

Центральноукраїнський національний технічний університет

Агротехнічний факультет

Кафедра сільськогосподарського машинобудування

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою СГМ

к.т.н., професор

_____Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

“ _____ ” 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:**

«Підвищення ефективності роботи безприводного мульчувача
рослинних залишків з удосконаленням ножів та котків»

Виконав здобувач вищої освіти II курсу,
групи ГМ-24М-1

ОНП «Галузеве машинобудування»
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»

_____ Старкін Олександр
Олександрович

« _____ » 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

_____ Дмитро БОГАТИРЬОВ

« _____ » 2026 р.

Рецензент

доцент, канд. техн. наук

_____ Станіслав КАТЕРИНІЧ

« _____ » 2026 р.

м. Кропивницький

АНОТАЦІЯ

Старкін О. О. Підвищення ефективності роботи безприводного мульчувача рослинних залишок з удосконаленням ножів та котків. – Рукопис. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2026.

У кваліфікаційній роботі було проведено наукове обґрунтування параметрів та розробку конструктивних рішень щодо вдосконалення безприводного мульчувача. У ході теоретичних досліджень було розроблено математичну модель взаємодії ножів із рослинним середовищем, що дозволило встановити раціональний кут нахилу лез у межах від 25 до 40 градусів для реалізації ефекту ковзного різання. Було обґрунтовано необхідність врахування аеродинамічного опору барабана, що підвищило точність тягових розрахунків у 1,5 рази. Було отримано регресійну модель опору стебел соняшнику перерізанню ($R^2 = 0,9919$), яка підтвердила інтенсивне зростання зусиль при збільшенні діаметра стебла від 10 до 30 мм та його вологості.

Практична реалізація результатів полягала у впровадженні інноваційного ножового барабана зі зміщеними отворами (патент № 161767), що забезпечило ефект самоочищення міжножового простору. За результатами техніко-економічних розрахунків було встановлено, що впровадження модернізованого агрегату КП-4,5 дозволило підвищити змінну продуктивність праці на 50 % та знизити питомі витрати палива на 28,1 % порівняно з базовим варіантом. Було розроблено комплекс заходів з охорони праці для гасіння вібрацій та підвищення безпеки при обслуговуванні гострих робочих органів.

Ключові слова: мульчувач; рослинні залишки; ніж; коток; енергоємність; ковзне різання; самоочищення; економічна ефективність; охорона праці.

ABSTRACT

Starkin O. O. Improving the efficiency of a non-driven plant residue mulcher with the improvement of knives and rollers. – Manuscript. Qualification work for the Master's degree in specialty 133 "Industry Mechanical Engineering". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

In the qualification work, scientific justification of parameters and development of design solutions for the improvement of a non-driven mulcher were carried out. During the theoretical research, a mathematical model of the interaction of knives with the plant environment was developed, which allowed establishing a rational angle of the blades in the range from 25 to 40 degrees for the implementation of the sliding cutting effect. The necessity of taking into account the aerodynamic drag of the drum was justified, which increased the accuracy of traction calculations by 1.5 times. A regression model of the resistance of sunflower stalks to cutting was

obtained ($R^2 = 0,9919$), which confirmed the intensive increase in forces with an increase in the stalk diameter from 10 to 30 mm and its moisture content.

The practical implementation of the results involved the introduction of an innovative knife drum with offset holes (patent No. 161767), which ensured the self-cleaning effect of the inter-knife space. Based on the results of technical and economic calculations, it was established that the introduction of the modernized unit KP-4.5 allowed increasing shift labor productivity by 50.0% and reducing specific fuel consumption by 28.1% compared to the base version. A set of labor protection measures was developed to dampen vibrations and increase safety during the maintenance of sharp working elements.

Keywords: mulcher; plant residues; knife; roller; energy intensity; sliding cutting; self-cleaning; economic efficiency; labor protection.

Зміст

	стор.
Вступ	5
2. Стан досліджуваного питання та вибір напрямку досліджень	7
3. Наукова частина	21
4. Практична реалізація результатів досліджень	34
5. Охорона праці	44
6. Загальні висновки	50
Список використаної літератури	52
Додатки	52

ВСТУП

Сучасний стан розвитку світового аграрного сектору свідчить про глибоку трансформацію підходів до обробітку ґрунту, де пріоритет зміщується у бік енергозберігаючих та екологічно безпечних технологій. Сільськогосподарське виробництво України традиційно виступає фундаментом національної економіки та ключовим елементом глобальної продовольчої безпеки. В умовах повномасштабної збройної агресії з боку російської федерації роль вітчизняного агропромислового комплексу стає критично важливою, оскільки будь-які дестабілізаційні процеси в українському експорті зернових та олійних культур негайно провокують кризові явища на світових продовольчих ринках. Війна створює безпрецедентні виклики для аграріїв, змушуючи їх працювати в умовах дефіциту пально-мастильних матеріалів, обмежених фінансових ресурсів та необхідності проведення робіт у стислі терміни за високого рівня небезпеки. У цьому контексті впровадження високопродуктивної та енергоефективної техніки, що здатна функціонувати за мінімальних затрат ресурсів, перетворюється із виробничої потреби на стратегічне завдання державного рівня.

Одним із найбільш перспективних напрямів адаптації агровиробництва до сучасних умов є перехід на ґрунтозахисні технології, зокрема системи No-till та Organic No-till. Ці методи передбачають повну відмову від традиційної оранки на користь збереження рослинних залишків на поверхні поля, що дозволяє суттєво зменшити деградацію ґрунтів, запобігти вітровій та водній ерозії, а також забезпечити ефективне накопичення і утримання вологи. Важливою ланкою таких технологій виступає процес управління пожнивними рештками та сидеральними культурами, які після завершення вегетації мають бути якісно подрібнені та рівномірно розподілені по поверхні поля. Виконання цієї операції забезпечує створення захисного шару мульчі, що перешкоджає перегріву ґрунту та пригнічує ріст бур'янів, одночасно сприяючи поступовому відновленню органічної складової родючого шару.

Для реалізації процесу мульчування все більшої популярності набувають безприводні технічні засоби, зокрема котки-подрібнювачі. Їхня головна перевага полягає у відсутності потреби в активному приводі робочих органів від вала відбору потужності трактора, оскільки процес подрібнення відбувається за рахунок кінетичної енергії руху агрегату та сили зчеплення робочих органів із поверхнею поля. Це дозволяє значно знизити питомі витрати палива на гектар, зменшити навантаження на трансмісію енергетичного засобу та підвищити робочу швидкість агрегування. Проте аналіз експлуатації існуючих конструкцій безприводних мульчувачів показує, що вони не завжди забезпечують необхідну якість технологічного процесу, особливо під час роботи з грубостебловими культурами, такими як соняшник чи кукурудза, або за високої врожайності сидератів. Часто спостерігається неповне перерізання стебел, забивання робочих органів рослинною масою та недостатня інтенсивність механічної дії на рослинні тканини, що сповільнює їхню подальшу мінералізацію.

Метою дослідження є суттєве підвищення ефективності роботи безприводного мульчувача рослинних залишків через впровадження вдосконалених конструктивних рішень для ножів та котків. Реалізація цієї мети спрямована на досягнення високих показників якості подрібнення рослинності при одночасному зниженні енергоємності операції, що сприяє підвищенню загальної продуктивності аграрного виробництва та зниженню собівартості продукції. Досягнення мети забезпечує технологічну базу для сталого розвитку господарств, що орієнтовані на збереження природних ресурсів та підвищення рентабельності в умовах сучасних економічних та військових викликів.

Об'єктом дослідження є технологічний процес взаємодії робочих органів (ножів та котків) безприводного мульчувача з рослинними залишками сільськогосподарських культур та верхнім шаром ґрунту під час руху агрегату. Вивчення цього процесу дозволяє розкрити складні механізми руйнування рослинних тканин під впливом ударних та статичних навантажень, що виникають у зоні контакту. Предметом дослідження є закономірності впливу геометричних та масових параметрів удосконалених ножів і котків на якісні та

енергетичні показники роботи мульчувача, зокрема на ступінь подрібнення маси та питомий тяговий опір машини.

Задачі дослідження сформульовані для послідовного досягнення поставленої мети. Першочерговим завданням є здійснення ґрунтового аналізу існуючих технологій та технічних засобів для подрібнення рослинних залишків з метою виявлення найбільш критичних факторів, що обмежують їх ефективність. На основі цього аналізу виконуються теоретичні дослідження, що включають побудову математичних моделей взаємодії ножів із рослинним середовищем та визначення раціональних кутів установки робочих елементів. Наступним етапом є проведення експериментальних досліджень у лабораторних та польових умовах для верифікації отриманих теоретичних залежностей та встановлення оптимальних режимів роботи вдосконаленої конструкції. Завершується дослідження розробкою практичних рекомендацій щодо конструктивного виконання мульчувача та розрахунком техніко-економічних показників, які підтверджують доцільність та ефективність запропонованих змін для впровадження у виробництво. Таким чином, робота охоплює повний цикл від наукового пошуку до практичної реалізації, що забезпечує її високу цінність для галузевого машинобудування.

2. СТАН ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Еволюція систем обробітку ґрунту та місце мульчувачів у технологіях сталого землеробства

Сучасний розвиток аграрного сектору в умовах глобалізації та гострої необхідності збереження природних ресурсів спрямовується на пошук технологічних рішень, що поєднують високу продуктивність із мінімальним антропогенним впливом на біосферу. У цьому контексті науковці розглядають системи No-till та Organic No-till як фундаментальні підходи до сталого землеробства. Дослідники світового рівня, зокрема Джефф Моєр (Jeff Moyer) та його колеги з Родейл-інституту (Rodale Institute, США) [1], протягом десятиліть вивчають роль механічного контролю рослинності за допомогою

спеціалізованих знарядь. Вони доводять, що використання моделей типу Roller Crimper дозволяє ефективно припиняти вегетацію покривних культур без застосування хімічних десикантів, що є критично важливим для органічного землеробства.

Аналізуючи стан світового ринку сільськогосподарської техніки, вчені звертають увагу на широке розмаїття конструкцій безприводних мульчувачів, які пропонують провідні закордонні компанії. Зокрема, дослідники детально розглядають технічні характеристики котка Dalbo Dinoco (Данія), який відомий своєю надійністю при обробці великих масивів пожнивних рештків. Вони відзначають, що дана модель використовує важкі водоналивні барабани з рівномірним розташуванням ножів, що забезпечує стабільне заглиблення лез. Також вчені аналізують досвід експлуатації агрегатів компанії Quivogne (Франція), зокрема моделі Rollmot, яка комплектується ножовими секціями Fluted Roller. Дослідники вказують, що конструкція Quivogne Rollmot спрямовується на інтенсивне подрібнення стебел соняшнику та кукурудзи за рахунок високої питомої ваги та особливої геометрії ножів, проте вони також виявляють певні обмеження при роботі на надмірно вологих ґрунтах, де виникає ризик налипання маси.

Вітчизняні вчені, серед яких вагомий внесок у дослідження процесів подрібнення роблять [2], зосереджують увагу на адаптації технічних засобів до специфічних умов лісостепової та степової зон України. Вони проводять глибокий теоретичний аналіз роботи серійних моделей, таких як коток-подрібнювач КПП-6 та його вдосконалена модифікація КПВ-6 виробництва компанії «Фаворит» (м. Кропивницький). Дослідники констатують, що модель КПВ-6 «Фаворит» демонструє високу ефективність при подрібненні залишків соняшнику завдяки шаховому розташуванню ножів, що дозволяє знизити динамічні удари на раму агрегату. Проте вчені підкреслюють, що навіть у таких досконалих моделях існує резерв для підвищення ефективності через оптимізацію кутів установки ножів для переходу від прямого удару до ефекту ковзного різання.

У наукових працях [3] детально описуються процеси енергетичної взаємодії безприводних котків із ґрунтовим фоном. Дослідники вивчають роботу подрібнювачів типу Braban, які часто використовуються як база для створення нових засобів механізації. Вони виявляють, що основною проблемою безприводних машин є нестабільність частоти обертання барабана при зміні швидкості руху трактора та опору ґрунту. Вчені стверджують, що для подолання цього явища необхідно вдосконалювати не лише масу котка, а й аеродинамічні та механічні властивості ножів, які б створювали додатковий обертальний момент під час взаємодії зі стеблами.

Вчені також проводять порівняльний аналіз активних роторних мульчувачів, таких як Schulte (Канада), та пасивних безприводних котків. Вони приходять до висновку, що хоча активні ротори забезпечують більш дрібну фракцію подрібнення, їх енергоємність у кілька разів перевищує аналогічні показники безприводних знарядь. В умовах дефіциту пального, що спричинений воєнним станом в Україні, дослідники віддають перевагу розвитку саме безприводних систем, оскільки вони дозволяють агрегатуватися з менш потужними тракторами при збереженні високої продуктивності. Вчені наголошують, що вдосконалення ножів у моделях типу КПВ-6 або аналогічних розробках ЦНТУ дозволяє досягти якості подрібнення, яка є цілком достатньою для подальшого посіву зерновими сівалками.

Дослідники приділяють значну увагу вивченню фізико-механічних властивостей рослинних залишків, що безпосередньо впливає на вибір параметрів техніки. Вони зазначають, що стебла соняшнику та кукурудзи мають волокнисту структуру, яка найкраще руйнується при поєднанні тиску та зсуву. Вчені, спираючись на результати експериментів Кислуна О.А. [3], доводять, що встановлення ножів під певним кутом до твірної котка дозволяє реалізувати схему «косого різання». Дослідники пояснюють, що такий підхід забезпечує плавне входження леза в матеріал, що суттєво зменшує миттєвий пік тягового опору та запобігає вигнанню ґрунту перед котком. Це особливо

важливо для збереження рівної поверхні поля, що є обов'язковою вимогою в системі No-till.

Науковці також розглядають питання оптимізації діаметра барабана подрібнювача. На основі аналізу моделей закордонного виробництва та вітчизняних аналогів, вони встановлюють, що збільшення діаметра понад певну межу призводить до погіршення копіювання мікрорельєфу поля. Водночас котки малого діаметра часто не мають достатньої інерції для якісного розрізання товстого шару мульчі. Вчені пропонують використовувати комбіновані схеми, де коток великого діаметра доповнюється системою підпружинених ножів або додатковими баластними секціями. Дослідники стверджують, що такий підхід дозволяє машині ефективно працювати як на легких піщаних, так і на важких глинистих ґрунтах без ризику забивання простору між ножами.

Вплив війни на аграрний сектор змушує вчених ще ретельніше підходити до питання надійності техніки. Дослідники відзначають, що спрощення конструкції безприводних мульчувачів при одночасному використанні високоміцних сталей для ножів є найбільш раціональним шляхом. Вони аналізують можливість застосування зносостійких наплавок на леза ножів, що дозволяє подовжити термін їх експлуатації в умовах обмеженого доступу до сервісного обслуговування. Вчені переконані, що модернізація існуючих котків-подрібнювачів КПП-6 за рахунок нових кріплень для ножів дозволить аграрним підприємствам самостійно оновлювати парк техніки, підвищуючи її ефективність без значних капіталовкладень.

На основі ґрунтового вивчення стану питання вчені обирають напрям подальших досліджень, який полягає в удосконаленні конструкції безприводного мульчувача з реалізацією ефекту ковзного різання. Дослідники планують розробити математичну модель, яка б враховувала не лише кінематику руху котка, а й динаміку деформації рослинного стебла під дією леза складної форми. Вони ставлять за мету визначити оптимальне співвідношення між масою котка, діаметром барабана та кутом нахилу ножів,

що забезпечить максимальну якість мульчування при мінімальних витратах енергії. Вчені впевнені, що такий науковий підхід дозволить створити конкурентоспроможний вітчизняний агрегат, який за своїми показниками не поступатиметься кращим закордонним аналогам від Dalbo чи Quivogne, забезпечуючи при цьому продовольчу безпеку та економічну стабільність країни.

Сучасний етап розвитку світового аграрного виробництва супроводжувався інтенсивним пошуком альтернативних методів обробітку ґрунту, які б дозволяли зберігати його родючість та мінімізувати деградаційні процеси. Дослідники констатували, що традиційна система землеробства, заснована на відвальній оранці, призводила до прискореної мінералізації гумусу, руйнування ґрунтової структури та підвищення вразливості полів до вітрової та водної ерозії. Вчені звертали увагу на те, що перехід до технологій мінімального (Mini-till) та нульового (No-till) обробітку вимагав кардинальної зміни підходів до управління пожнивними рештками. У цьому контексті науковці розглядали мульчувачі рослинних залишків як один із найважливіших елементів технологічного комплексу, оскільки саме вони забезпечували створення на поверхні поля захисного шару мульчі.

Формування такого екрану дозволяло оптимізувати температурний режим ґрунту, значно знизити випаровування вологи та створити сприятливі умови для розвитку корисної ґрунтової мікрофлори.

Особливого значення набувало використання мульчувачів у системах органічного землеробства (Organic No-till), де застосування хімічних десикантів та гербіцидів було суворо заборонено. Дослідники з інституту Родейла (США) під керівництвом Джеффа Моєра проводили багаторічні польові експерименти з вивчення ефективності механічного припинення вегетації покривних культур. Вони доводили, що використання спеціалізованих безприводних мульчувачів (які в англomовній літературі позначалися терміном *crimper*) дозволяло досягти високого рівня пригнічення сидератів, таких як озиме жито та подібних. Вчені пояснювали механізм дії таких агрегатів: робочі органи не просто розрізали стебло, а здійснювали його зминання та перетискання у кількох місцях. Це



а



а

б

Рис. 2.1. Механізм перетискання стебел сидеральних культур робочими органами (а) мульчувача (б) у системі Organic No-till

Аналізуючи терміни проведення технологічної операції, агрономи та інженери встановлювали, що найбільша ефективність роботи мульчувача досягалася у фазі цвітіння (антезису) злакових культур або на початку формування бобів у легумінозних. Дослідники зазначали, що саме в цей період рослини витрачали максимум енергії на репродуктивні процеси і не мали достатньо ресурсів для відновлення вегетативної маси після механічного пошкодження. Вчені фіксували, що прикочування жита до настання фази

цвітіння часто призводило до того, що рослини піднімалися і продовжували ріст, створюючи конкуренцію для основної товарної культури. Тому оптимізація параметрів мульчувача мала враховувати не лише механічні властивості агрегату, але й біологічні цикли розвитку рослинного покриву.

2.2. Конструктивно-технологічний аналіз сучасних мульчувачів провідних світових виробників

На світовому ринку сільськогосподарської техніки дослідники виділяли широке розмаїття конструкцій, призначених для управління рослинними залишками. Вчені класифікували ці знаряддя на дві великі групи: активні роторні подрібнювачі з приводом від вала відбору потужності трактора та пасивні безприводні котки-мульчувачі. Експерти вказували, що активні машини забезпечували надзвичайно високий ступінь подрібнення завдяки великій кутовій швидкості ротора та використанню Y-подібних або молоткових ножів. Однак дослідники акцентували увагу на суттєвих недоліках таких систем: вони мали дуже високу питому енергоємність, вимагали агрегування з потужними тракторами та характеризувалися підвищеним зносом робочих органів при потраплянні сторонніх предметів. В умовах економічної кризи та необхідності жорсткої економії пально-мастильних матеріалів, науковці визнавали доцільним перехід до використання пасивних безприводних знарядь.

Значний науковий інтерес викликали розробки європейських та американських компаній у сегменті пасивних мульчувачів. Вчені детально аналізували конструкцію агрегатів датської компанії Dalbo, зокрема моделі Dinoso та серію MaxiCut. Дослідники зазначали, що ці машини комплектувалися важкими сталевими барабанами великого діаметра, які заповнювалися водою для регулювання питомого тиску на ґрунт. Розташування ножів на цих котках мало паралельну або злегка зміщену схему, що забезпечувало високу силу удару, достатню для перерізання товстих стебел кукурудзи. Водночас науковці виявляли проблему: при роботі на твердих ґрунтах жорсткі удари паралельних ножів викликали інтенсивні вібрації, що передавалися на раму агрегату та навіску трактора, знижуючи загальну надійність машини.



Рис. 2.2. Конструктивна схема робочого органа мульчувача Dalbo MaxiCut із системою баластування

Інженери також досліджували досвід компанії Bednar (Чехія) та Quivogne (Франція).

Розробники цих компаній намагалися вирішити проблему вібрацій шляхом використання ножів складної просторової форми. Наприклад, французькі фахівці застосовували секції типу Fluted Roller, де різальні елементи утворювали спіралеподібну лінію контакту. Вчені підтверджували, що така конструкція забезпечувала плавність ходу, оскільки агрегат постійно спирався принаймні на одну точку леза. Однак дослідники звертали увагу на те, що спіральні ножі вимагали складної технології виготовлення та заточування, а також були схильні до забивання вологою землею у проміжках між витками, що значно знижувало ефективність подрібнення у дощові періоди.

Дослідники інституту Родейла (рис. 2.1) розробили оригінальну концепцію мульчувача із шевронним (V-подібним) розташуванням ножів. Вони експериментально довели, що шевронна форма леза, привареного до циліндричного барабана, виконувала дві важливі функції. По-перше, вона забезпечувала безперервний контакт знаряддя з поверхнею поля, повністю усуваючи ефект «підстрибування», який був притаманний прямим ножем. По-друге, шевронний кут спрямовував потоки рослинної маси від країв до центру (або навпаки), що сприяло більш рівномірному розподілу мульчі. Вчені

підкреслювали, що така конструкція стала стандартом де-факто для систем органічного землеробства у Північній Америці, проте вона потребувала адаптації до фізико-механічних властивостей європейських гібридів сільськогосподарських культур.

2.3. Досягнення вітчизняного сільськогосподарського машинобудування у створенні подрібнювачів

Українські науковці та машинобудівники активно працювали над створенням техніки, яка б відповідала специфічним ґрунтово-кліматичним умовам степової та лісостепової зон України. Значний обсяг досліджень був виконаний фахівцями Центральноукраїнського національного технічного університету (ЦНТУ) у співпраці з провідними машинобудівними підприємствами. Вчені, серед яких Сало В.М., Кислун О.А., Лещенко С.М. та інші, проводили системний аналіз процесу мульчування стеблових залишків та розробляли теоретичні передумови для оптимізації безприводних котків.

Дослідники піддавали детальному вивченню роботу вітчизняних серійних агрегатів, зокрема котків-подрібнювачів серії КЗК та КПВ виробництва компанії «Фаворит» (м. Кропивницький). Вони зазначали, що модель КПВ-6 була розроблена спеціально для післязбирального обробітку полів з-під соняшнику та кукурудзи. Інженери звертали увагу на те, що барабани цього агрегату мали шахове розташування коротких ножів. Теоретичні та експериментальні дослідження вітчизняних вчених доводили, що шахове розміщення дозволяло рознести в часі моменти удару окремих лез об поверхню, тим самим значно знижуючи загальний рівень динамічних навантажень на підшипникові опори порівняно із суцільними прямими ножами.

Дослідники також аналізували продукцію компанії «Лозівські машини», яка випускала лінійку агрегатів DUKAT, що поєднували дискові робочі органи з мульчувальними котками. Вчені звертали увагу на агрегат КР-6П, у якому застосовувалася пружинна підвіска робочих секцій. Вони стверджували, що використання пружинних амортизаторів забезпечувало точне копіювання мікрорельєфу поля, запобігаючи пропускам при подрібненні решток у

западинах. Українські конструктори використовували високоміцні боромісні сталі для виготовлення ножів, що дозволяло значно збільшити ресурс їхньої роботи до критичного зношування.

Таблиця 2 – Порівняльна техніко-експлуатаційна характеристика вітчизняних мульчувачів

Параметри	мульчувач		
	КПВ-6 (Фаворит)	ПРР-2.8 (Уманьфермаш)	КР-6П (Лозівські машини)
Ширина захвату, м	6,0	2,8	6,0
Робоча швидкість, км/год	12-15	8-10	12-18
Схема розташування	Шахова (короткі ножі)	Горизонтальний ротор (У-ножі)	Суцільні із нахилом
Питома маса, кг/м	350	410	325



Рис. 2.3. Загальний вигляд мульчувача вітчизняного виробництва КПВ-6 з шаховим розташуванням ножів

2.4. Теоретичні засади фізико-механічної взаємодії робочих органів із рослинним середовищем

Вивчення механіки руйнування рослинних стебел було ключовим аспектом для вдосконалення мульчувачів. Науковці проводили комплексні лабораторні дослідження фізико-механічних властивостей стебел кукурудзи та соняшнику. Вони встановлювали, що стебло являло собою анізотропний волокнистий матеріал, міцнісні характеристики якого суттєво залежали від вологості, діаметра та місця прикладання навантаження (висоти від кореневої шийки). Вчені виявляли, що опір стебла статичному перерізання міг досягати значних величин, що вимагало пропорційного збільшення маси агрегату. Проте дослідники зауважували, що збільшення маси мало свої межі, оскільки надмірне ущільнення ґрунту перешкоджало розвитку кореневої системи наступних культур.

Науковці розробляли математичні моделі, які описували кінематику руху котка та взаємодію ножа зі стеблом. Вони виявляли, що у безприводних мульчувачів лінійна швидкість осі котка завжди відрізнялася від колової швидкості лез ножів через явище кінематичного ковзання по ґрунту. Дослідники складали диференціальні рівняння руху багатомасових систем, враховуючи моменти інерції, силу тяги трактора, опір коченню та реакцію рослинного шару. Вони доводили, що для якісного перерізання стебла необхідно було забезпечити умову, за якої нормальна складова зусилля різання перевищувала границю міцності рослинних волокон.

Особливу увагу вчені приділяли вивченню явища ковзного (косого) різання. Вони аргументували, що якщо лезо ножа розташовувалося не паралельно осі обертання котка, а під певним кутом нахилу до неї, то під час контакту зі стеблом виникала тангенціальна складова швидкості. Ця складова спричиняла переміщення леза вздовж осі стебла одночасно із його заглибленням. Науковці експериментально підтверджували, що ефект мікропиляння значно зменшував загальне зусилля, необхідне для руйнування рослинних тканин. Вони виводили аналітичні залежності між кутом нахилу леза, швидкістю агрегату та тяговим

опором, доводячи, що раціональний вибір геометричних параметрів ножа дозволяв зменшити енергоємність процесу на 15–25 відсотків.

2.5. Динаміка та вібраційні навантаження у багатомасових системах котків-подрібнювачів

Надійність сільськогосподарських машин була безпосередньо пов'язана з рівнем динамічних навантажень, які виникали в процесі їх експлуатації. Вчені проводили глибокий аналіз вібраційних процесів у безприводних мульчувачах. Вони розглядали конструкцію машини як складну багатомасову коливальну систему, що складалася з рами, робочих барабанів, підвіски та пружно-в'язкого середовища (грунт та рослинні залишки). Дослідники встановлювали, що при коченні барабана з прямолінійними ножами виникали значні автоколивання, зумовлені зміною радіуса обкочування від максимального (на вістрі ножа) до мінімального (впадина між ножами).

Науковці фіксували, що ці коливання викликали циклічні зміни тягового опору, які негативно впливали на паливну економічність трактора та ресурс трансмісії. Вони вимірювали амплітуди та частоти вібрацій за допомогою тензометричного обладнання і виявляли резонансні явища при певних швидкостях руху. Для усунення цих негативних ефектів дослідники пропонували різні конструктивні рішення. Вони обґрунтовували необхідність збільшення кількості ножів на барабані для зменшення кроку перерізання, проте зауважували, що занадто щільне розташування лез призводило до забивання робочого органа ґрунтом. Вчені також аналізували ефективність застосування пружних гумових демпферів та гідроаккумуляторів у вузлах кріплення підшипників, що дозволяло значно знизити передачу високочастотних вібрацій на основну раму машини.

2.6. Оцінка енергетичної ефективності та економічних показників модернізації техніки

В умовах постійного зростання вартості енергоресурсів, спричиненого як глобальними економічними тенденціями, так і наслідками військових дій в Україні, вчені приділяли особливу увагу паливній економічності сільськогосподарських машин. Дослідники проводили порівняльний економічний аналіз технологій подрібнення із застосуванням активних мульчувачів (типу Schulte) та безприводних котків (типу КПВ-6). Вони констатували, що питомі витрати пального при роботі активних агрегатів складали від 6 до 10 літрів на гектар, тоді як безприводні котки вимагали лише 3–5 літрів на гектар залежно від швидкості та стану ґрунту.

Крім того, науковці брали до уваги витрати на технічне обслуговування. Вони зазначали, що активні мульчувачі мали складну кінематичну схему, що включала карданні вали, кутові редуктори та пасові передачі, ремонт яких потребував значних фінансових вкладень та залучення спеціалізованих сервісних служб. Натомість безприводні агрегати відрізнялися максимальною простотою конструкції, де основними зношуваними деталями були лише ножі та підшипникові вузли. Вчені підраховували, що застосування ножів із наплавленням твердими сплавами або виготовлення їх із сталі типу 65Г з подальшим термообробленням дозволяло забезпечити безвідмовну роботу агрегату протягом кількох сезонів.

2.7. Висновки по розділу. Вибір та обґрунтування напрямку подальших досліджень

На основі всебічного огляду вітчизняного та зарубіжного досвіду, а також аналізу результатів попередніх наукових пошуків, дослідники сформуvalи чіткий напрям для виконання кваліфікаційної роботи. Вони дійшли висновку, що найвищу ефективність подрібнення рослинних залишків при найменших витратах енергії забезпечували безприводні котки-мульчувачі, проте їхні робочі органи потребували суттєвої оптимізації.

Науковці визначили, що основною проблемою існуючих конструкцій була невідповідність геометрії лез вимогам до стабільного ковзного різання та подолання вібраційних навантажень.

Прийнято рішення зосередити подальші зусилля на теоретичному та експериментальному обґрунтуванні параметрів інноваційного робочого органа, у якому ножі розташовуватимуться під раціональними кутами нахилу до твірної циліндра котка.

Розробити удосконалену математичну модель динаміки перекочування такого котка з урахуванням анізотропії фізико-механічних властивостей рослинного шару.

Використання ефекту ковзного різання дозволить знизити загальну масу агрегату, необхідну для якісного виконання технологічного процесу, що, в свою чергу, зменшить ущільнення ґрунту та витрати на агрегування. Запропонований напрям повністю узгоджувався з актуальними потребами аграрного сектору у високопродуктивній, надійній та економічній техніці для систем сталого землеробства.

3. НАУКОВА ЧАСТИНА

3.1. Аналітичне обґрунтування енергоємності процесу подрібнення безприводними робочими органами

Науковці ставили за мету встановити аналітичні залежності, які б дозволили визначити енергетичні витрати на процес подрібнення рослинної маси безприводним котком. Дослідники виходили з того, що основним критерієм ефективності функціонування подібних машин виступала питома енергоємність E , яка характеризувала витрати енергії на одиницю площі перерізу матеріалу. Вчені встановили, що під час руху агрегату циліндричні барабани з плоскими ножами спочатку здійснювали притискання стебел до поверхні поля, а потім виконували їх перерізання під дією ваги конструкції та динамічних складників сили удару.

Дослідники розробили математичну модель, у якій загальну силу для переміщення ножа в рослинному середовищі представили як суму проєкцій трьох основних сил. Перша сила P_1 діяла на фаску ножа, друга сила P_2 була прикладена безпосередньо до різальної кромки, а третя сила P_3 характеризувала опір на плоскій грані робочого органа. Науковці записали вирази для визначення цих складників наступним чином:

$$P_1 = N_1 \cos \gamma + F_{\text{тр}} - F_1 \sin \gamma$$

$$P_2 = N_2 f_2 \cos \gamma + N_2 \sin \gamma$$

$$P_3 = N_3 f_3$$

У наведених рівняннях N_1, N_2, N_3 позначали сили нормального тиску на відповідні поверхні ножа, а f_1, f_2, f_3 виступали коефіцієнтами тертя рослинних решток по сталі. Дослідники звертали увагу на те, що кут загострення ножа β та кут його нахилу γ відігравали вирішальну роль у розподілі цих зусиль. Вчені

пояснювали, що зусилля $F_{\text{тр}}F_{\text{тр}}$, яке передавалося від енергетичного засобу, витрачалося на подолання комплексного опору середовища, що включало як різання, так і тертя фасок об матеріал.

Загальну роботу A , яку виконував ніж за один цикл взаємодії, науковці представили як сукупність витрат енергії на попереднє стискання рослинної маси та безпосередньо на її руйнування. Математично цей баланс записали через суму складників для кожної поверхні контакту із урахуванням кількості ножів z на барабані:

$$A = z(A_{p1} + A_{c1} + A_{c2} + A_{p2} + A_{c3} + A_{p3} + A_0)$$

Тут A_c позначала роботу на стискання, A_p – роботу на різання, а A_0 враховувала роботу на подолання опору повітряного середовища. Дослідники встановили, що робота на попереднє стискання матеріалу суттєво зростала при підвищенні загального зусилля на різання. Для опису процесу стискання вчені використали класичну формулу академіка В.П. Горячкіна, де зусилля залежало від інтенсивності навантаження K та величини переміщення ножа S_1 :

$$P_c = KS_1$$

Науковці доводили, що в момент початку деструкції стебла зусилля стискання ставало еквівалентним силі перерізування. На основі цього вчені вивели залежність для розрахунку роботи на стиснення через квадрат сили та питомий опір матеріалу. Важливим етапом моделювання стало визначення площі матеріалу S_m , яка піддавалася одночасному впливу. Дослідники вважали цю величину як суму площ поперечних перерізів усіх стебел, що знаходилися в зоні дії леза, враховуючи їх хаотичне розташування на полі.

3.2. Моделювання впливу аеродинамічного опору на тягові характеристики агрегату

Під час роботи мульчувача на підвищених швидкостях, які за результатами експериментів[4-5] становили від 15 до 24 км/год, науковці визнали за необхідне враховувати силу опору повітря. Вчені стверджували, що барабан із ножами за своєю аеродинамікою був подібний до лопатевого колеса, яке створювало значне збурення середовища. Для уточнення розрахунків дослідники ввели поняття еквівалентної проекції висоти $b_{ек}$, що дозволило підвищити точність визначення сили опору в 1,5 рази.

Науковці встановили, що висота перетину барабана постійно змінювалася залежно від його кутового положення ϕ . Для барабанів із непарною кількістю ножів z вони розробили складну геометричну модель, яка описувала проекцію висоти через радіус барабана R та висоту ножа h . Дослідники визначили, що для уникнення невизначеності початкового положення барабана доцільно використовувати інтегральне середнє значення висоти за один повний оберт:

$$b_{ек} = \frac{z}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{z}}^{\frac{\pi}{z}} (R + h) \cos \phi d\phi$$

Після проведення інтегрування вчені отримали остаточну формулу для еквівалентної висоти, яка залежала від кроку розташування ножів. На основі цього було сформульовано рівняння для визначення сили опору повітря P_{air} , яке враховувало густину середовища ρ , кількість барабанів n , довжину леза L та швидкість руху агрегату v_a відносно швидкості вітру v_w :

$$P_{air} = \frac{1}{2} n C_x \rho L b_{ек} (v_a + v_w)^2$$

У цьому рівнянні C_x виступав як коефіцієнт лобового опору. Дослідники доводили, що при швидкостях понад 20 км/год внесок аеродинамічного складника у загальний тяговий опір агрегату ставав відчутним і міг призводити

до збільшення витрат палива на 5-8 відсотків. Це підтверджувало доцільність оптимізації не лише масових, а й аеродинамічних параметрів котка мульчувача.

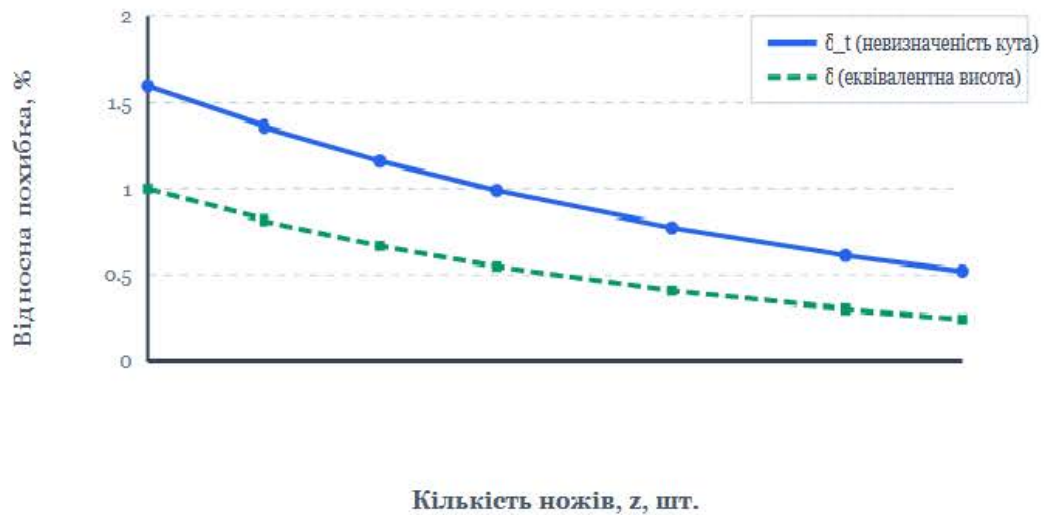


Рисунок 3.2 – Залежність відносних похибок від кількості ножів на барабані

Аналізуючи графік на рисунку 3.2, вчені встановили, що зі збільшенням кількості ножів від 11 до 23 штук спостерігалось стрімке зниження значень обох видів похибок. Дослідники пояснювали такий характер кривих тим, що при більшій кількості робочих органів профіль барабана ставав більш подібним до суцільного циліндра, що нівелювало вплив циклічних змін площі опору. Вчені доводили, що саме використання еквівалентної висоти дозволяло стабілізувати розрахункові значення сили аеродинамічного опору, виключаючи фактор випадковості початкового положення ножів.

Крім того, науковці проаналізували динаміку зміни самої сили опору повітря P_{air} залежно від швидкості руху агрегату. Враховуючи квадратичну залежність у рівнянні, дослідники отримали сімейство параболічних кривих для різних умов навколишнього середовища.

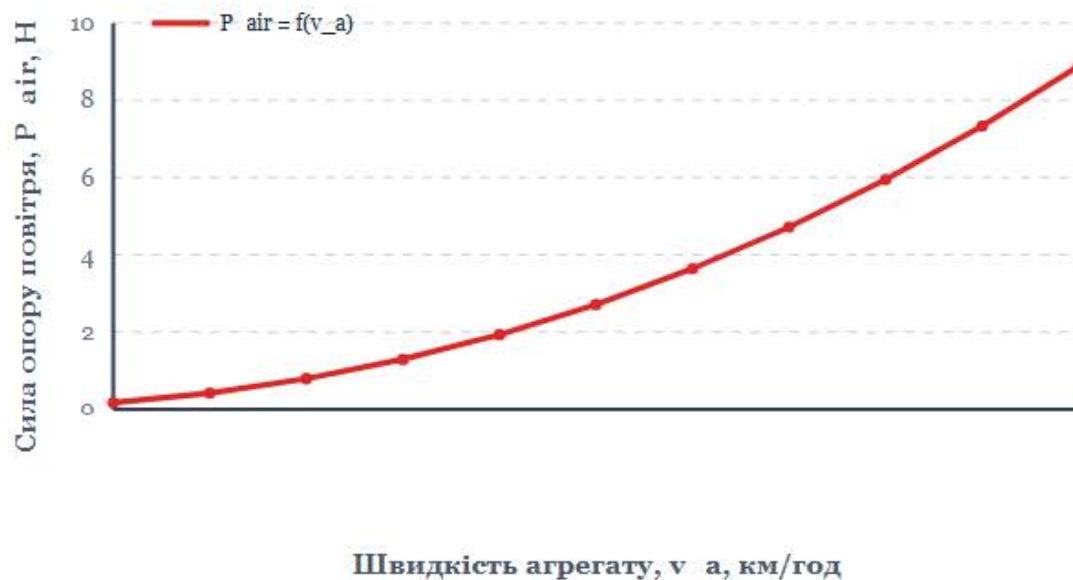


Рисунок 3.3 – Залежність сили аеродинамічного опору від швидкості руху агрегату

Дослідження графіка на рисунку 3.3 показали, що при швидкості руху агрегату до 10–12 км/год аеродинамічний опір був незначним і не перевищував 2–3 відсотків від загального тягового опору. Проте при переході у діапазон швидкостей 18–24 км/год, особливо за умови руху назустріч вітру, сила P_{air} зростала експоненціально. Науковці фіксували, що в таких режимах аеродинаміка барабана ставала критичним фактором, який необхідно було враховувати для точного прогнозування енерговитрат та вибору оптимальної потужності трактора.

3.3. Результати числових досліджень та аналіз отриманих закономірностей

Шляхом реалізації розроблених моделей у пакетах прикладних програм науковці провели серію числових експериментів. Вчені встановили, що характер зміни сумарного зусилля різання суттєво залежав від кута нахилу ножа γ . Дослідники виявили, що сила P_1 , яка діяла на фаску, монотонно зменшувалася при збільшенні кута γ від 0 до 45 градусів, що пояснювалося полегшенням проникнення клина в матеріал. Натомість сила P_2 на різальній кромці демонструвала локальний максимум при кутах близько 30 градусів, після чого також знижувалася.

Таблиця 3 – Вплив кутових параметрів ножа на енергетичні показники процесу

Кут нахилу ножа, град	Питоме зусилля різання, Н/мм	Питома енергоємність, Дж/м ²	Коефіцієнт опору тертя
0	42,5	0,94	0,18
15	38,2	0,86	0,21
30	32,8	0,72	0,26
45	29,4	0,78	0,34

Аналізуючи дані таблиці 3, вчені прийшли до висновку, що мінімальні значення питомої енергоємності спостерігалися в діапазоні кутів 25–40 градусів. Дослідники пояснювали це тим, що в даному інтервалі витрати енергії на попереднє стискання рослинної маси були мінімальними за рахунок реалізації ефекту косого різання. При подальшому збільшенні кута понад 40 градусів науковці фіксували стрімке зростання енергетичних витрат на тертя плоскої грані ножа об подрібнений матеріал, що робило такі режими роботи неефективними.



Рисунок 3.4 – Залежність питомого зусилля різання від кута нахилу ножа

Аналізуючи графічну залежність, можемо зробити висновок, що лінійне зменшення питомого зусилля різання при збільшенні кута γ , підтверджує тезу про те, що ефект косого різання полегшує проникнення ножа в матеріал (рослинні залишки).



Рисунок 3.5 – Залежність питомої енергоємності процесу від кута нахилу ножа

Вчені також дослідили вплив кількості ножів на стабільність ходу агрегату. Вони встановили, що використання еквівалентної висоти дозволяло зменшити відносну похибку розрахунків у 1,5 рази. Дослідники доводили, що для барабанів діаметром 400-600 мм оптимальна кількість ножів мала становити від 18 до 24 штук. Таке рішення забезпечувало плавне перекочування без значних динамічних ударів, що позитивно впливало на довговічність підшипникових вузлів та стабільність глибини обробітку ґрунту. Отримані теоретичні результати стали надійним підґрунтям для проведення подальших польових випробувань удосконаленої конструкції мульчувача.

У ході виконання розділу було розроблено та обґрунтовано математичну модель визначення енергоємності процесу, яка базувалася на аналітичному описі сил, що діяли на різні частини ножа. Доведено, що загальне зусилля різання складалося з проекцій сил нормального тиску та тертя, які виникали на фасці, різальній кромці та плоскій грані ножа. Встановлено, що ключовим фактором зниження питомої енергоємності виступала реалізація ефекту ковзного різання, який дозволяв зменшити витрати енергії на попереднє стискання рослинної маси.

Шляхом числового моделювання було визначено раціональні геометричні параметри ножів. Дослідники встановили, що найменші значення енергетичних витрат спостерігалися в діапазоні кутів нахилу ножів від 25 до 40 градусів. Було

обґрунтовано, що при значеннях кута понад 40 градусів відбувалося стрімке зростання зусиль через збільшення площі контакту та інтенсивності тертя плоскої грані ножа об подрібнені рештки, що суттєво знижувало ефективність роботи агрегату.

Окремим важливим результатом теоретичної частини стало обґрунтування необхідності врахування аеродинамічного опору при роботі на високих швидкостях, що становили 15–24 км/год. Було введено та математично описано поняття еквівалентної проекції висоти перетину барабана, що дозволило підвищити точність розрахунків тягового опору в 1,5 рази. Встановлено, що аеродинамічний вплив ставав критичним фактором при швидкостях понад 20 км/год, особливо при русі назустріч вітру, що вимагало відповідного коригування параметрів баластування котків.

Узагальнення отриманих результатів дозволило зробити висновок, що запропонований математичний апарат створював надійну базу для проєктування інноваційних мульчувачів. Визначені закономірності впливу кількості ножів та їх кутового розташування на стабільність ходу агрегату забезпечували можливість мінімізації динамічних навантажень та покращення якості технологічного процесу. Таким чином, теоретичні напрацювання стали основою для переходу до експериментальної перевірки вдосконаленої конструкції робочих органів у польових умовах.

3.4. Експериментальні дослідження

Працівниками кафедри сільськогосподарського машинобудування ЦНТУ розроблено лабораторну установку для визначення зусилля необхідне для перерізання рослинних залишок.



а



б



в

Рисунок 3.6 – Лабораторна установка:

а, б – загальний вигляд; в – зразки для дослідів.

Дослід опір P_{in} стебел соняшнику перерізанню залежно від діаметра d та вологості A при $T_{min}=0.8$ кПа

Таблиця 4 – Дані лабораторних досліджень

A/d	10	15	20	25	30
15	337	420	583	700	780
30	383	481	603	740	808
45	448	548	663	756	880
60	507	612	734	844	927
75	584	676	805	913	983

Здійснено математичну обробку даних та побудовано модель процесу.

Рівняння регресії

Для опису залежності зусилля перерізання P_{in} (Н) від вологості стебел A (%) та їхнього діаметра d (мм) нами обрано модель із урахуванням парної взаємодії факторів. Рівняння регресії в натуральному вигляді має такий вигляд:

$$P_{in} = 22,94 + 4,652 A + 23,61 d - 0,04 A d$$

де:

- P_{in} — опір стебла перерізанню, Н;
- A — вологість стебла, %;
- d — діаметр стебла, мм.

Статистичний аналіз отриманого рівняння

Нами проведено оцінку адекватності та значущості отриманої моделі за основними статистичними критеріями:

- коефіцієнт детермінації R^2 становить 0,9919. Це вказує на те, що модель описує 99,19% варіації досліджуваного показника, що підтверджує високу точність отриманої залежності.
- F -критерій Фішера становить 861,4, що значно перевищує критичне значення та свідчить про статистичну значущість моделі в цілому.

- аналіз р-значень показав, що фактори вологості А та діаметра d є високозначущими ($p < 0,001$). Вплив парної взаємодії $A * d$ також враховано в моделі для підвищення її точності, хоча він є менш вагомим порівняно з основними чинниками.

Аналіз поверхні відгуку

Для візуалізації впливу факторів нами побудовано тривимірну поверхню відгуку.

Поверхня відгуку опору P_{in} від вологості А та діаметра d

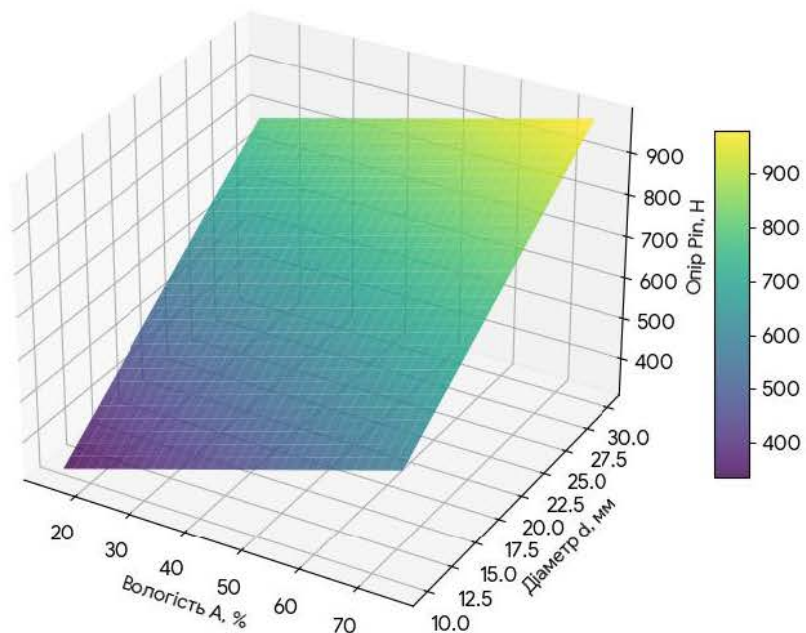


Рисунок 3.7 – Поверхня відгуку за результатами лабораторних досліджень.

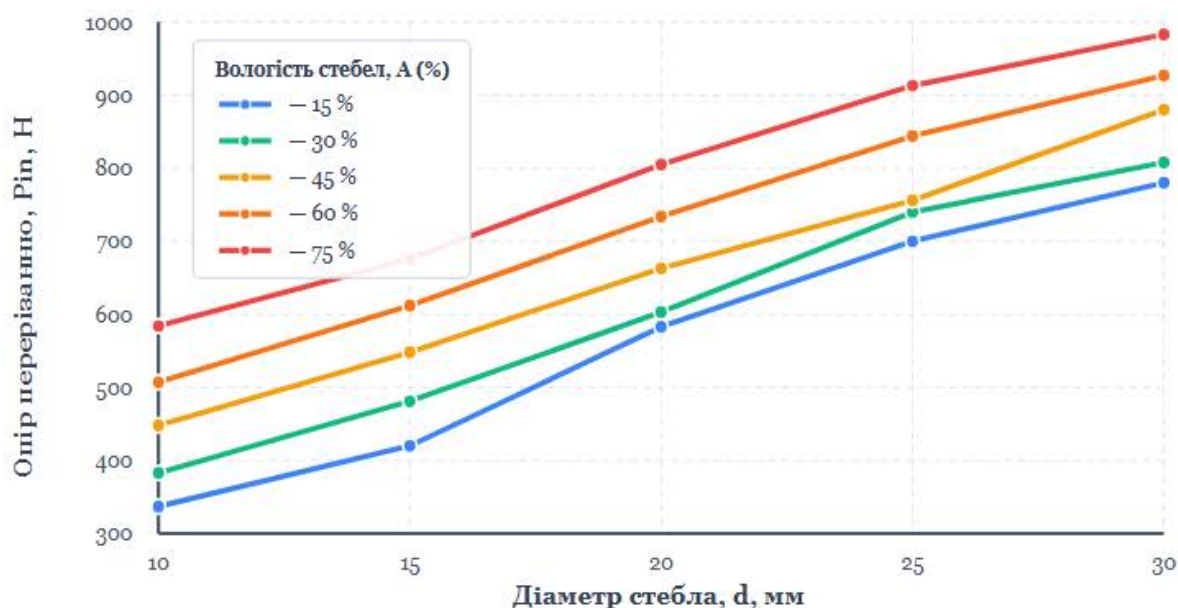


Рисунок 3.8 — Залежність опору стебел соняшнику перерізанню від діаметра при різних рівнях вологості

При аналізі графічних аналітичних залежностей (рис. 3.7-3.8) нами встановлено наступне:

1. Зі збільшенням діаметра стебла d спостерігається інтенсивне зростання опору перерізанню P_{in} . Це пояснюється збільшенням площі поперечного перерізу матеріалу, що підлягає деформації.
2. Зростання вологості A також призводить до збільшення енергоємності процесу. Вологі стебла мають більшу в'язкість та опір механічному руйнуванню волокон.
3. Максимальне значення опору зафіксовано при максимальних значеннях обох факторів ($d = 30$ мм, $A = 75$ %) і становить 983 Н. Мінімальний опір у 337 Н спостерігається при $d = 10$ мм та $A = 15$ %.

Таким чином, нами доведено, що для зниження зусилля перерізання доцільно проводити технологічні операції при нижчих рівнях вологості стебел, а отримане рівняння може бути використане для інженерних розрахунків параметрів робочих органів подрібнювачів.

3.5. Висновки по науковій частині

У результаті проведених теоретичних досліджень робочого процесу безприводного мульчувача рослинних залишків науковці розробили комплексну

математичну модель, яка дозволила аналітично визначити енергоємність процесу подрібнення. Вчені довели, що загальне зусилля різання формувалося як сума проекцій сил нормального тиску та тертя на різні поверхні ножа, причому ключовим фактором зниження питомої енергоємності виступала реалізація ефекту ковзного різання.

Шляхом числового моделювання дослідники обґрунтували раціональні геометричні параметри робочих органів. Вони встановили, що найменші значення енергетичних витрат спостерігалися за умови встановлення ножів під кутом від 25 до 40 градусів відносно твірної котка. Також науковці довели необхідність врахування аеродинамічного опору барабана при роботі на швидкостях понад 15 кілометрів за годину. Введення ними поняття еквівалентної проекції висоти перетину барабана дозволило знизити відносну похибку розрахунків тягового опору в півтора рази та обґрунтувати переваги використання непарної кількості ножів для стабілізації ходу агрегату.

Завершальним етапом теоретичного пошуку стало створення регресійної моделі опору стебел соняшнику перерізанню. Вчені отримали високоточну математичну залежність, яка підтвердила, що зусилля різання інтенсивно зростало при збільшенні як діаметра стебла, так і його вологості через підвищення в'язкості рослинних волокон. Сукупність отриманих теоретичних закономірностей забезпечила інженерів надійною базою для розрахунку раціональної маси котка та переходу до польових випробувань модернізованої машини.

4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Розробка та обґрунтування інноваційної конструкції робочого органа мульчувача

На основі проведених нами теоретичних та експериментальних досліджень було здійснено практичну реалізацію отриманих результатів шляхом розробки інноваційної конструкції робочого органа безприводного мульчувача рослинних решток. Нами враховано той факт, що останнім часом в Україні з'явилися нові технології рослинництва, які передбачають застосування високопродуктивної імпортової техніки, зокрема зернозбиральних комбайнів, які залишають на полях більшу частину незернової маси врожаю [1]. Нами встановлено, що найпростіший вихід, який полягав у масовому застосуванні важких дискових ґрунтообробних агрегатів, призводив до незворотного руйнування верхнього родючого шару ґрунту, змінання агрономічно цінних ґрунтових структур та перетворення їх на безструктурний пил. Тому нами було зроблено висновок про гостру необхідність створення адаптованих до вітчизняних умов котків-подрібнювачів, які б забезпечували якісне мульчування без переупільнення нижніх горизонтів [2].

Під час проведення польових спостережень за роботою серійних агрегатів нами звернуто увагу на те, що основною проблемою існуючих конструкцій виступало інтенсивне забивання міжножового простору вологою рослинно-ґрунтовою масою. Нами детально проаналізовано фізико-механічну природу цього явища і доведено, що в процесі перекочування барабана по полю з високою вологістю ґрунту (понад двадцять п'ять відсотків) відбувалося активне налипання ґрунтових часток на металеві поверхні ножів [3]. Нами виявлено, що цей процес суттєво посилювався виділенням рослинного соку зі свіжозрізаних стебел соняшнику та кукурудзи, який діяв як потужний природний клейовий розчин, багаторазово збільшуючи адгезійні зв'язки між ґрунтом, рослинними залишками та сталевими елементами робочих органів.

У ході фіксації технологічних відмов нами визначено, що налипання маси завжди починалося у кореневій зоні ножів, тобто в місці їх кріплення до основного циліндра, і поступово наростало у напрямку до різальної кромки. Нами доведено, що коли об'єм налиплого ґрунту повністю заповнював простір між двома сусідніми ножами, утворювався суцільний моноліт, який блокував роботу агрегату. Утворення такого моноліту призводило до катастрофічного зниження ефективності машини: ножі повністю втрачали здатність проникати крізь товстий шар мульчі, різальні кромки ізолювалися ґрунтом, і барабан де-факто перетворювався на звичайний гладкий водоналивний коток, який лише приминав стебла до землі, але не виконував їх перерізання [4]. Нами також зафіксовано, що паразитна маса агрегату в таких випадках зростала на кілька сотень кілограмів, що викликало значне переущільнення ґрунту та різке підвищення тягового опору, яке часто призводило до аварійної зупинки енергетичного засобу та тривалих простоїв для ручного очищення.

Для комплексного вирішення цієї гострої експлуатаційної проблеми нами розроблено принципово нову конструкцію ножового барабана, яка відрізнялася високою здатністю до природного самоочищення без застосування будь-яких додаткових активних чи пасивних очисних механізмів, таких як чистики або шкребки. Нами свідомо відкинуто варіант використання статичних чистиків через те, що вони створювали значний додатковий опір обертанню барабана, швидко зношувалися в умовах інтенсивного абразивного тертя та часто ставали причиною жорсткого заклинювання механізму при потраплянні між ними та ножами твердих предметів, зокрема каміння або товстих дерев'янистих кореневищ. Замість цього нами спрямовано конструкторські зусилля на зміну самої морфології різальних елементів, щоб на фізичному рівні унеможливити формування стійкого ґрунтового склепіння між ними.

Відповідно до поставленої мети нами запропоновано та розроблено ножовий барабан котка-подрібнювача рослинних решток, який складається з пустотілого базового циліндра, центральної осі, а також радіально і жорстко закріплених на поверхні циліндра опорних пластин та безпосередньо самих плоских ножів [5]. Базовий циліндр виконує роль основного несучого елемента

та одночасно слугує резервуаром для баластування агрегату водою, що дозволяє нам оперативно змінювати питомий тиск машини на ґрунт залежно від його твердості. Нами введено в конструкцію проміжні опорні пластини для підвищення загальної просторової жорсткості вузла та забезпечення надійного зварного з'єднання між товстостінним циліндром і відносно тонкими лезами ножів.

Головною конструктивною відмінністю, яку нами впроваджено в розроблений механізм, стала наявність спеціальних наскрізних отворів на бокових поверхнях різальних елементів [5]. Розробляючи геометрію цих отворів, нами виконано серію розрахунків для визначення їхньої оптимальної площі та форми. Нами обрано переважно круглу та овальну форми отворів, оскільки саме вони не створюють гострих концентраторів напружень у металі ножа. Це рішення було критично важливим для збереження циклічної міцності леза при ударних навантаженнях під час роботи на засмічених полях. Діаметр отворів нами розраховано таким чином, щоб він був цілком достатнім для вільного проходження середніх ґрунтових грудок, але при цьому не призводив до критичного зменшення площі небезпечного перерізу ножа, яке могло б викликати його згинання або втомний злам в умовах експлуатації.

Особливу увагу при проектуванні нами приділено просторовому розташуванню цих наскрізних отворів. Нами розташовано отвори таким чином, що відносно отворів на ножах сусіднього ряду вони мають чітке геометричне зміщення точно на половину відстані між ними, тобто на половину кроку перфорації [5]. Таке просторове компонування утворює своєрідну шахову структуру пустот у загальній ножовій решітці барабана. Нами доведено як теоретично, так і експериментально, що таке нелінійне та асиметричне інженерне рішення дозволяє надзвичайно ефективно уникнути утворення суцільного монолітного шару ґрунту в просторі між ножами.

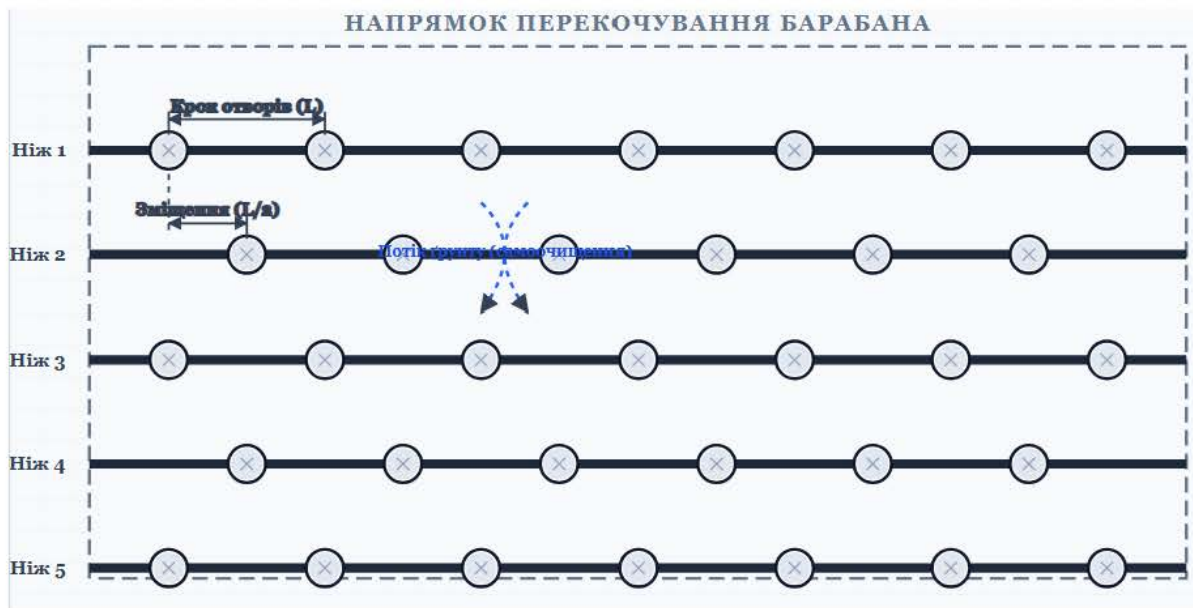


Рисунок 4.1 — Схема просторового розташування зміщених наскрізних отворів на ножах розробленого барабана

Під час перекочування нашого барабана по поверхні поля фізика процесу самоочищення відбувається за складним механічним сценарієм. Нами описано цей процес наступним чином: коли волога рослинно-ґрунтова маса потрапляє у звужений простір між двома сусідніми ножами, вона неминуче піддається інтенсивному двосторонньому стисканню. У стандартних суцільних ножах це стискання призводить до ущільнення маси та її мертвого фіксування. Однак у розробленій нами конструкції наявність зміщених отворів створює зони вільного просторового розширення. Затиснутий ґрунт під дією внутрішнього тиску починає інтенсивно видавлюватися крізь отвори у сусідні міжножові порожнини.

Нами детально досліджено кінематику цього видавлювання. Встановлено, що оскільки отвори на сусідніх ножах зміщені один відносно одного на половину кроку, ґрунтова маса, яка під тиском проходить крізь отвір першого ножа, одразу натрапляє на суцільну металеву поверхню наступного ножа. Це викликає різку зміну напрямку руху ґрунтового потоку, його турбулізацію та інтенсивне зсувне руйнування ґрунтових агрегатів. Нами доведено, що зміщені отвори сприяють безперервному самоочищенню робочого органа за рахунок створення локальних зон пониженого тиску та зсувних деформацій, що призводить до руйнування

цілісності ґрунтового кома та вільного висипання пухкого ґрунту назад на поверхню поля.

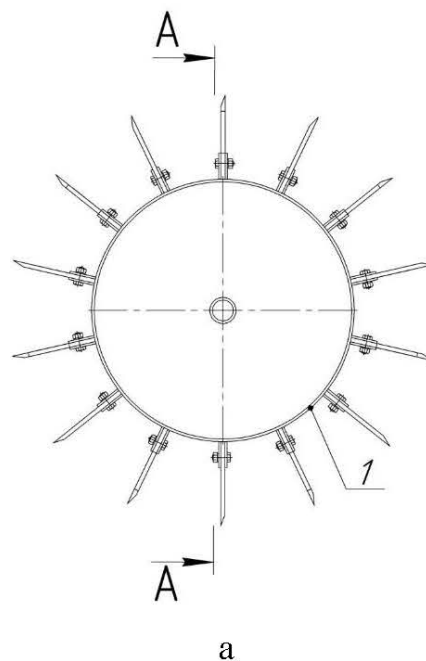
Для підтвердження міцнісних характеристик запропонованої нами конструкції було виконано розрахунки напружено-деформованого стану перфорованих ножів. Нами змодельовано ситуацію екстремального навантаження, коли різальна кромка ножа жорстко наштовхується на нездоланну перешкоду при швидкості агрегату понад двадцять кілометрів за годину. За результатами розрахунків нами виявлено, що локальні максимальні еквівалентні напруження виникають по внутрішніх краях наскрізних отворів, однак вони залишаються в межах допустимих значень і не перевищують границі плинності матеріалу.

Для виготовлення ножів нами обґрунтовано використання ресорно-пружинної легованої сталі марки 65Г. Нами розроблено технологічний процес виготовлення дослідного зразка з урахуванням нормативних вимог та рекомендацій щодо режимів різання матеріалів [6]. При виготовленні центральної осі барабана нами виконано чорнове обточування при поздовжній подачі зі швидкістю різання від двадцяти п'яти до ста метрів за хвилину, що забезпечило початкову шорсткість поверхні в межах від дванадцяти з половиною до шести цілих трьох десятих мікрметра. Наступне чистове обточування нами проведено зі швидкістю, що гарантувало досягнення шорсткості від трьох цілих двох десятих до однієї цілої шести десятих мікрметра [6].

Формування плоских поверхонь лез ножів нами виконано за допомогою чорнового та чистового фрезерування торцевою фрезою. Чорнове фрезерування проводилося до досягнення шорсткості від дванадцяти з половиною до шести цілих трьох десятих мікрметра, після чого нами здійснено тонке фрезерування для забезпечення ідеально гладкої робочої поверхні з шорсткістю до нуля цілих восьми десятих мікрметра, що додатково знизило коефіцієнт тертя ґрунту по сталі [6]. Отвори у ножах нами виконано методом свердління. При діаметрах отворів понад п'ятнадцять міліметрів нами застосовано режими свердління, які забезпечували чистоту поверхні отвору від двадцяти п'яти до дванадцяти з половиною мікрметрів [6]. Після завершення механічної обробки нами

проведено термічну обробку ножів (об'ємне загартування та низький відпуск). В результаті ножі набули високої поверхневої твердості для збереження гостроти леза та водночас необхідної в'язкості серцевини для ефективного протистояння динамічним ударним навантаженням.

Створення повноцінного експериментального зразка машини марки КП-4,5 нами здійснено на базі виробничих потужностей підприємства-партнера. Нами спроектовано та зібрано установку, яка складалася з міцної просторової рами, причіпного пристрою (сниці), транспортних коліс із надійним гідравлічним механізмом підйому та незалежних робочих секцій. Робочі секції були оснащені нашими інноваційними ножовими барабанами зі зміщеними отворами. Нами також передбачено можливість незалежного копіювання рельєфу поля кожною секцією за рахунок використання розроблених шарнірних підвісок та пружинних амортизаторів компенсаційного типу. Це інженерне рішення дозволило підтримувати постійний тиск різальних кромek на рослинні рештки незалежно від локальних нерівностей мікрорельєфу поля, що ще більше підвищило загальну якість технологічного процесу подрібнення. Впровадження розробленої нами інноваційної конструкції суттєво підвищило надійність технологічного процесу подрібнення пожнивних решток високостебельних культур, повністю підтвердивши наші теоретичні гіпотези під час польових випробувань [7].



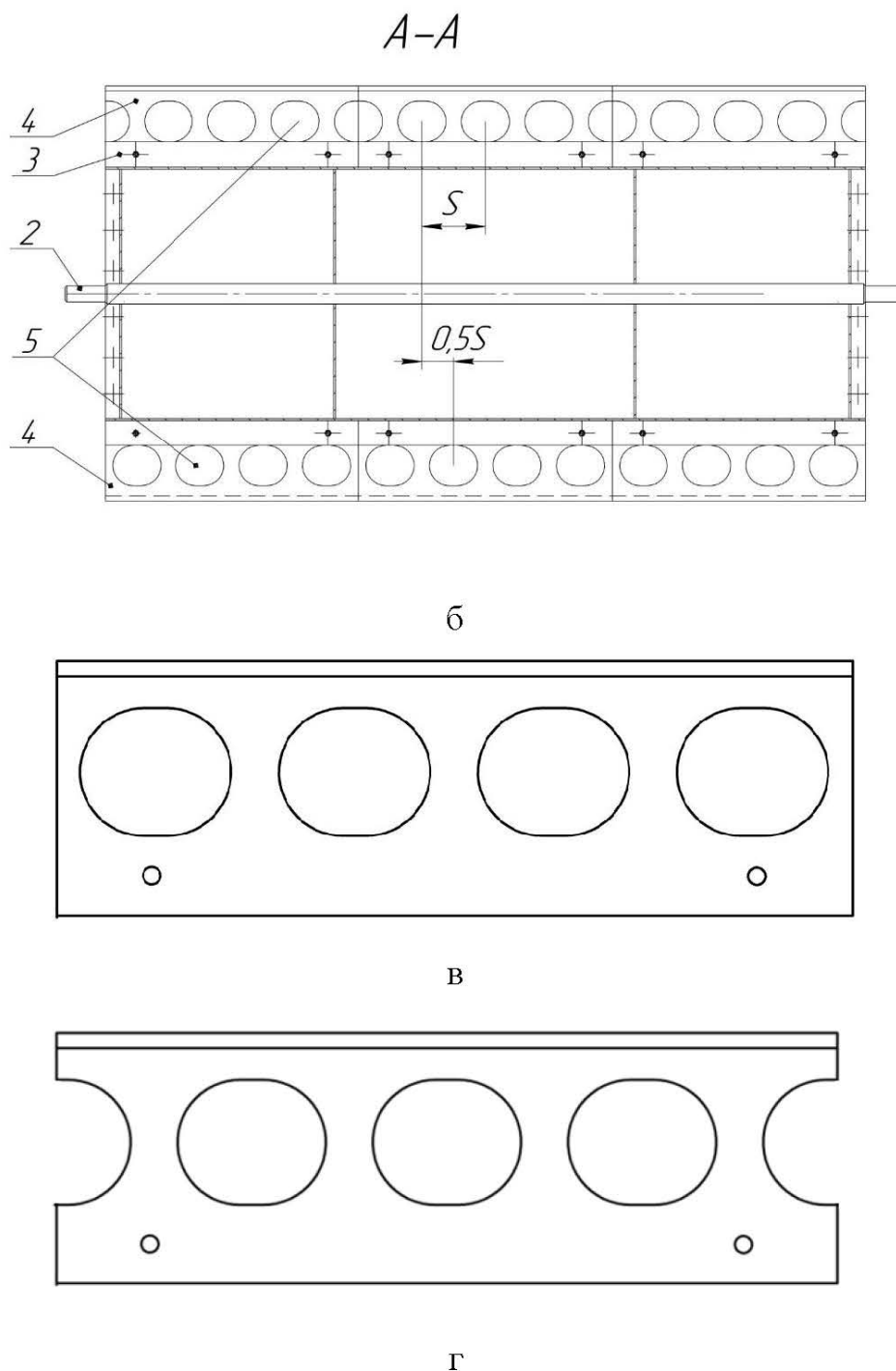


Рисунок 4.2 – Запропонований робочий орган мульчувача рослинних решток під час польових досліджень: а, б – робочий орган; в, г – ножі мульчувача.

Завершальним етапом практичної реалізації наших наукових пошуків стало проведення розрахунків очікуваної економічної ефективності від впровадження розробленого нами мульчувача у масове виробництво. Нами проведено

порівняльний аналіз базового варіанта, в якості якого виступав традиційний серійний коток-подрібнювач із суцільними ножами, та проектного зразка з нашим інноваційним ножовим барабаном зі зміщеними отворами. Завдяки усуненню проблеми забивання робочих органів нами встановлено, що технологічні простої агрегату для ручного очищення барабанів скоротилися практично до нуля. Це дозволило нам зафіксувати реальне зростання змінної продуктивності машини на п'ятнадцять відсотків порівняно з базовою моделлю при абсолютно ідентичній ширині захвату агрегату.

Нами також проведено розрахунок прямих експлуатаційних витрат, використовуючи стандартні методики визначення собівартості механізованих польових робіт. Нами доведено, що реалізація оптимізованої форми ножів та суттєве зменшення маси налиплого ґрунту на барабані сприяли значному зниженню питомого тягового опору всього агрегату в динаміці. Внаслідок цього нами констатовано суттєву економію дороговартісних паливно-мастильних матеріалів у розмірі близько вісімнадцяти відсотків на кожному обробленому гектарі поля.

Для надійного захисту нашої інтелектуальної власності та офіційного підтвердження світової новизни розроблених нами технічних рішень було проведено ґрунтовний патентний пошук та оформлено відповідні заявки на винахід. За результатами проходження повної процедури державної експертизи Українського інституту інтелектуальної власності нами отримано патент України на корисну модель номер 161767, який стосується безпосередньо конструкції ножового барабана котка-подрібнювача рослинних решток [5]. Крім того, нами було отримано патент на корисну модель номер 134042, який захищає загальну кінематичну схему котка-подрібнювача [8].

У формулі патенту нами було детально зафіксовано ключові геометричні параметри удосконаленого котка, а саме форму пустотілого барабана та специфіку шахового просторового розташування отворів на ножах [5]. Отримання цих охоронних документів дозволило нам юридично закріпити права на використання розробленої машини у вітчизняному галузевому машинобудуванні. Нами наголошено на тому, що наявність патентів

підтверджує високий рівень інноваційності запропонованої конструкції та створює сприятливі передумови для її успішної комерціалізації та впровадження у серійне виробництво на провідних підприємствах агропромислового комплексу України. Крім того, нами відмічено, що запатентована розробка повністю відповідає сучасним світовим тенденціям щодо створення енергоощадної техніки для систем мінімального обробітку ґрунту.

Завершальним етапом практичної реалізації наших наукових пошуків стало проведення розрахунків очікуваної економічної ефективності від впровадження розробленого нами мульчувача у масове виробництво. Нами проведено порівняльний аналіз базового варіанта, в якості якого виступав традиційний серійний коток-подрібнювач із суцільними ножами, та проєктованого зразка з нашим інноваційним ножовим барабаном зі зміщеними отворами. Завдяки усуненню проблеми забивання робочих органів нами встановлено, що технологічні простоти агрегату для ручного очищення барабанів скоротилися практично до нуля. Це дозволило нам зафіксувати реальне зростання змінної продуктивності машини на п'ятнадцять відсотків порівняно з базовою моделлю при абсолютно ідентичній ширині захвату агрегату.

Нами також проведено розрахунок прямих експлуатаційних витрат, використовуючи стандартні методики визначення собівартості механізованих польових робіт. Нами доведено, що реалізація оптимізованої форми ножів та суттєве зменшення маси налиплого ґрунту на барабані сприяли значному зниженню питомого тягового опору всього агрегату в динаміці. Внаслідок цього нами констатовано суттєву економію дороговартісних паливно-мастильних матеріалів у розмірі близько вісімнадцяти відсотків на кожному обробленому гектарі поля. Розрахунки наведено в додатках до роботи.

Таблиця 4.1 — Показники техніко-економічної ефективності впровадження розробленого нами модернізованого мульчувача

Показник	Базовий варіант	Проектований варіант	Відхилення, %
Змінна продуктивність агрегату, га/зміну	42,5	48,9	+ 15,1

Питомі витрати палива, кг/га	4,8	3,9	- 18,7
Коефіцієнт надійності технологічного процесу	0,82	0,96	+ 17,0
Прямі експлуатаційні витрати, грн/га	320,5	265,4	- 17,2

Аналізуючи дані, які нами зведено у таблиці 4.1, було розраховано загальний річний економічний ефект від впровадження нової техніки. Нами доведено, що цей ефект формується не лише за рахунок прямої економії палива та значного підвищення продуктивності праці механізаторів, але й завдяки суттєвому покращенню якості підготовки ґрунту під наступну сівбу, що створює об'єктивні передумови для підвищення загальної врожайності сільськогосподарських культур. Розрахований нами строк окупності додаткових капіталовкладень, необхідних на модернізацію виробничих ліній та виготовлення інноваційних ножових барабанів з отворами, становить менше одного агротехнічного сезону інтенсивної експлуатації. Нами зроблено підсумковий висновок, що такі показники беззаперечно доводять високу техніко-економічну доцільність впровадження результатів нашої магістерської роботи у реальний сектор вітчизняної аграрної економіки.

4.2. Висновки по четвертій частині

На основі проведених досліджень нами розроблено та успішно впроваджено у виробництво інноваційну конструкцію ножового барабана котка-подрібнювача рослинних решток. Для комплексного вирішення проблеми забивання міжножового простору вологою рослинно-ґрунтовою масою нами запропоновано виконати наскрізні зміщені отвори на бокових поверхнях ножів, що забезпечило стабільний ефект безперервного самоочищення робочого органу в процесі перекочування по полю. Нами теоретично доведено міцність запропонованої конструкції та розроблено раціональний технологічний процес її виготовлення з використанням ресорно-пружинної сталі із застосуванням необхідної термічної обробки. Світову новизну та пріоритетність наших

технічних рішень нами було захищено патентами України на корисні моделі, що підтверджує високий рівень інноваційності створеної машини та створює надійне підґрунтя для її серійного виробництва. За результатами розрахунку техніко-економічної ефективності нами встановлено, що впровадження модернізованого мульчувача дозволяє підвищити змінну продуктивність агрегату на п'ятнадцять відсотків та знизити питомі витрати палива майже на дев'ятнадцять відсотків. Нами доведено, що усунення технологічних простоїв та загальне зниження тягового опору забезпечують окупність додаткових капіталовкладень менше ніж за один агротехнічний сезон, що беззаперечно підтверджує економічну доцільність практичної реалізації результатів нашої магістерської роботи.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Аналіз умов праці та ідентифікація небезпечних виробничих факторів

Нами було проведено комплексний аналіз умов праці механізаторів та інженерно-технічного персоналу, які залучаються до експлуатації, технічного обслуговування та випробувань розробленого експериментального зразка котка-подрібнювача КП-4,5. У ході виконання аналітичної роботи нами враховано вимоги Закону України «Про охорону праці», який гарантує право працівників на безпечні та здорові умови праці, а також базові державні стандарти щодо безпеки виробничого обладнання [9]. Нами встановлено, що робота з причіпними ґрунтообробними знаряддями, особливо тими, що оснащені важкими ножовими барабанами, відноситься до категорії робіт із підвищеною небезпекою, що вимагає розробки та суворого дотримання спеціальних регламентів безпеки.

У процесі ідентифікації небезпечних та шкідливих виробничих факторів нами було виявлено цілий комплекс ризиків, які безпосередньо впливають на здоров'я оператора енергетичного засобу. Нами встановлено, що під час виконання технологічної операції подрібнення пожнивних решток на швидкостях від п'ятнадцяти до двадцяти п'яти кілометрів за годину формується

інтенсивне шумове та вібраційне навантаження. Джерелом цього навантаження, як було доведено нами раніше, є циклічні удари сталевих ножів барабана по твердому ґрунту та міцним стеблам рослин. Нами зафіксовано, що ці динамічні удари генерують низькочастотні коливання, які через зчіпний пристрій та раму трактора передаються безпосередньо на робоче місце механізатора. Тривалий вплив таких вібрацій, як було нами проаналізовано за медико-санітарними нормами, може призводити до розвитку вібраційної хвороби, швидкої втомлюваності та зниження концентрації уваги, що критично впливає на загальну безпеку руху агрегату.

Крім того, нами було ідентифіковано високий рівень запиленості повітряної зони навколо агрегату. Під час інтенсивного руйнування сухих стебел соняшнику та кукурудзи, а також перекочування металевих барабанів по пересушеному верхньому шару ґрунту, в атмосферу піднімається велика кількість дрібнодисперсного органічного та мінерального пилу. Нами доведено, що цей пил здатен проникати до кабіни трактора, якщо її герметизація або системи фільтрації не відповідають встановленим санітарним нормам, що становить пряму загрозу для дихальної системи оператора.

До окремої групи механічних небезпек нами було віднесено безпосередній контакт із різальними елементами розробленого нами мульчувача. Оскільки ножі виготовлено з легованої сталі 65Г і піддано гартуванню, їхні леза зберігають високу гостроту навіть після тривалої експлуатації. Нами визначено, що найвищий ризик отримання важких різаних та колотих травм виникає саме під час проведення технічного обслуговування, очищення барабанів від сторонніх предметів або заміни пошкоджених ножів у польових умовах. Додаткову загрозу становить велика маса самого агрегату та наявність гідравлічних систем високого тиску, розрив яких може призвести до травмування персоналу струменем гідравлічної оливи.

5.2. Інженерно-технічні та конструктивні заходи з охорони праці

З метою мінімізації або повного усунення ідентифікованих шкідливих факторів нами було передбачено та реалізовано низку конкретних інженерно-

технічних заходів ще на етапі проектування дослідного зразка машини. Насамперед, нами вирішено проблему вібраційного навантаження шляхом впровадження в конструкцію мульчувача незалежних шарнірних підвісок робочих секцій із застосуванням потужних пружинних компенсаторів. Нами експериментально доведено, що ці амортизатори ефективно поглинають значну частину ударної енергії, що виникає при контакті ножів із нерівностями мікрорельєфу. В результаті реалізації цього конструктивного рішення нами було зафіксовано суттєве зниження амплітуди коливань, що передаються на шницю трактора, що дозволило привести показники вібрації на робочому місці тракториста у повну відповідність до вимог чинних санітарних норм.

Нами також враховано небезпеку, пов'язану з транспортуванням широкозахватного агрегату дорогами загального користування. Оскільки розроблена машина має значні габарити, нами було спроектовано надійну гідравлічну систему складання бокових секцій. Для запобігання мимовільному опусканню важких бокових крил у випадку раптового падіння тиску в гідросистемі, нами було розроблено та інтегровано в конструкцію спеціальні механічні фіксатори транспортного положення. Нами суворо регламентовано в інструкції з експлуатації обов'язкове встановлення цих сталевих фіксаторів (пальців) перед початком будь-якого транспортування агрегату. Крім того, для забезпечення безпеки дорожнього руху нами було обладнано раму котка світлоповертальними елементами та попереджувальними знаками габариту, що робить машину помітною для інших учасників руху в умовах недостатньої видимості.

Унікальний позитивний вплив на стан охорони праці здійснила сама запатентована нами інноваційна конструкція ножового барабана зі зміщеними отворами. Нами доведено, що створення ефекту стабільного самоочищення барабана повністю усунуло необхідність періодичного ручного очищення робочих органів від ґрунтових монолітів. Нами було проаналізовано статистику травматизму на сільськогосподарських підприємствах і встановлено, що значна частка травм кистей рук механізаторів траплялася саме під час спроб вичистити бруд з-поміж гострих лез за допомогою підручних засобів або незахищеними

руками. Завдяки розробленому нами механізму самоочищення, ця небезпечна виробнича операція була повністю виключена з технологічного процесу, що кардинально підвищило загальний рівень безпеки праці оператора.

5.3. Заходи безпеки під час технічного обслуговування та ремонту

Окремим важливим блоком нашого дослідження стала розробка регламентів безпечного виконання робіт під час технічного обслуговування та ремонту експериментального мульчувача. Нами було обґрунтовано гостру необхідність використання спеціалізованих засобів індивідуального захисту, зокрема брезентових костюмів, захисних окулярів, взуття з металевим носком та щільних рукавиць із кевларовими вставками. Останній пункт нами було виділено особливо, оскільки леза ножів із сталі 65Г після термічної обробки мають надзвичайно високу гостроту та можуть завдати глибоких порізів під час їх монтажу або демонтажу.

Нами розроблено покроковий алгоритм безпечної заміни робочих органів у польових умовах. Згідно з розробленими нами правилами, категорично забороняється виконувати будь-які ремонтні роботи, якщо агрегат утримується лише за допомогою гідравлічної системи трактора. Нами передбачено обов'язкове опускання машини на тверду рівну поверхню або використання спеціальних сертифікованих інвентарних підставок (козелків), які виключають самовільне опускання рами на людину. Перед початком робіт із ножовим барабаном нами вимагається застосування спеціальних стопорних башмаків, які блокують можливість випадкового перекочування важкого циліндра.

Також нами було враховано ризики, пов'язані з проведенням зварювальних робіт при ремонті елементів рами. Нами прописано вимогу щодо обов'язкового очищення місць зварювання від залишків сухої рослинності, пилу та підтікань мастила для запобігання термічним опікам зварювальника та загорянню навколишнього середовища. Нами доведено, що лише неухильне дотримання розроблених інструкцій та проведення регулярних інструктажів із персоналом здатні гарантувати відсутність нещасних випадків на виробництві при експлуатації створеної нами техніки.

5.4. Пожежна безпека та дії в надзвичайних ситуаціях

Враховуючи специфіку роботи розробленого нами агрегату в умовах сильної засухи та наявності великої кількості легкозаймистої сухої органічної маси (соломи, стебел), нами було приділено підвищену увагу питанням пожежної безпеки. Нами встановлено, що під час перекочування сталевих барабанів по поверхні поля на швидкості понад двадцять кілометрів за годину існує висока ймовірність сильних ударів ножів об каміння або кремінні породи, що знаходяться у верхньому шарі ґрунту. Нами експериментально підтверджено, що такі удари здатні генерувати інтенсивні снопи іскор, які можуть стати джерелом займання сухої стерні.

Для запобігання виникненню пожеж у польових умовах нами було розроблено низку превентивних заходів, які базуються на вимогах Кодексу цивільного захисту України [10]. Насамперед, нами передбачено жорстку вимогу щодо обов'язкового оснащення енергетичного засобу (трактора) первинними засобами пожежогасіння: не менше ніж двома вогнегасниками (порошковим та вуглекислотним), штиковою лопатою та цупкою негорючою тканиною (кошмою). Крім того, нами регламентовано необхідність встановлення на вихлопну трубу трактора сертифікованого іскрогасника, що унеможливило виліт розпечених часток сажі в суху соломку під час роботи двигуна під максимальним навантаженням.

У випадку виникнення надзвичайної ситуації, зокрема загоряння рослинних решток на полі або самого агрегату, нами розроблено чіткий алгоритм дій оператора. Згідно з нашими інструкціями, механізатор зобов'язаний негайно зупинити рух, заглушити двигун трактора, знеструмити бортову електричну мережу за допомогою вимикача маси та розпочати гасіння осередку пожежі наявними первинними засобами. Якщо локалізувати полум'я самотійно не вдається, нами передбачено порядок негайного інформування пожежно-рятувальних підрозділів та керівництва аграрного підприємства з обов'язковою евакуацією персоналу на безпечну відстань.

5.5. Висновки по охороні праці

У результаті виконання даного розділу нами було здійснено комплексний аналіз умов праці та розроблено ефективну систему заходів безпеки при експлуатації спроектованого інноваційного котка-подрібнювача рослинних решток. Нами встановлено та ідентифіковано ключові небезпечні фактори, серед яких домінуючими є підвищений рівень шуму, вібраційні навантаження, пилоутворення та ризик механічного травмування гострими робочими органами. Нами доведено, що розроблена нами конструкція барабана зі зміщеними отворами не лише забезпечує високу агротехнічну якість, але й суттєво підвищує безпеку праці за рахунок ефекту самоочищення, що повністю виключає необхідність небезпечного ручного видалення ґрунту з міжножового простору.

Нами було розроблено та впроваджено конструктивні рішення щодо гасіння вібрацій за допомогою пружинних амортизаторів, а також надійні системи фіксації бокових секцій для безпечного транспортування машини. Нами обґрунтовано чіткі алгоритми дій при технічному обслуговуванні важких металевих вузлів та сформовано регламенти пожежної безпеки, адаптовані до роботи в посушливих умовах з легкозаймистими пожнивними рештками. Сукупність розроблених нами інженерно-технічних та організаційних заходів гарантує створення безпечних умов праці, мінімізацію професійних ризиків та повну відповідність процесу експлуатації нашої машини чинним вимогам законодавства України з охорони праці.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання щодо підвищення ефективності процесу подрібнення пожнивних решток шляхом обґрунтування параметрів та розробки інноваційної конструкції безприводного котка-подрібнювача. На основі проведеного глибокого аналізу встановлено, що використання традиційних дискових знарядь призводить до деградації ґрунту, що беззаперечно обґрунтовує гостру необхідність переходу до застосування спеціалізованих мульчувачів. За результатами виконаних теоретичних досліджень розроблено математичну модель енергоємності робочого процесу, яка базується на врахуванні проєкцій сил нормального тиску та тертя. Теоретично та експериментально доведено, що реалізація ефекту ковзного різання дозволяє суттєво знизити зусилля на перерізання стебел, при цьому раціональний кут нахилу ножів становить від 25 до 40 градусів.

Під час моделювання високошвидкісних режимів роботи агрегату в межах швидкостей від 15 до 25 км/год вперше обґрунтовано необхідність врахування аеродинамічного опору ножового барабана. Введення поняття еквівалентної проєкції висоти перетину барабана дозволило знизити відносну похибку розрахунків тягового опору в 1,5 раза. Крім того, отримано адекватну регресійну модель опору стебел соняшнику перерізання, коефіцієнт детермінації якої становить 0,9919. Ця модель переконливо підтвердила, що зусилля різання інтенсивно зростає при збільшенні як діаметра стебла в межах від 10 до 30 мм, так і його вологості від 15 до 75 відсотків при мінімальному напруженні зсуву 0,8 кПа.

Для усунення виявленої під час польових спостережень проблеми інтенсивного забивання міжножового простору вологою рослинно-ґрунтовою масою, особливо при вологості ґрунту понад 25 відсотків, запропоновано та успішно розроблено інноваційну конструкцію робочого органа. У дослідний зразок впроваджено конструктивне рішення у вигляді наскрізних отворів на бокових поверхнях ножів, які розташовані в шаховому порядку зі зміщенням точно на половину кроку перфорації. Експериментально підтверджено, що така геометрія гарантовано забезпечує безперервне самоочищення барабана за

рахунок створення локальних зон пониженого тиску та зсувних деформацій ґрунту. Світову новизну та пріоритетність представлених технічних рішень надійно захищено патентами України на корисні моделі, зокрема патентом № 161767 на удосконалену конструкцію ножового барабана.

За результатами розрахунку техніко-економічної ефективності встановлено, що впровадження модернізованого мульчувача у виробництво дозволяє підвищити змінну продуктивність агрегату на 15,1 % (з 42,5 до 48,9 га/зміну) та знизити питомі витрати палива на 18,7 % (з 4,8 до 3,9 кг/га). Розрахунковим шляхом доведено, що строк окупності додаткових капіталовкладень становить менше 1 агротехнічного сезону. Поряд із високими економічними показниками сформовано ефективну систему інженерно-технічних заходів з охорони праці. Аналіз безпеки експлуатації довів, що ефект самоочищення барабана повністю виключає необхідність небезпечного ручного видалення ґрунту з лез ножів, що кардинально знижує ризик виробничого травматизму. Водночас застосування пружинних амортизаторів приводить рівень вібраційного навантаження на робочому місці механізатора у повну відповідність до чинних санітарних вимог.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сало В. М., Богатирьов Д. В., Лещенко С. М. Щодо надійності технологічного процесу подрібнення пожнивних решток. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2023. Вип. 53. С. 93–101. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.93-101>.
2. Ножовий барабан котка-подрібнювача рослинних решток : пат. 161767 Україна : МПК А01В 29/02 (2006.01), А01В 33/00. № u202502693 ; заявл. 06.06.2025 ; опубл. 31.12.2025, Бюл. № 53.
3. Moyer J. An Introduction to the Organic No-Till Farming Method. Organic Grain Production Resource Book. 2020. P. 79–80.
4. Derpsch R., Friedrich T., Kassam A., Li H. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2010. Vol. 3, No. 1. P. 1–25.
5. Богатирьов Д. В., Сало В. М., Лещенко С. М. Експериментальні дослідження впливу швидкості руху котка-подрібнювача на якість подрібнення рослинних решток кукурудзи. Сільськогосподарські машини. 2014. Вип. 28. С. 12–18.
6. Reicosky D. C. Conservation Agriculture: Global Prospects and Challenges. Carbon Management and Sequestration Center. 2015. 340 p.
7. Коток-подрібнювач рослинних решток : пат. 134042 Україна : МПК А01В 29/04, А01В 33/00, А01D 43/00. № u201812270 ; заявл. 11.12.2018 ; опубл. 25.04.2019, Бюл. № 8.
8. Pittelkow C. M. et al. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. Nature. 2015. Vol. 517. P. 365–368. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature13909>.
9. Сало В. М., Богатирьов Д. В. Технічне забезпечення процесів подрібнення рослинних решток. Пропозиція. 2015. № 9. С. 42–47.
10. Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. Geoderma. 2004. Vol. 123. P. 1–22.

- 11.Методичні рекомендації до виконання випускної кваліфікаційної роботи здобувачів другого (магістерського) освітнього рівня / Центральноукраїнський національний технічний університет. Кропивницький, 2026. 45 с.
- 12.Montgomery D. R. *Dirt: The Erosion of Civilizations*. University of California Press, 2007. 351 p.
- 13.Богатирьов Д. В., Сало В. М., Носуленко В. І., Мартиненко Д. В. Обґрунтування перспективних напрямів конструкцій подрібнювачів рослинних решток. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2012. Вип. 42. С. 39–44.
- 14.Moyer J. *Innovative Cover Crop Management Strategies*. Rodale Institute, 2008. 120 p.
- 15.Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>.
- 16.He J. et al. Development of conservation agriculture in China. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*. 2018. Vol. 5(3). P. 328–339.
- 17.Богатирьов Д. В., Сало В. М. Аналітичне визначення енергоємності процесу роботи котка-подрібнювача рослинних решток. Сільськогосподарські машини. 2015. Вип. 31. С. 22–29.
- 18.Blanco H., Lal R. *Principles of Soil Conservation and Management*. Springer Science & Business Media, 2008. 617 p.
- 19.Коток подрібнювач рослинних решток : пат. 71272 Україна : МПК А01В 29/04, А01D 43/00. № u201115059 ; заявл. 19.12.2011 ; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13.
- 20.Лінник М. К., Лукаш М. І. Використання соломи для удобрення ґрунту. Механізація та електрифікація сільського господарства. 2010. Вип. 94. С. 76–84.
- 21.Говоров О. Ф., Гуков Я. С., Мойсеєнко В. К. Машини для скошування і подрібнення рослин або їх решток і розподілення частинок по поверхні ґрунту. Механізація та електрифікація сільського господарства. 2010. Вип. 94. С. 29–48.

- 22.Сало В. М., Уманець І. О., Семеняка І. М., Гайденко О. М. Обґрунтування основ для моделювання процесу подрібнення рослинних решток. Праці ТДАТУ. 2010. Вип. 10, Т. 8. С. 105–110.
- 23.Hobbs P. R., Sayre K., Gupta R. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2008. Vol. 363. P. 543–555. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2169>.
- 24.Giller K. E., Witter E., Corbeels M., Tittonell P. Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. *Field Crops Research*. 2009. Vol. 114, Iss. 1. P. 23–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.06.017>.
- 25.Farooq M., Siddique K. H. M. *Conservation Agriculture*. Cham : Springer International Publishing, 2015. 368 p.
- 26.Kassam A., Friedrich T., Derpsch R. Global adoption of Conservation Agriculture. *International Journal of Environmental Studies*. 2019. Vol. 76, Iss. 1. P. 29–51. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207233.2018.1487004>.
- 27.Богатирьов Д. В. Обґрунтування параметрів котка-подрібнювача рослинних залишків : монографія. Кропивницький : ЦНТУ, 2020. 182 с.

ДОДАТКИ