & Spirin, A. V. (2017). Mathematical modeling of the drying process of plant materials in a drum dryer at variable material movement speed. *Environmental Engineering*, (2(8)), 19–23 [in Ukrainian].
12. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P., & Shvydia, V. O. (2016). Taking into account the distribution of parameters when modeling the dynamic modes of agricultural material dryers. *Agricultural machines*, (34), 74–80 [in Ukrainian].
13. Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A., & Lipunov, M. I. (2012). Analytical determination of dynamic thermal and moisture regimes of continuous grain dryers. *Design, production and operation of agricultural machines*, (42 (2)), 17–23 [in Ukrainian].
14. Vozniak, O. M., & Babyn, I. A. (2022). Automated system for drying sugar pulp. *Machinery, energy, transport, agro-industrial complex*, (1 (116)), 65–76 [in Ukrainian].
15. Ostapenko, Yu. A. (1999). Identification and modeling of technological control objects. *Zadruha* [in Ukrainian].
16. Shvidia, V. O., Stepanenko, S. P., Kotov, B. I., Spirin, A. V., & Kucheruk, V. Y. (2022). Influence of vacuum on diffusion of moisture inside seeds of cereals. *Bulletin of the Karaganda University. "Physics" Series*, 107(3), 90–98. <https://doi.org/10.31489/2022ph3/90-98>

17. Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A., Kurhanskyi, O. D., Stepanenko, S. P., & Shvydia, V. O. (2016). Theoretical studies of the process of cooling grain material during movement in a vibro-centrifugal bed. *Design, production and operation of agricultural machinery*, (46), 54–60 [in Ukrainian].
18. Rogovskii, I. L., Stepanenko, S. P., Novitskii, A. V., & Rebenko, V. I. (2020). The mathematical modeling of changes in grain moisture and heat loss on adsorption drying from parameters of grain dryer. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 548, 082057. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/8/082057>
19. Kaletnik, H. (2024). The usage of the elemental base of the vibratory mill with the spatial circulation movement of material to create drying rig. *Przegląd elektrotechniczny*, 1(3), 234–239. <https://doi.org/10.15199/48.2024.03.41>
20. Kotov, B., Kalinichenko, R., Stepanenko, S., & Pansyr, Yu. (2024). Mathematical modeling of the grain cooling process in installations with radial air supply. *Bulletin of Lviv National Environmental University Agroengineering Research*, (27), 101–107. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.101>
21. Kotov, B., & Bandura, V. (2018). Construction of a mathematical model of extraction process in the system "solid body – liquid" in a microwave field. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(6 (95)), 33–43. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.145232>
22. Burdo, O., Bandura, V., Zykov, A., Zozulyak, I., Levtrinskaya, J., & Marenchenko, E. (2017). Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(11 (88)), 34–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108843>

Borys Kotov, Prof., DSc.

Institute of Higher Education "Podilsky State University", Hlevakha, Ukraine

Valentyn Mironenko, Prof., DSc., **Serhii Stepanenko**, DSc., Senior Researcher

Institute of Mechanics and Automation of Agricultural Production, Hlevakha, Ukraine

Volodymyr Gryshchenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

National University of Life Resources and Environmental Management of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Yurii Pansyr, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ihor Gerasimchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Institute of Higher Education "Podilsky State University", Hlevakha, Ukraine

Mathematical Modeling of the Material Drying Process in a Drum Dryer as an Object of Automatic Control

The aim of this research is to develop a mathematical description of the material drying process in drum dryers, create simplified models for analyzing the dynamics of this process, and formulate a conceptual model for automatic control of drying equipment to improve its efficiency.

The study proposes a mathematical description of the drying process in the form of a system of nonlinear partial differential equations, modeling the unsteady temperature-moisture regime of the material. Simplified models were developed for dynamic process analysis, implemented in MathCad and Matlab Simulink environments, taking into account the parameter distribution along the drum's length. These models describe the interrelation of key process parameters, such as $\Theta(y,\tau)$ and $u(y,\tau)$, which characterize cross-link effects. Additionally, a conceptual model for automatic control was developed, based on methods for compensating for parameter interdependencies.

The developed mathematical description of the drying process in drum dryers allows for an accurate assessment of the temperature-humidity regime of the material, which is important for optimizing the drying technology. The use of simplified models in the MathCad and Matlab Simulink software environments makes it possible to implement numerical simulation of the process dynamics, which includes the distribution of parameters along the length of the drum. This allows determining the optimal operating conditions of the dryer to ensure high quality of the processed material and reduce energy costs. The proposed automatic control concept, which is based on cross-coupling compensation methods, provides increased efficiency of the drying process regulation, stability of the dryer operation and a significant reduction in energy costs. The implementation of this concept will significantly improve the quality of material processing and increase the energy efficiency of drying processes, while reducing operating costs.

drying process, modeling, grain materials, drum dryer, automatic control

Одержано (Received) 26.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 26.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

UDC: 621.311.1-192

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.215-219>

Victor Popescu, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Igor Beșleaga**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Natalia Țislinscaia**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Igor Gîdei**, lecturer, **Tatiana Balan**, post-graduate, **Ion Vișanu**, post-graduate
Technical University of Moldova, Chisinau, Republic of Moldova

Procedure for reliability assessment of electricity distribution systems

The main objective of this study is to establish the level of reliability of electricity distribution systems, which is currently characterized by multiple problems, because, at present, these systems have a complex configuration and are affected by a significant number of refusals, conditioned by various influencing factors. To achieve the proposed objective, the most important indicators were selected, which allow estimating the level of reliability of electricity distribution systems, regardless of structure and configuration. The main results obtained are those related to the application of the proposed reliability assessment procedure for estimating reliability indicators, which are of significant importance for the operation of electricity distribution systems, thus providing the possibility of justified planning of measures to prevent refusals and increase the level of reliability of the examined systems.

reliability indicators, electrical distribution systems, level of reliability, assessment procedure

Introduction. At the current stage, the question of the reliability of the operation of distribution systems is the key issue, to which particular attention must be paid. The reliability of such a system is closely related to its structure and differs from case to case. The safety in operation of a distribution system is an integral characteristic, determined by its components, its design and the operating conditions. At the same time, the operation of distribution systems in the agricultural sector is influenced by a number of factors, both determined and undetermined. These factors are random in nature and their occurrence may be internal or external, objective or subjective. Many researchers in the field have tried to solve these problems, but so far they have not been solved completely and definitively, and the main problem is still being addressed by researchers [1-3].

The electrical distribution systems are currently complex systems that are continuously developing. This is explained by the fact that, due to contemporary socio-economic demands, an increasing number of new electricity consumers are emerging and this leads to the emergence of more load nodes, and the structural schemes of distribution systems are becoming increasingly complex. It is clear that this is beneficial in the development of the agricultural sector, but with it come new requirements and problems in ensuring the reliability of distribution systems.

The continuing increase in the number of components of structural schemes makes the risk of faults and interruptions in the supply of electricity to consumer's increase, causing serious problems [4-10]. Assuring the level of reliability gives the opportunity to bring the mathematical expectation of outages and damage to an acceptable value for both electricity consumers and distribution systems. It is clear that this follows from the determination of the influencing factors, which cause the occurrence of random interruptions, in order to reduce their significant number and ensure the normalized level of reliability.

Materials and methods. In this study, for the solution of the problems formulated for the research, the electrical distribution systems were examined, and the research methodology is based on standard methods of analysis and calculation. The main characteristics of the electrical distribution systems researched are presented in Table 1.

Table 1 – The characteristics of the electrical distribution systems researched

Sector	The total length of electrical lines, km	Total number of consumers supplied, consumers
1	2478	28231
2	3843	42487
3	4156	36128
4	2114	41236
5	2894	23173

Source: developed by the author

Have been used in the study: mathematical modelling; graph and matrix theory; probability theory; methods of statistical analysis and processing of experimental data; theory of linear and non-linear equations; calculation techniques with specialized software, “Microsoft Excel”, “EasyFit 5.5 Professional”.

Results and discussions. The final result is the calculation of the refusal probability of the analyzed system with respect to the load node, or the probability of operation without refusal (p) (the probability of the diametrically opposite event).

When presenting the scheme in the form of minimum sections the given process can be achieved faster and simpler compared to the presentation of the respective scheme in the form of a minimum graph, but from what has been presented it appears that the process of determining the minimum sections itself is more complex and difficult. The reliability of supply to the load nodes (receivers) of complex schemes is determined by refusals occurring not only in normal operation, but also during planned preventive disconnections of distribution system elements (most often in the process of carrying out planned disconnections for prophylaxis or routine or capital repairs).

The order of the calculation of reliability indicators taking into account the determined preventive planned disconnections is as follows:

- groups of elements are sized, preventive disconnection of which can be overlapped, so elements most often are with series connection between them and disconnection of one of these elements leads to the occurrence of rejection of the respective graph, as such elements can be those with series connection;
- for such cases the planned reliability indicators of these schemes are determined.

Thus for a group of (ρ) real elements with disconnection frequencies $1/\lambda_1, 1/\lambda_2, \dots, 1/\lambda_n$ or operating times T_1, T_2, \dots, T_n the lowest common multiple $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ and the smallest time interval in which an integer number of planned disconnections of each component element T. From the group of elements, choose the element (i) which has a

maximum preventive disconnection time λ_i . The parameter of the flow of planned disconnections (λ) and their average probability [5-10] for the equivalent element (j) will be determined for the analyzed systems.

The analytically obtained reliability indicators of the equivalent element of the investigated scheme are aligned to an integral element of that scheme and all other component elements are given null (0) indicators.

The problem of creating these states often arises in the process of analytical calculation of project schemes, when the schedule of planned disconnections and current repairs of component elements is not known.

In the process of composing the preventive disconnection groups of the component elements the presented relation will be respected, then it means, that the determined time period in the analyzed system will lack states having disconnected elements with a determined preventive planning.

From the above, it appears that the smaller the size of the distribution system under analysis, the higher the probability of the respective states.

In general, considering preventive planned disconnections of component elements of distribution systems [1-8], the probabilities of refusal states can be related to the load node (receiver) and the refusal flow parameter of the respective scheme with respect to the load node, which is determined for the analyzed systems.

The minimal sections in the scheme of the system remaining after excluding element (j) from the searched scheme will be obtained from the sections of the integral scheme of the system after excluding the minimal sections.

In assessing the reliability of distribution systems, it is absolutely necessary to characterize both components, i.e. structural and operational reliability. In aim to facilitate this process, the respective operations need to be carried out according to a well-determined consecutiveness and from all this, the criterion for the assessment of the real level of reliability was composed, on the basis of which the reliability analysis of the investigated systems was carried out.

Therefore, in consideration of the above, in order to simplify the reliability assessment process, the reliability level of distribution systems in the agricultural sector has been assessed on the basis of the following indicators: average duration of refusals (τ); average frequency of occurrence of refusals (λ); average time to restore refusals (μ); average total refusal time (T_{med}). Table 2 shows the reliability indicators of the researched systems, determined on the basis of the developed criterion, for the year 2023.

Table 2 – Reliability indicator values of the systems researched

Indicator	Seasonal values			
	Spring	Summer	Autumn	Winter
τ, h	0,89	1,09	1,07	1,12
λ	3,02	2,67	3,01	2,69
μ, h	0,91	1,21	1,15	1,27
T_{med}, h	3,84	3,63	3,72	3,69

Source: developed by the author

From the results it appears that the determined indicators differ from one system to another due to several factors, such as:

- specific geographical location conditions;
- the number of agricultural consumers supplied with electricity,
- the summary length of power lines in the systems;
- the configurations and structure graphs of the systems;
- the number and condition of component parts.

Conclusions. Based on the study conducted, it was found that in the process of assessing the reliability of electrical distribution systems, it is absolutely necessary to classify and systematize interruptions in the supply of electricity to consumers, caused by various influencing factors, depending on the season and geographical location of the distribution systems. The results directly depend on the structure of the systems and for this reason it is absolutely necessary to perform calculations, determine the minimum sections and layout graphs of the distribution system, in relation to the component elements.

References

1. Transmission Companies. *Journal of Sustainable Energy*. 2010. 1. Pp. 25-31.
2. Ardeleanu M.E. Fault Localization in Cables and Accessories by Off-Line Methods. *Annales of the University of Craiova*. 2007. 13. Pp. 25-31.
3. Кириленко О. В., Денисюк С. П. Моделювання енергетичних процесів у системах енергопостачання при вирішенні завдань енергозбереження. *Електродинаміка : зб. наук. праць Інституту електродинаміки НАН України*. 2001. С. 87–91.
4. Hazi G., Hazi A. Conditions for Efficient use of the 1000 V Energy Distribution. *Annales of the University of Craiova*. 2007. 31. Pp. 25-31.
5. Erchan F., Mocanu A. The Problem of the Reliability of the Electric Power Equipment. *Analele Universității din Oradea, Fascicula de Energetică*, 2007.
6. Secui D.C. The Sensitivity of the Electrical Substations Reliability Indices at the Variation of the Circuit Breakers Sticking Probability. *Annals of the Oradea University. Fascicle of Energy Engineering*. 2008. 14. Pp. 51-57.
7. Popescu V. Analysis of short-circuit currents in distributive electric networks. *Intellectus*. 2015. 2. Pp. 113-115.
8. Popescu V. Facteurs qui influence la fiabilité des systèmes de distribution d'énergie électrique dans le secteur agricole. *Intellectus*. 2016. 3. Pp. 90-93.
9. Popescu V., Racul A., Burbulea I. Reliability analysis of power distribution systems. *Journal of Sustainable Energy*. 2012. 3(3). Pp. 156-158.
10. Popescu V., Popa A., Bantas R. Reliability analysis of systems for distribution of electricity. *Acta Electrotehnica*. 2013. 54(5). Pp. 387-389.

Referencis

1. Voronca, S.L. (2010). Risk Analysis and Risk Management. Development of Risk Indicators in Electricity Transmission Companies. *Journal of Sustainable Energy*, 1, 25-31 [in English].
2. Ardeleanu, M.E. (2007) Fault Localization in Cables and Accessories by Off-Line Methods. *Annales of the University of Craiova*, 13, pp. 25-31 [in English].
3. Kyrylenko, O. V., & Denysiuk, S. P. (2001). Modeliuvannia enerhetychnykh protsesiv u systemakh enerhopostachannia pry vyrishenni zavdan enerhozberezhennia [Modeling of energy processes in power supply systems in solving energy saving problems]. *Zbirnyk naukovykh prats Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy: Elektrodynamika - Collection of scientific papers of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine: Electrodynamics*. pp. 87–91. [in Ukrainian]
4. Hazi, G., & Hazi, A. (2007). Conditions for Efficient use of the 1000 V Energy Distribution. *Annales of the University of Craiova*, 31, pp. 25-31 [in English].
5. Erchan, F., & Mocanu, A. (2007). The Problem of the Reliability of the Electric Power Equipment. *Analele Universității din Oradea, Fascicula de Energetică*. [In Romanian]
6. Secui, D.C. (2008). The Sensitivity of the Electrical Substations Reliability Indices at the Variation of the Circuit Breakers Sticking Probability. *Annals of the Oradea University. Fascicle of Energy Engineering*, 14, pp. 51-57 [in English].

7. Popescu, V. (2015). Analysis of short-circuit currents in distributive electric networks. *Intellectus*, 2, p. 113-115. [in Romanian]
8. Popescu, V. (2016). Facteurs qui influence la fiabilité des systèmes de distribution d'énergie électrique dans le secteur agricole. *Intellectus*, 3, p. 90-93. [In Romanian]
9. Popescu, V., Racul, A., & Burbulea, I. (2012) Reliability analysis of power distribution systems. *Journal of Sustainable Energy*, 3(3). p. 156-158 [in English].
10. Popescu, V., Popa, A., & Bantas, R. (2013). Reliability analysis of systems for distribution of electricity. *Acta Electrotehnica*, 54(5). p. 387-389.

В. С. Попеску, доц., канд. техн. наук, **І.І. Бешляге**, доц., канд. техн. наук, **Н. Цисліньська**, доц., канд. техн. наук, **І. Гідей**, викл., **Т. Балан**, асп., **І. Вішану**, асп.

Технічний університет Молдови, м. Кишинів, Республіка Молдова

Порядок оцінки надійності систем розподілу електроенергії

Основною метою даного дослідження є встановлення рівня надійності систем розподілу електроенергії, який на даний час характеризується множинними проблемами, оскільки в даний час ці системи мають складну конфігурацію та зазнають впливу значної кількості відмов, зумовлених різними факторами впливу.

Для досягнення поставленої мети було обрано найбільш важливі показники, які дозволяють оцінити рівень надійності систем розподілу електроенергії незалежно від структури та конфігурації. Основними отриманими результатами є ті, що пов'язані із застосуванням запропонованої методики оцінки надійності для оцінювання показників надійності, які мають суттєве значення для функціонування систем розподілу електричної енергії, що забезпечує можливість обґрунтованого планування заходів щодо запобігання відмовам та підвищення рівня надійності досліджуваних систем. З метою спрощення процесу оцінки надійності, рівень надійності систем розподілу в аграрному секторі було оцінено на основі таких показників, як: середня тривалість відмов (τ); середня частота виникнення відмов (λ); середній час відновлення відмов (μ); середній сумарний час відмов (T_{med}). Визначені показники відрізняються від системи до системи через декілька факторів, таких як: специфічні умови географічного розташування, кількість сільськогосподарських споживачів, що забезпечуються електроенергією, сумарна довжина ліній електропередачі в системах, конфігурації та структурні схеми систем та кількість та стан складових частин.

На основі проведеного дослідження було встановлено, що в процесі оцінки надійності систем розподілу електроенергії абсолютно необхідною є класифікація та систематизація перерв у постачанні електроенергії споживачам, спричинених різними факторами впливу, в залежності від пори року та географічного розташування розподільчих систем.

показники надійності, системи розподілу електроенергії, рівень надійності, методика оцінювання

Одержано (Received) 18.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 26.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 02.12.2024

ЗМІСТ

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

- В.Я. Ошовський, І.А. Капура, О.В. Шостак*
Перспективність сучасних методів стикового електрозварювання
для виготовлення заготовок і ремонту колінчастих валів..... 3
- В.А. Мажара, К.К. Щербина, А.М. Артюхов, С.А. Тененика, І.С. Шестаков*
Система автоматизованого проектування технологічного оснащення..... 12
- О. Ф. Сіса, В. Я. Мірзак, В. В. Пукалов, О. С. Довжук, Д.С. Тупаленко*
Удосконалення технології виготовлення зразків із ливарної високоміцної
сталі 110Г13Л для металографічних досліджень та випробувань..... 24
- С.П. Степаненко, А.Я. Кузьмич, А.М. Борис, В.І. Днесь, Д.А. Волик,
А.А. Кузьмич*
Дослідження фізико-механічних та оптичних характеристик зернових матеріалів 36
- А. О. Сергеев, В. М. Боков, В. М. Шмельов*
Удосконалення електроерозійної головки розмірної обробки дугою стрижнів
на базі настільного свердлувального верстата 47

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

- В.О. Шейченко, Д.О. Петраченко*
Обрушування насіння промислових конопель механізмами з підвищеною
продуктивністю 55
- Е. Б. Алієв, О.А. Черній, Є.В. Калганков*
Експериментальна перевірка якості еластомерних ущільнень типу
O-ring сучасних автотракторних двигунів внутрішнього згорання 63
- О.М. Кобець, Н.О. Пономаренко, Є.І. Лепеть*
Стан механізації внесення КАС в Україні 77
- О. В. Козаченко, Е. Б. Алієв, Є. О. Піх*
Рух насінневої суміші по гвинтовій поверхні живильника віброфрикційного епаратора..... 84
- П.Г. Лузан, А.Є. Грінчук, Р.В. Кісільов, О.Р. Лузан*
Теоретичне обґрунтування параметрів пруткового самоочисного решета 93

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

- О.С. Улічев, О.В. Ревнюк*
Порівняння методів стиснення заголовків у протоколі HTTP 2..... 106
- Р.М. Минайленко, Л.І. Поліщук*
Особливості проектування архітектури довіри нульового рівня 117

АГРОІНЖЕНЕРІЯ

<i>С.О. Харченко, О.І. Біоловод, Ф.М. Харченко, І.О. Котляревський, В.В.Яровий</i> Причини блокування отворів перфорованих просіювальних поверхонь вібросепараторів.....	126
<i>Ю.О. Ковальчук, І.О. Лісовий</i> Лазерне зміцнення деталей автомобільного транспорту в АПК.....	136
<i>О. В. Козаченко, О.М. Волковський, С.О. Дьяконов</i> Методика чисельного моделювання напружено-деформованого стану пружного стояка з регулятором жорсткості.....	142
<i>С.П. Степаненко, В.І. Днесь, А.М. Борис, А.Я. Кузьмич, Д.А. Волик</i> Алгоритм цифрової ідентифікації зернових матеріалів.....	153
<i>В.М. Сало, С.М. Леценко, Б.Г. Вовнянко, С.М. Мороз</i> Порівняльні показники роботи сошників двох типів.....	160
<i>В.В. Амосов, О.М. Васильковський, А.С. Богуславський</i> Використання фізико-механічних властивостей лаванди для сепарації насіння.....	167
<i>Д.Ю. Артеменко, О.А. Кислун, В.А. Онопа, Д.В. Богатирьов</i> Дослідження конструкції дискового пружинного загортача просапної сівалки.....	174
<i>К.В. Васильковська, С.М. Мороз, О.О. Андрієнко, М.О. Васильковський</i> Агробот для міжрядного обробітку просапних культур.....	185
<i>І.М. Бажан, О.М. Васильковський, С.М. Леценко, В.В. Амосов</i> Інтенсифікація процесу сепарації зерна на плоскому коливальному решеті із зигзаговидним розташуванням отворів.....	192
<i>Б.І. Котов, В.Г. Мироненко, С.П. Степаненко, В.О. Грищенко, Ю.І. Панцир, І.Д. Герасимчук</i> Математичне моделювання процесу сушіння матеріалу в барабанній сушарці, як об'єкта автоматичного керування.....	202

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА**КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

<i>Victor Popescu, Igor Beşleaga, Natalia Țislinscaia, Tatiana Balan, Ion Vişanu</i> Procedure for Reliability Assessment of Electricity Distribution Systems.....	215
---	-----

CONTENT

APPLIED MECHANICS

<i>Viktor Oshovskyi, Igor Kapura, Oleksandr Shostak</i> Prospects of Modern Methods of Butt Welding for the Manufacture of Blanks and Repair of Crankshafts	3
<i>Vitalii Mazhara, Kyryl Shcherbyna, Anatolii Artiukhov, Svitlana Tenenyka, Ivan Shestakov</i> Automated Design System for Technological Equipment	12
<i>Oleh Sisa, Volodymyr Mirzak, Victor Pukalov, Olexandr Dovzhuk, Denys Tupalenko</i> Improvement of the Technology for Manufacturing Samples From High-Strength Cast Steel 110G13L for Metallographic research and Testing	24
<i>Serhii Stepanenko, Alviyan Kuzmych, Andriy Borys, Viktor Dnes', Daryna Volyk, Anna Kuzmych</i> Study of Physical-mechanical and Optical Characteristics of Grain Materials	36
<i>Anton Serheiev, Viktor Bokov, Vitaly Shmelov</i> Improvement of the EDM Head for DIMENSIONAL Treatment of Rods with n Arc on the Basis of a Desktop Drilling Machine	47

BRANCH ENGINEERING

<i>Viktor Sheichenko, Dmytro Petrachenko</i> Dehulling of Industrial Hemp Seeds with High-Performance Mechanisms	55
<i>Elchyn Aliiev, Olexandr Chernii, Yevhen Kalhankov</i> Experimental Testing of the Quality of elastomeric Seals of the O-ring Type of Modern auto-Tractor Internal Combustion Engines	63
<i>Oleksandr Kobets, Natalia Ponomarenko, Yevhen Lepet</i> The State of Machinery for UAN in Ukraine	77
<i>Oleksiy Kozachenko, Elchyn Aliiev, Pikh Yevhenii</i> The Movement of the Seed Mixture Along the Screw Surface of the Feeder of the Vibro- Friction Separator	84
<i>Petro Luzan, Hrinchuk Andrii, Ruslan Kisilov, Olena Luzan</i> Theoretical Justification of the Parameters of a Self-Cleaning Bar Screen	93

COMPUTER SCIENCE

<i>Olexandr Ulichev, Olexandr Revniuk</i> Comparison of HTTP 2 Header Compression Methods	106
<i>Roman Minailenko, Liudmyla Polishchuk</i> Analysis of Features of Zero-level Trust Architecture	117

AGROENGINEERING

<i>Serhii Kharchenko, Oleksandra Bilovod, Farida Kharchenko, Ihor Kotliarevskiy, Volodymyr Yarovyi</i> Causes of Blocking the Holes of Perforated Screening Surfaces of vibrating Separators.....	126
<i>Yuriy Kovalchuk, Ivan Lisoviy</i> Laser Strengthening of Automobile Transport Parts in the Agro-industrial Complex.....	136
<i>Oleksiy Kozachenko, Oleksandr Volkovsky, Sergey Dyakonov</i> Methodology of Numerical Modeling of the Stress-Strain state of an Elastic Stand with a Stiffness Regulator.....	142
<i>Serhii Stepanenko, Viktor Dnes', Andriy Borys, Alvia Kuzmych, Daryna Volyk</i> Algorithm of Digital Identification of Grain Materials.....	153
<i>Vasyl Salo, Serhii Leshchenko, Bohdan Vovnianko, Serhii Moroz</i> Comparative Performance of Two Types of Coulter	160
<i>Volodymyr Amosov, Oleksii Vasylovskiy, Andrii Bohuslavskiy</i> Use of Physical and Mechanical Properties of Lavender for Medium Separation	167
<i>Dmytro Artemenko, Oleh Kyslun, Volodymyr Onopa, Dmytro Bogatyryov</i> Research of the Design of a disc Spring Closing Device for a Row Crop Planter	174
<i>Kateryna Vasylovska, Serhii Moroz, Olha Andriienko, Mykhailo Vasylovskiy</i> Agrobot for Inter-Row Cultivation of Row Crops	185
<i>Ihor Bazhan, Oleksii Vasylovskiy, Serhii Leshchenko, Volodymyr Amosov</i> Intensification of the Grain separation Process on a Flat Oscillating Sieve with a Zigzag Arrangement of Holes	192
<i>Borys Kotov, Valentyn Mironenko, Serhii Stepanenko, Volodymyr Gryshchenko, Yurii Pansyr, Ihor Gerasimchuk</i> Mathematical Modeling of the Material Drying Process in a Drum Dryer as an Object of Automatic Control.....	202

**AUTOMATION AND COMPUTER
INTEGRATED TECHNOLOGIES**

<i>Victor Popescu, Igor Beşleaga, Natalia Ţislinscaia, Tatiana Balan, Ion Vişanu</i> Procedure for Reliability Assessment of Electricity Distribution Systems.....	215
---	-----

Матеріали подаються у друкованому вигляді та на електронному носії. Обсяг статті – 5-12 сторінок. Основний текст рукопису друкується 12 кеглем; шрифт – Times New Roman; міжрядковий інтервал – 1,0; відступ – 1,25 см; поля: верх – 2 см, низ – 3 см, право, ліво – 2 см. Текст повинен бути вирівняний по ширині аркуша.

Підписи до рисунків і набирати шрифтом Times New Roman 10 (по центру), таблиць 14 (з абзацу). Після рисунка, таблиці схеми – вказується джерело
Рисунки й таблиці розміщуються в тексті статті з вирівнюванням по центру сторінки, без обтікання текстом у рамках поля набору. Рисунки й таблиці подаються в статті безпосередньо після тексту, де їх згадано вперше. На кожен формулу, таблицю, рисунок, графік у тексті мають бути обов'язкові посилання.

Анотація українською мовою – до 10 рядків тексту (до 500 знаків), обов'язково 3-7 ключових слів;

Анотація англійською мовою повинна бути не менше ніж 1800 знаків:

Структура анотацій:

- мета статті;
- короткий опис виконаної роботи;
- висновки по роботі;
- перелік ключових слів;

Структура основного тексту статті:

1. **Постановка проблеми. *Statement of the problem***
2. **Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Analysis of recent researches and publications***
3. **Постановка завдання (мета статті). *Statement of the objective***
4. **Виклад основного матеріалу. *The main material***
5. **Висновки і перспективи подальших досліджень. *Conclusions and prospects for further researches***

Схема організації матеріалу статті:

1. УДК
2. Ініціали, прізвище, вчене звання, науковий ступінь
3. Місце роботи, місто, країна. e-mail
4. Назва статті.
5. Анотація і ключові слова мовою статті.
6. Основний текст статті.
7. Список літератури. *
8. References
9. Розширена анотація і ключові слова англійською мовою.

Редакційна колегія Центральноукраїнського наукового вісника повідомляє, що всі статті які надходять перевіряються на плагіат системою **Turnitin**

Сайт збірника: <http://zbirniksgm.kntu.kr.ua>

Адреса для надсилання: zbirnyk_agri@kntu.kr.ua, v_vas_a@ukr.net

ДОВІДКА ПРО АВТОРА
українською та англійською мовами

	Українською	Англійською
Прізвище, ім'я, по-батькові:		
Місце роботи (повна назва, без аббревіатур), місто, країна:		
Посада (повна назва, без аббревіатур):		
Наукова ступінь:		
Вчене звання:		
Назва статті:		
*Спеціальність:		
Адреса для надсилання збірнику:		
Контактні телефони (бажано мобільний):		
E-mail:		
ORCID ID (XXXX-XXXX-XXXX-XXXX)		

* – 122 Комп'ютерні науки; 131 Прикладна механіка; 132 Матеріалознавство; 133 Галузеве машинобудування; 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології; 208 Агроінженерія

**Конструювання, виробництво та експлуатація
сільськогосподарських машин**

Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник

Заснований у 1971 році

Випуск 54

За загальною редакцією М.І. Черновола

Відповідальний за випуск В.В. Амосов

Комп'ютерна верстка І.М. Каліч

Тиражування О. Г. Каліч

*Приватне підприємство «Ексклюзив-Систем»
Свідоцтво про реєстрацію № 05720-ПП-1 від 10.12.1996.
25006, м. Кіровоград, вул. Шевченка, 25
тел./факс 24-35-53*

Здано в набір 29.11.2024. Підписано до друку 02.12.2024. Формат 60x84 1/8.
Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman Умов. друк. арк. 40
Обл. вид. арк. 28,25. Наклад 300 прим. Замовлення № 0852