

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

ПАНЬКІВ МАРІЯ РОМАНІВНА

УДК 631.356.2

**МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ПРОЦЕСІВ РОБОТИ КОМБІНОВАНИХ ОЧИСНИХ СИСТЕМ
КОРЕНЕЗБИРАЛЬНИХ МАШИН**

05.05.11 – машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Тернопіль – 2025

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України, м. Тернопіль.

Науковий

консультант:

доктор технічних наук, професор
Підгурський Микола Іванович,
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя,
професор кафедри інжинірингу
машинобудівних технологій.

Опоненти:

академік НААН України,
доктор технічних наук, професор
Булгаков Володимир Михайлович,
Національний університет біоресурсів і
природокористування України,
завідувач кафедри механіки;

доктор технічних наук, професор
Козаченко Олексій Васильович,
Державний біотехнологічний університет,
професор кафедри сільськогосподарських
машин та інженерії тваринництва;

доктор технічних наук, професор
Мироненко Валентин Григорович,
Інститут механіки та автоматики
агропромислового виробництва Національної
академії аграрних наук України,
завідувач відділу агронавігації та автоматизації
мобільних процесів

Захист відбудеться “13” березня 2025 року о “11” годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 58.052.02 в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, аудиторія 79.

З дисертаційною роботою можна ознайомитись у бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

М.Я. Сташків

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Запропонована концепція переходу до стійкого ефективного післявоєнного відновлення та розвитку промисловості України передбачає впровадження стратегічних підходів до нарощування та збільшення виробництва різнопланової продукції у сфері агропромислового сектора, в тому числі крупних коренеплодів – цукрових і кормових буряків, коренеплодів цикорію (у подальшому – коренеплоди).

Коренеплоди є цінними технічними культурами, а їх сировинна переробка забезпечує отримання харчових (цукор, спирт, соковиті корми для тваринництва, інулін для галузі медицини) й технічних (відновлювальні джерела енергії – біопаливо) продуктів, а гичка, після її розкидання та заробляння в ґрунт, є одним із видів органічних добрив.

Досягнення цілей, які затверджено на державному рівні, можливе шляхом розроблення та впровадження в рослинну галузь сільського господарства ефективних технологій виробництва та прогресивних технічних засобів збирання коренеплодів, які забезпечують основні показники агротехнічних вимог.

Застосування сучасних самохідних бункерних коренезбиральних комбайнів в Україні, які побудовані за блочно-модульним принципом, є рентабельним за умови сезонного наробітку на мінімальній площі 300 га і більше.

Тому в умовах господарювання багатогалузевих фермерських аграрних підприємств, які вирощують коренеплоди на незначних площах, актуальною техніко-економічною проблемою є окупність технічно складних і занадто дорогих коренезбиральних машин у зв'язку зі специфікою виконання робіт – обмеженими кліматичними термінами їх застосування протягом року (близько одного календарного місяця) та на незначних площах – до 20...50 га.

Застосування існуючих причіпних 3-х, 4-х рядних коренезбиральних машин не дозволяє отримувати необхідних показників якості збирання коренеплодів у різних ґрунтово-кліматичних умовах роботи, які характерні для України в період біологічної стиглості коренеплодів – загальна кількість домішок у зібраних коренеплодах значно перевищує встановлену межу згідно з агротехнічними вимогами й досягає в деяких випадках до 20% і більше, у тому числі вільних рослинних домішок – до 10...12%, а налиплого ґрунту на коренеплодах – до 3...5%. При цьому, незважаючи на доволі значні габаритні розміри очисників, разом з зібраним урожаєм з поля безповоротно вивозиться значна частина орного шару ґрунту, що завдає непоправної шкоди родючості ґрунтів.

Зниження вмісту загальних ґрунтових і рослинних домішок у сировинних коренеплодах на 0,5...1,5% зменшує загальні витрати їх переробки в середньому від 10 до 15%, а зниження налиплого ґрунту на 0,5...0,8% зменшує витрати на його відокремлення (відмивання, зскрібання тощо) в середньому від 8 до 12%. При цьому значно підвищується вихід кінцевого продукту переробки вищої якості в середньому на 10...20%.

Для вирішення науково-технічної проблеми підвищення показників якості збирання крупних коренеплодів у складних умовах роботи коренезбиральних машин прийнято наукову гіпотезу, реалізація якої забезпечить інтенсифікацію процесу відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів шляхом розроблення конструктивно-технологічної схеми та оптимізації параметрів робочих органів очисних транспортно-технологічних модулів (ОТТМ) причіпних машин.

Вирішення зазначеного напрямку є подальшим кроком удосконалення методології, методів розроблення та оптимізації параметрів процесів роботи транспортно-технологічних систем коренезбиральних машини як у фундаментальному (розроблення математичних моделей), так і практичному (упровадження в виробництво) плані, що забезпечує розвиток аграрної науки як на теоретичному, так і емпіричному рівні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя відповідно до державних науково-технічних проектів «Механіко-технологічне обґрунтування розроблення адаптованих коренезбиральних машин» (№ держ. реєстрації 0113U000254) і «Розробка та комплексне дослідження синтезованих транспортно-технологічних механізмів виробничих систем» (№ держ. реєстрації 0117U003998).

Результати наукових досліджень, які отримано в дисертаційній роботі, є наслідком часткового вирішення поставлених фундаментально-прикладних завдань згідно з цільовими державними науково-технічними програмами наукових робіт та експериментальних розробок «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в промисловості, енергетиці та агропромисловому комплексі на 2006-2010 роки», «Програма діяльності КМУ «Україна-2020», яку затверджено МОН України у 2015р. та «Питання Міністерства розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства», затверджені постановою Кабінету Міністрів України від 2019 р.

Мета і завдання дослідження. Метою є підвищення технологічної ефективності збирання крупних коренеплодів шляхом розроблення та оптимізації параметрів процесів роботи очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин.

Завдання дослідження – розроблення науково-технічної концепції для вирішення актуальної проблеми впровадження новітніх ефективних процесів збирання крупних коренеплодів шляхом математичного моделювання та аналітично-емпіричних методів оптимізації параметрів робочих органів очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин у різних ґрунтово-кліматичних умовах збирання.

Вирішення даної проблеми зведено до розв'язку таких фундаментально-прикладних завдань:

1. Проаналізувати сучасні технології збирання крупних коренеплодів, конструктивно-технологічні особливості очисних транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин і методологію моделювання технологічних процесів складних технічних систем.

2. На основі аналізу запропонувати структурні схеми, наукову концепцію та методику розроблення механіко-технологічної моделі інтенсифікації функціонального процесу відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів і проведення дослідження очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин.

3. Розробити математичні моделі, які функціонально описують процес надходження складових структурних компонентів домішок і коренеплодів до робочих органів очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин.

4. На аналітичному рівні дослідити функціональний процес поетапного відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів робочими поверхнями очисних транспортно-технологічних модулів шляхом розроблення детермінованих математичних моделей та оптимізації параметрів робочих органів.

5. Встановити функціональну закономірність кінематично-динамічних процесів переміщення домішок і коренеплодів від завантажувального транспортера або гвинтового конвеєра до очисної гірки та від очисної гірки до системи очисних шнеків.

6. Теоретично обґрунтувати процес контактної взаємодії коренеплодів і домішок з рифом очисного шнека та пружними очисними елементами гвинтового конвеєра або приводного вала на основі розроблення математичних моделей і оптимізації конструктивно-кінематичних параметрів робочих органів очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин.

7. Розробити програму та методику проведення експериментальних досліджень для проведення перевірки адекватності розроблених теоретичних математичних моделей у лабораторних і польових умовах шляхом порівняння та аналізу з отриманими емпіричними моделями.

8. Провести порівняльні польові дослідження показників якості роботи базової та удосконаленої коренезбиральної машини та визначити економічну ефективність її застосування у виробничих умовах.

Об'єкт дослідження: технологічний процес відокремлення домішок від коренеплодів, схеми компоновок і робочі органи очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин.

Предмет дослідження: технологічні, конструктивно-кінематичні параметри та їх взаємний вплив на показники якості роботи очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження проведено на основі математичного та фізичного моделювання технологічного процесу переміщення структурних компонентів домішок і коренеплодів робочими поверхнями очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин і методів вирішення інтегрально-диференціальних рівнянь з використанням основних положень аналітичної механіки, теорії машин і механізмів, теорії пружності та математики.

Експериментальні дослідження макетних зразків очисних транспортно-технологічних модулів у складі коренезбиральних машин і порівняльні дослідження показників якості базової та удосконаленої коренезбиральних машин проведено в польових умовах шляхом реалізації основних положень методології математичного планування та методів проведення факторних планованих експериментів.

Теоретичні розрахунки, статистичну обробку експериментальних даних і графічне відтворення результатів досліджень відбувалося шляхом застосування прикладних програм для персонального комп'ютера.

Наукова новизна отриманих результатів. За результатами проведених досліджень визначено комплексні наукові засади основних напрямків підвищення ефективності збирання крупних коренеплодів у різних ґрунтово-кліматичних умовах шляхом інтенсифікації процесів відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів й пріоритетні новітні концептуальні принципи розроблення та оптимізації конструктивно-кінематичних параметрів робочих органів очисних транспортно-технологічних модулів на стадії технічного проектування.

На основі проведеного комплексу наукових досліджень:

- уперше запропоновано наукову концепцію, методи побудови та розроблення структури механіко-технологічних моделей, які описують процеси інтенсифікації відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів робочими органами очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин;

- уперше отримано математичну модель процесу переміщення коренеплодів і домішок робочими поверхнями очисного транспортно-технологічного модуля з урахуванням транспортного запізнення руху вороху, яку записано в параметричній формі;

- розроблено детерміновані математичні моделі, які описують функціональний процес зміни поетапного відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів залежно від умов роботи й забезпечують подальший розвиток аналітичних критеріїв вибору раціональних параметрів робочих органів очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин;

- уточнено аналітичні залежності, які описують функціональний характер переміщення коренеплодів і структурних компонентів домішок з похилого транспортера до робочої гілки очисної гірки залежно від параметрів робочих органів і розмірно-масових характеристик коренеплодів і домішок;

- уточнено емпіричні моделі, які визначають коефіцієнти поетапної сепарації загальних домішок окремих ділянок похилого транспортера, що дозволило провести оптимізацію основних параметрів похилого транспортера комбінованих очисних систем коренезбиральних машин;

- набули подальшого розвитку аналітичні моделі динамічної взаємодії коренеплодів і домішок з робочими поверхнями шнеків і пружними елементами приводного вала комбінованої очисної системи з урахуванням характеру переміщення коренеплодів робочою гілкою очисної гірки;

- набули подальшого розвитку емпіричні моделі дальності польоту коренеплодів, які описують процес їх переміщення з похилого транспортера до очисної гірки, що дозволило обґрунтувати параметри раціонального конструктивного розміщення похилого транспортера та очисної гірки;

- набули подальшого розвитку емпіричні моделі, які описують функціональний характер зміни загальних домішок, маси налиплого ґрунту на коренеплодах, пошкодження коренеплодів, що дозволило прогнозувати й визначати кількісні показники якості роботи комбінованих очисних систем коренезбиральних машин.

Практична значущість отриманих результатів. Розроблено та експериментально обґрунтовано удосконалені конструкції очисних транспортно-технологічних модулів, застосування яких у складі коренезбиральних машин у виробничих умовах дозволило підвищити технологічну ефективність або показники якості збирання крупних коренеплодів.

Встановлено, що кількість загальних домішок із застосуванням ОТТМ порівняно з базовою машиною зменшується в 1,9 раза (4,6% проти 8,7% у базової) під час збирання кормових буряків, у 1,2 раза (5,0% проти 5,9% у базової) під час збирання цукрових буряків і в 1,2 раза (6,1% проти 6,9% у базової) під час збирання цикорію, при цьому загальні домішки у зібраних коренеплодах зменшилися у середньому в 1,4 раза, у тому числі: вільні ґрунтові домішки – у середньому в 1,7 раза; налиплий ґрунт на поверхні тіла коренеплодів – у середньому в 1,5 раза.

Обґрунтовано та запропоновано технічні рекомендації з вибору раціональних параметрів процесу відокремлення домішок від коренеплодів і робочих органів ОТТМ коренезбиральних машин залежно від умов їх роботи.

Конструктивна новизна технічних рішень захищена 18 патентами України на корисні моделі. Результати досліджень упроваджено у: Львівській філії Державної наукової установи «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки та технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого» (Львівська обл., с. Магерів), де відбувалися порівняльні польові дослідження коренезбиральної машини з ОТТМ і базової машини; компанії ПАП «Агропродсервіс» (Тернопільська обл., с. Настасів) – ОТТМ застосовується в технологічній лінії приготування кормів; в Хмельницькій державній сільськогосподарській дослідній станції інституту кормів та сільського господарства Поділля Національної академії аграрних наук України (с. Самчики, Хмельницька обл.).

Часткові результати дисертаційної роботи упроваджено в навчальну програму дисципліни «Сільськогосподарські машини: конструкції та розрахунок»: будова, принцип роботи та теоретичні основи розрахунку основних параметрів робочих органів очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин застосовано під час виконання студентами практичних і лабораторних робіт на кафедрі технічної механіки та сільськогосподарських машини Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя для підготовки спеціалістів освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні та експериментальні дослідження за темою дисертації виконано здобувачем самостійно, постановку завдань, аналіз і трактування отриманих результатів – спільно з науковим консультантом.

Результати роботи викладено одноосібно автором у 11 друкованих працях [10, 21, 23, 40-46, 49, 50]. У публікаціях, що виконані у співавторстві, дисертантові належить наступне: наведено структурний і технологічний аналіз роботи очисників вороху [1, 27, 30, 55]; розроблено математичну модель секундної подачі складових компонентів домішок і коренеплодів копачами коренезбиральних машин [2, 3, 13, 28, 29, 36, 37]; наведено аналіз технологій викопування коренеплодів [4]; розроблено математичну модель поетапного відокремлення компонентів домішок від коренеплодів [5]; наведено методику розрахунку подачі втрат зрізаної гички до очисних систем коренезбиральних машин [6]; запропоновано методику проведення лабораторних і експериментальних польових і порівняльних досліджень [7, 14, 16, 22, 24, 26, 31, 51]; розроблено рівняння регресії загальних домішок, налиплого ґрунту на коренеплодах, пошкодження коренеплодів, показників якості [8, 9, 32-35]; запропоновано концепцію розроблення очисних систем коренезбиральних машин [12, 18, 20]; розроблено модель скочування коренеплоду з очисної гірки до системи шнеків [11]; розроблено математичну модель процесу взаємодії коренеплодів з витком шнека [15]; розроблено математичну модель технологічного процесу інтенсифікації відокремлення домішок від коренеплодів [17]; запропоновано алгоритм розроблення комбінованих очисних систем коренезбиральних машин [18]; наведено структурний аналіз властивостей крупних коренеплодів і гички [19, 38]; описано метод розміщення очисних елементів на шнеку [25]; отримано результати експериментів з визначення енергетичних показників процесу роботи очисної системи [39]; розроблено залежність для визначення сили зскрібання налиплого ґрунту з коренеплоду [46]; розроблено модель переміщення коренеплоду скребком транспортера [44, 48]; розроблено модель технічної системи [52-54]; запропоновано конструктивну схему комбінованих очисників [56-72].

У наукових працях, які опубліковано у співавторстві, особистий внесок здобувача складає 65-75 %. В технічних рішеннях частка всіх авторів однакова.

Апробація роботи. Результати отриманих досліджень доповідалися та отримали позитивну оцінку на: VI, X Міжн. наук.-техн. конф. «Крамаровські читання» з нагоди 116-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віцепрезидента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (м. Київ, НУБіП України, 2019 р., 2023 р.); Міжн. наук.-практ. конф. присвяченої 90-річчю від дня народження професора Рибак Тимотія Івановича та 60-річчю кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин (м. Тернопіль, ТНТУ ім. І. Пулюя, 2022 р.); XXI Міжн. наук. конф. «Сучасні проблеми землеробської механіки» присвяченій 121 річниці з дня народження акад. П.М. Василенка (м. Харків, ХНТУСГ, 2020 р.); XI, XII Міжн. науково-практичній конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (м. Кропивницький, ЦНТУ, 2017, 2019 р.); Simpozionului Științific Internațional «Realizări și perspective în ingineria agrară și transport auto», dedicat aniversării a 85 de ani de la fondarea Universității Agrare de Stat din Moldova (Chișinău, UASM, 2018); Міжн. наук.-техн. конф. до 100-річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя (100-річчя з дня смерті) (м. Тернопіль, ТНТУ ім. І. Пулюя, 2018 р.); Міжн. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів (м. Тернопіль, ТНТУ ім. І. Пулюя, 2017 р.); XVII Міжн. наук. конф. «Сучасні проблеми землеробської механіки» присвяченій 116 річниці з дня народження акад. П.М. Василенка (м. Кам'янець-Подільський, ПДАТУ, 2016 р.); XVI Міжн. наук. конф. «Сучасні проблеми землеробської механіки» присвяченій 116 річниці з дня народження акад. П.М. Василенка (м. Суми, СНАУ, 2016 р.); V Всеукраїнській наук.-практ. конф.

«Інноваційні технології в АПК» (м. Луцьк, ЛНТУ, 2015 р.); V Міжн. практ. конф. «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації с-г техніки» (м. Кіровоград, 2013 р.); XIII Міжн. наук. конф. «Сучасні проблеми землеробської механіки» присвяченій 113 річниці з дня народження акад. П.М. Василенка (м. Вінниця, ВНАУ, 2012 р.); XV наук.-практ. конф. ТНТУ (м. Тернопіль, ТНТУ ім. І. Пулюя, 2012 р.); наук. конф. «Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті» (м. Тернопіль, ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011 р.).

У повному обсязі результати наукових дисертаційних досліджень доповідалися на: розширеному фаховому семінарі кафедри інжинірингу машинобудівних технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, ТНТУ ім. І. Пулюя, 2024 р.); розширеному засіданні відділу механіко-технологічних проблем овочівництва Інституту механіки та автоматизації агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України (с-ще Глеваха, Фастівський р-н, Київська обл., 2024 р.).

Публікації. Основні результати наукових досліджень за темою дисертації опубліковано в 72 наукових працях, із них – 5 статей у рецензованих періодичних виданнях, цитованих у наукометричній базі Scopus, 3 монографії – у співавторстві, 26 статей – у фахових виданнях України, 3 статті – в закордонному рецензованому виданні країни ОЕСР, 2 статті – у періодичних виданнях інших зарубіжних країн, 15 тез наукових конференцій, 18 патентів України на корисні моделі.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, семи розділів, загальних висновків і рекомендацій, списку використаної літератури із 340 найменувань і 93 додатків. Основні результати роботи викладено на 345 сторінках, де міститься 132 рисунки і 18 таблиць. Загальний обсяг роботи становить 503 с.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Аналіз конструктивно-технологічних і методологічних основ функціонування комбінованих очисних систем коренезбиральних машин» розкрито суть і стан наукової проблеми та сучасні тенденції удосконалення технологічних процесів збирання крупних коренеплодів і робочих органів комбінованих очисних систем. Проаналізовано алгоритми розроблення технологічних процесів і оптимізації параметрів робочих органів очисників вороху.

Ефективність переробки сировини та якість вихідної продукції (цукор, корм, біопаливо тощо) значною мірою залежить від якості умовно «чистих» коренеплодів, які надходять на переробні виробничі комплекси. При цьому якість «чистих» коренеплодів прямо залежить від ступеня очищення викопаного вороху, або якості технологічного процесу відокремлення домішок від коренеплодів робочими органами очисного модуля коренезбиральних машин.

При цьому технологічна ефективність процесу збирання коренеплодів, або показники якості відокремлення домішок від коренеплодів, залежать від агротехнологічних і кліматичних умов збирання – фізичного стану ґрунту, забур'яненості посівів, агробіологічних і агрофізичних характеристик коренеплодів, конструкції робочих органів очисних систем, технологічних параметрів процесу збирання основного масиву гички, викопування коренеплодів і параметрів робочих органів транспортно-очисних систем тощо.

Дослідження, які регламентують розробку наукових концепцій, алгоритмів і процесів побудови, функціонування та сфери застосування очисних базових транспортно-технологічних систем збиральних машин розглянуто в наукових працях В. Адамчука, В. Барановського, В. Булгакова, А. Василенка, П. Василенка, М. Волохи, Д. Войтюка, Б. Гевка, Р. Гевка, І. Головача, О. Козаченка, В. Мартинова, В. Мироненка, М. Підгурського, Л. Погорілого, В. Полупанова, Р. Рогатинського, М. Татянка, В. Теслюка, П. Шабельника, М. Хелемендика та інших вчених.

Враховуючи специфічні особливості, притаманні функціональним процесам збирання крупних коренеплодів, необхідно зазначити основні наслідкові причини, які не дозволяють у повному обсязі та з достатньою достовірністю кінцевого результату використати відомі методики для розроблення та оптимізації параметрів робочих органів транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин:

1. Розроблені математичні моделі, які описують функціональні процеси сепарації, або відокремлення домішок (грунтових і рослинних) є одноетапними, або узагальнюючими. На їх основі розгляд процесу відокремлення домішок від коренеплодів розглядається в контексті одноразового та одночасного протікання процесу на всьому шляху переміщення компонентів коренеплодів і домішок поверхнями одного робочого органу очисної системи загалом. Це значно звужує математичний опис процесу сепарації домішок і недостатньо описує реальну візуалізацію об'єкта дослідження.

2. Існуючі методологічні основи проектування та розроблення робочих органів транспортно-технологічних систем, у тому числі й очисних систем коренезбиральних машин, не повною мірою враховують специфічні особливості їх функціонування, а існуючі математичні моделі не достатньо якісно описують процеси відокремлення у часі різно-структурованих компонентів домішок від крупних коренеплодів.

Зважаючи на викладене, наукова проблема, яка потребує застосування кардинальних шляхів для її вирішення, сформульована таким чином: підвищення показників якості збирання великорозмірних коренеплодів можливе за рахунок подальшого застосування удосконаленої методології проектування та розроблення структурних схем базових транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин і математичних моделей для оптимізації параметрів удосконалених робочих органів очисних систем, що є окремою науковою проблемою.

Для ефективного вирішення цієї проблеми, висунуто робочу гіпотезу, яка передбачає підвищення технологічної ефективності роботи коренезбиральних машин шляхом застосування технологічно-конструктивних прийомів і засобів інтенсифікації процесів відокремлення різно-структурованих компонентів домішок від коренеплодів за рахунок застосування нових підходів до розроблення та оптимізації параметрів робочих органів ОТТМ коренезбиральних машин.

У другому розділі «Концептуальні аспекти розробки моделей і проведення досліджень транспортно-очисних модулів коренезбиральних машин» обґрунтовано принципи розроблення наукової концепції математичного моделювання процесу роботи очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин; наведено алгоритм розроблення механіко-технологічної моделі та проведення досліджень очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин; розкрито технологічні передумови розроблення механіко-технологічних моделей робочих процесів комбінованих модулів очищення коренеплодів.

У галузі аграрної інженерії фундаментальну наукову методологію механіко-математичного моделювання складних динамічних технічних систем започатковано вченими І. Артоболевським, П. Василенком, В. Горячкіним, А. Лур'є, В. Желіговським, яка розвинена на сучасному рівні вченими В. Адамчуком, А. Бабієм, Я. Гуковим, В. Дубровіним, В. Ковбасою, В. Кравчуком, А. Кушнар'овим, О. Ляшуком, В. Мироненком, М. Нагірним, А. Панченком, Т. Рибакком, Р. Рогатинським, Г. Хайлісом та багатьма зарубіжними вченими.

Вагомий внесок у подальший розвиток методів математичного моделювання при розробленні та дослідженні транспортно-технологічних систем коренезбиральної техніки для галузі буряківництва внесено вченими В. Барановським, Б. Гевком, Р. Гевком, І. Головачем, О. Гурченком, А. Завгороднім, О. Козаченком, М. Підгурським, Л. Погорілим, М. Хелемендиком, П. Шабельником та іншими.

У наукових працях автори запропонували наукові гіпотези підвищення технологічної ефективності коренезбиральних машин та виклали алгоритми розроблення конструктивно-технологічних схем транспортно-технологічних систем.

Формалізована сутність, або гіпотетичний процес розроблення формальної технічної системи *МФТС* (рис. 1), є результатом реалізації поставленої мети, або критеріїв оптимізації, які було сформульовано на основі взаємодії з тим формалізованим середовищем, яке формалізує технічну систему *ТС* та формує функціональну систему-модель *ФС-М*.

Алгоритм розроблення механіко-технологічної моделі ОТТМ (рис. 2) тісно пов'язаний зі складністю очищення вороху, який

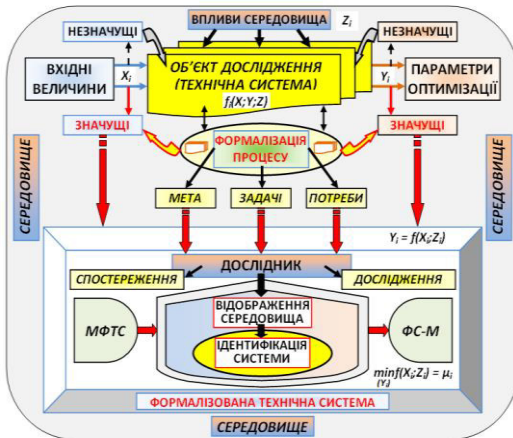


Рис. 1. Схема процесу розроблення технічної системи

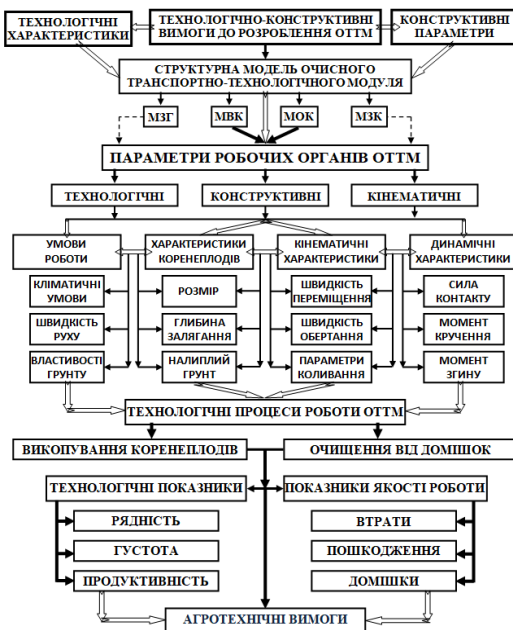


Рис. 2. Алгоритм розроблення механіко-технологічної моделі ОТТМ

Враховуючи характеристики та характер протікання технологічного процесу очищення вороху від домішок, можна констатувати, що процес конструктивного розроблення механіко-технологічної моделі ОТТМ, в основу якого покладено інтенсифікацію функціонального процесу відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів, проілюстровано блок-схемами, які наведено на рис. 5.

В основу розроблення механіко-технологічної моделі ОТТМ покладено метод і принцип моделювання на основі динамічного програмування Р. Беллмана з застосуванням багата стадійної оптимізації за методом академіка Л. Погорілого з доповненням етапу транспортного запізнення переміщення вороху очисними робочими поверхнями.

пов'язаний зі складністю очищення вороху, який викопується копачами із ґрунтово-коренеплідного середовища, а якість очищення коренеплодів від структурних компонентів домішок функціонально пов'язана з необхідністю значного відокремлення ґрунтових і рослинних домішок, які різні за своїми фізико-механічними характеристиками (подача домішок складає 4...8 кг/п.м) та перебувають у вільному відносно коренеплодів (сипкий ґрунт, дрібні 20...50 мм та крупні до 100 мм грудки ґрунту, втрачена гичка) і зв'язаному (налиплий ґрунт і залишки гички на коренеплодах) станах.

Процес проведення наукових досліджень механіко-технологічної моделі ОТТМ наведено на блок-схемі (рис. 3).

Для реалізації процесу інтенсифікації очищення вороху на рівні винаходів запропонували схеми ОТТМ, які поєднують у собі послідовність конструктивного розміщення N -х очисних робочих органів і послідовність виконання технологічних постадійних n -х операцій процесу відокремлення домішок від коренеплодів у різних умовах роботи коренезбиральних машин.

Базовими вузлами ОТТМ (рис. 4а та 4б) є: похилий транспортер 1; очисна гірка 2; комбінований робочий орган 3, який виконано у вигляді послідовно встановлених шнеків 9 та розміщеного над ними горизонтального очисного вала 6, на барабані 11, уздовж якого по гвинтових лініях закріплено очисні пружні елементи 12.

Основними базовими вузлами ОТТМ (рис. 4в) є: комбінований робочий орган 1; очисна гірка 2; комбінований робочий орган 3, конструкція якого аналогічна конструкції комбінованого робочого органу 3, рис. 5. При цьому очисні шнеки 9 можуть бути виготовлені як круглого перерізу, так і еліпсної форми.

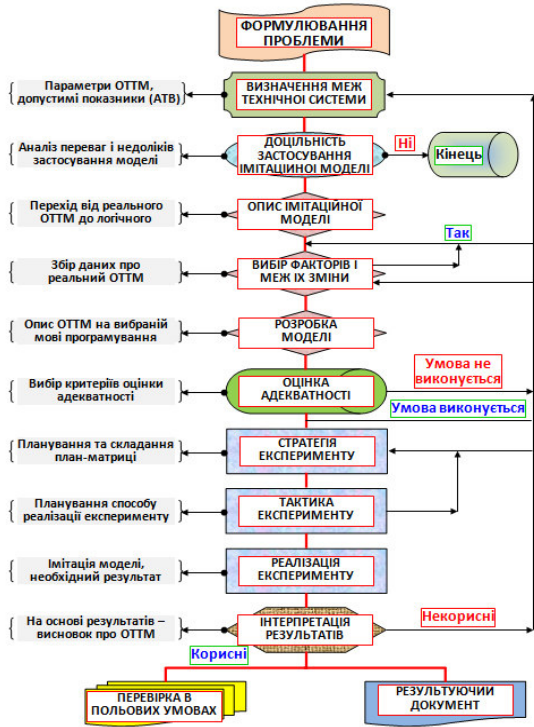


Рис. 3. Блок-схема етапів проведення наукових досліджень ОТТМ

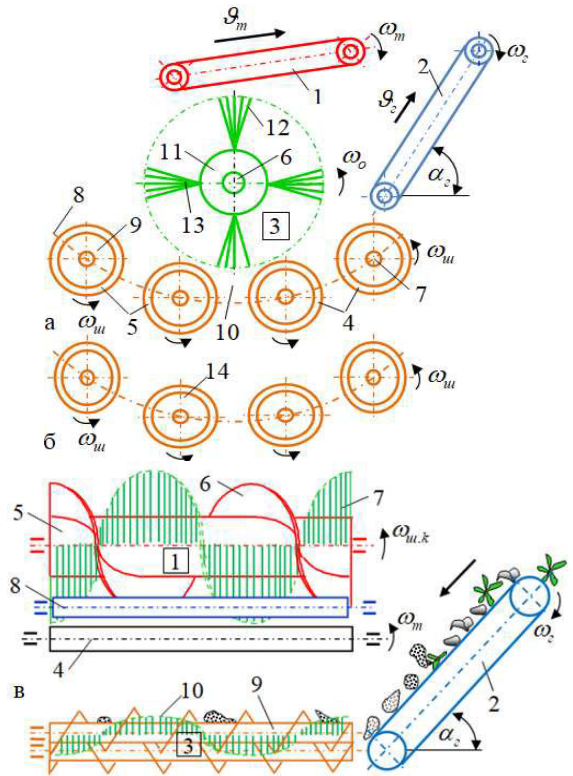


Рис. 4. Структурно-конструктивні схеми ОТТМ

На схемі рис. 5 позначено: МВК – модуль викопування коренеплодів; ГС – ґрунтове середовище; СВ – середовище вороху; K – коренеплоди; $D_1^{(0)}$, $D_2^{(1)}$; $D_2^{(2)}$ – початковий стан; заданий оптимум стану [об'єкта]; $A_1^{(0)}$, $A_2^{(0)}$, $A_i^{(0)}$ – структурні параметри процесу викопування коренеплодів; $B_1^{(1)}$, $B_2^{(1)}$, $B_i^{(1)}$ – структурні параметри процесу сепарації домішок попереднім модулем; $x_1^{(2)}$, $x_2^{(2)}$, $x_i^{(2)}$ – структурні параметри процесу очищення коренеплодів від домішок робочими органами ОТТМ; $M_{0e}^{(0)}$, $M_{0d}^{(0)}$, $M_{0k}^{(0)}$ – маса вороху, маса домішок і маса коренеплодів, які подаються до попереднього модуля; $M_{1e}^{(1)}$, $M_{1d}^{(1)}$ – маса вороху та маса домішок, які подаються на робочі органи ОТТМ; $M_{20}^{(2)}$ – вихідна (задана) маса домішок; μ_1 , μ_2 – коефіцієнти сепарації домішок; t_2 , t_{21} – загальний час переміщення домішок робочими органами ОТТМ та робочим органом 1 на стадії 1; τ – час транспортного запізнення руху коренеплодів і складових компонентів домішок.

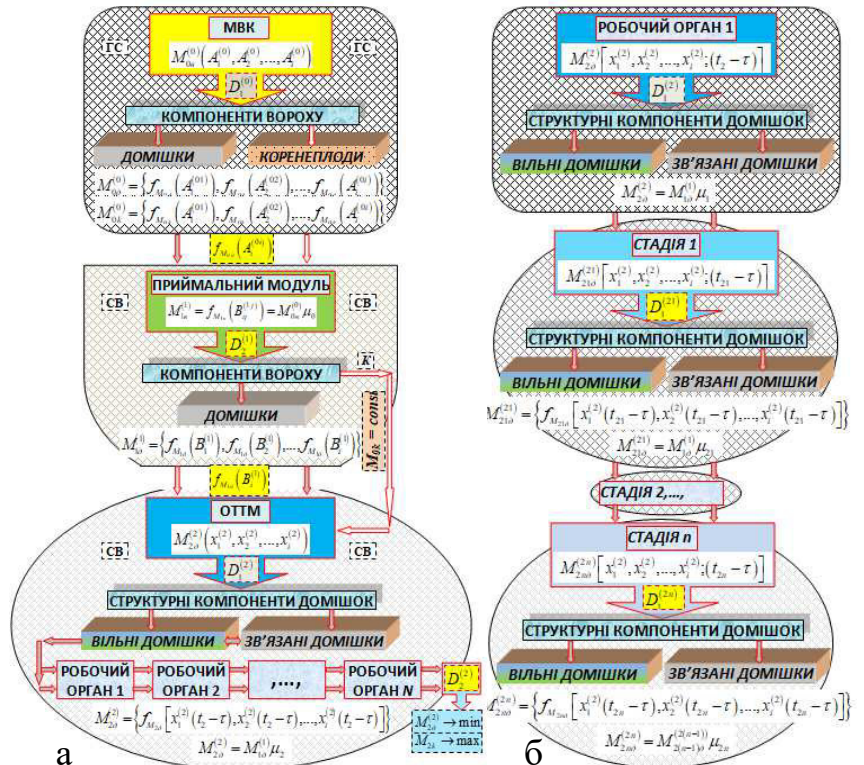


Рис. 5. Блок-схема розроблення механіко-технологічної моделі: а – процесу відокремлення домішок від коренеплодів; б – поетапного (поетапного) процесу відокремлення домішок від коренеплодів одним робочим органом ОТТМ

При цьому, ефективність роботи ОТТМ коренезбиральних машини кардинально залежить від технологічних аспектів роботи транспортно-технологічних модулів, які виконують попередні операції збирання основного масиву гички та викопування коренеплодів (рис. 6).

Якщо формалізувати процес та, що налиплий ґрунт 7 (рис. 6) на коренеплодах 1, які залягають у ґрунтовому середовищі 6, умовно перевести у розряд вільних ґрунтових домішок, тоді можна стверджувати, що подача вороху з одного рядка $d\Pi_{1B}(t)/dt$ за час t переміщення машини буде складатися з теоретично-розрахункової сумарної подачі викопаних «чистих» коренеплодів $d\Pi_{1ЧК}(t)/dt$ і домішок $d\Pi_{1Д}(t)/dt$, які є сумарною подачею окремих структурних компонентів: $d\Pi_{1Г}(t)/dt$ – ґрунтових домішок; $d\Pi_{1Р}(t)/dt$ – рослинних домішок, тобто

$$\sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{Bi}(t)/dt = \sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{ЧКi}(t)/dt + \sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{Гi}(t)/dt + \sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{Pi}(t)/dt, \quad (1)$$

де N_k – кількість викопаних рядків коренеплодів, шт.

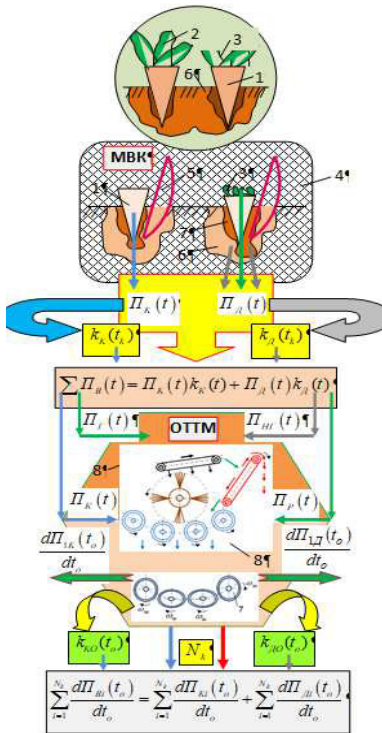


Рис. 6. Схема подачі вороху до ОТТМ:
1 – коренеплід;
2, 3 – гичка та її залишки; 4 – МВК;
5 – копач; 6 – ґрунтове середовище;
7 – налиплий ґрунт;
8 – ОТТМ

Виразимо сумарну теоретичну подачу $\sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{ЧКi}(t)/dt$ чистих коренеплодів з N_k -х рядків, які залягають у навколоплідному ґрунтовому середовищі до їх викопування через подачу сумарної біологічної маси всіх чистих коренеплодів $\sum_{j=1}^{q_k} m_{iЧКj}(t)/dt$ ($j = 1, 2, \dots, q_k$, де j – кількість коренеплодів, які розташовані в кожному окремому 1-му, 2-му, ..., N_k -му рядку, тобто

або після вираження маси чистих коренеплодів через розмірні параметри та урожайність коренеплодів:

$$\frac{d\Pi_{ЧК}}{dt} = \frac{2\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_k^2 \lambda_g N_k \left(\frac{D_k}{2\sin(0,5\varphi_k)} - h_k \right); \quad \frac{d\Pi_{ЧК}}{dt} = B_k \vartheta_M b_M \lambda_g N_k, \quad (3)$$

де $d\Pi_{ЧК}/dt$ – секундна подача чистих коренеплодів, кг/с; ρ_k – питома маса коренеплоду, кг/м³; $q_k^{(1)}$ – кількість коренеплодів, які викопуються, шт.; h_k – довжина коренеплоду, м; λ_g – коефіцієнт втрат коренеплодів; D_k , φ_k – діаметр (м) і кут (град.) конуса росту коренеплоду; B_k – урожайність коренеплодів, кг/м²; ϑ_M – швидкість руху машини, м/с; b_M – ширина міжрядь, м.

Приймаємо, що коренеплоди викопуються одностороннім сферичним диском, розташованим під кутом атаки γ_o (град.) до поздовжньої осі рядка коренеплодів і враховуючи залежність (1), отримано рівняння для визначення сумарної секундної подачі домішок $d\Pi_{Д}/dt$ до похилого транспортера 1 (рис. 4а) або горизонтального транспортера 4 (рис. 4в), при цьому:

- залежно від геометричних розмірів диска та коренеплодів

$$\frac{d\Pi_{Д}}{dt} = \frac{2\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_k^2 (1 - \lambda_{ок}) N_k \left(\frac{D_k}{2\sin(0,5\varphi_k)} - h_k \right) + \frac{a_g}{t} \rho_k \lambda_{ок} N_k \left[\frac{D_o^2 \sin \gamma_o}{4} \arccos(2h_o / D_o) - \frac{h_o D_o}{2} \right]; \quad (4)$$

$$- \frac{2\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_n^2 N_k \left(\frac{d_k}{2\sin(0,5\varphi_k)} - h_n \right) + 2 \frac{da_g}{dt} \lambda_p N_k \sin \gamma_o \sqrt{h_o (D_o - h_o)} B_p (\mu + \eta)$$

- залежно від біологічної урожайності коренеплодів і гички

$$\frac{d\Pi_B}{dt} = B_k \frac{da_g}{dt} b_m (1 - \lambda_{ek}) N_k + \frac{a_g}{t} \rho_z \lambda_{ez} N_k \left[\frac{D_o^2 \sin \gamma_o}{4} \arccos(2h_o / D_o) - \frac{h_o D_o}{2} \right] -$$

$$- B_k \frac{da_g}{dt} b_m N_k K_{m_n/m_k} + 2 \frac{da_g}{dt} \lambda_p N_k \sin \gamma_o \sqrt{h_o (D_o - h_o)} B_z (\mu + \eta)$$

де D_o , h_o – діаметр і глибина ходу диска, м; ρ_z – питома маса ґрунту, кг/м³; B_z , μ – урожайність і коефіцієнт втрати гички, кг/м²; η – коефіцієнт залишків гички на коренеплодах; h_n , d_k – висота конуса підземної частини та діаметр коренеплоду на рівні поверхні ґрунту коренеплоду, a_g – шлях, який проходить коренезбиральна машина за 1 с, м; $K_{m_n/m_k} = m_n / m_k$ – коефіцієнт, який враховує відношення маси m_n підземної частини коренеплоду до загальної маси m_k коренеплоду; λ_{ez} – коефіцієнт, який враховує втрати ґрунту; λ_p – коефіцієнт, який враховує втрати гички.

На основі аналізу графічних побудов (згідно з залежністю (4) та (5), рис. 7) встановлено, що сумарна секундна подача чистих коренеплодів $d\Pi_{чк} / dt$ до робочого органу 1 (рис. 7б) з 6 рядків знаходиться в межах від 2,5 кг/с до 20,6 кг/с за зміни коефіцієнта втрат коренеплодів λ_{ek} від 0,5 до 2,5%. При цьому, за зміни діаметра коренеплодів у межах $D_k \pm 0,02$ (м) сумарна секундна подача чистих коренеплодів $d\Pi_{чк} / dt$, відповідно, змінюється у межах $\pm(1,2 \dots 3,7)$ кг/с, а за зміни урожайності коренеплодів у межах $B_k \pm 0,5$ (кг/м²), або $B_k \pm 5$ (ц/га) – відповідно, змінюється в межах $\pm(1,4 \dots 2,6)$ кг/с.

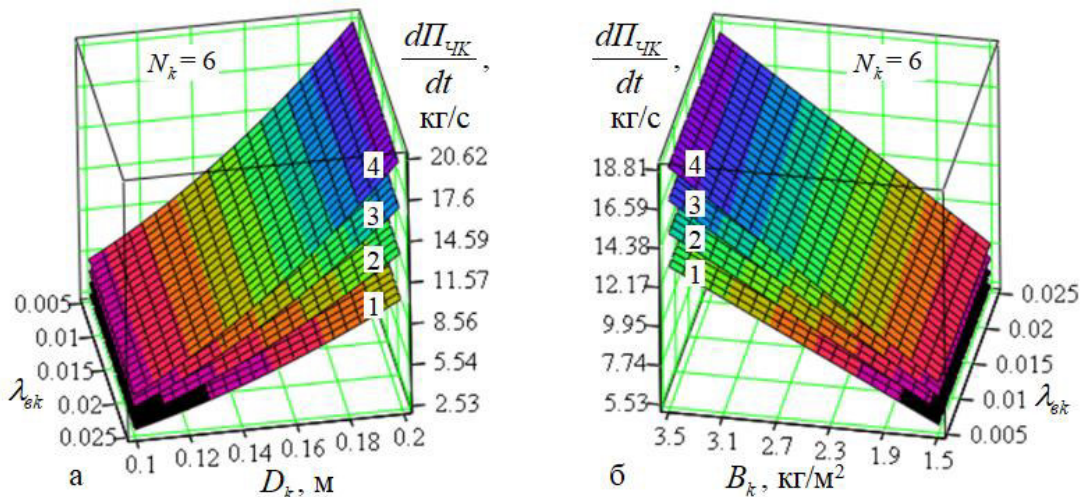


Рис. 7. Залежність зміни сумарної подачі чистих коренеплодів:

а – $d\Pi_{чк} / dt = f_{II}(\lambda_{ek}, D_k)$, 1, 2, 3, 4 – $h_k = 0,15; 0,2; 0,25; 0,3$ м;

б – $d\Pi_{чк} / dt = f_{II}(B_k, \lambda_{ek})$, 1, 2, 3, 4 – $g_M = 1,4; 1,6; 1,8; 2,0$ м/с

На основі аналізу (рис. 8) встановлено, що розрахункова теоретична секундна подача домішок до робочого органу 1, або похилого транспортера ОТТМ знаходиться в межах: від 5,8 до 59,4 кг/с залежно від зміни геометричних параметрів сферичного диска та розмірних параметрів коренеплодів; від 4,5 до 59,6 кг/с залежно від зміни біологічної урожайності коренеплодів і гички.

За зміни поступальної швидкості руху da_g / dt коренезбиральної машини від 1,6 до 2,0 м/с секундна подача домішок до робочого органу 1, або похилого транспортера ОТТМ збільшується приблизно в 1,4...3,1 рази, а відношення секундної подачі коренеплодів і секундної подачі домішок становить 1 : 3, або в середньому відсотковому співвідношенні – 30% : 70%.

Розроблені математичні моделі (4) і (5) є початковими вихідними умовами для подальшої теоретичної оптимізації конструктивно-кінематичних параметрів робочих органів ОТТМ, наприклад, на основі аналізу необхідної теоретичної розрахункової продуктивності робочих органів ОТТМ тощо.

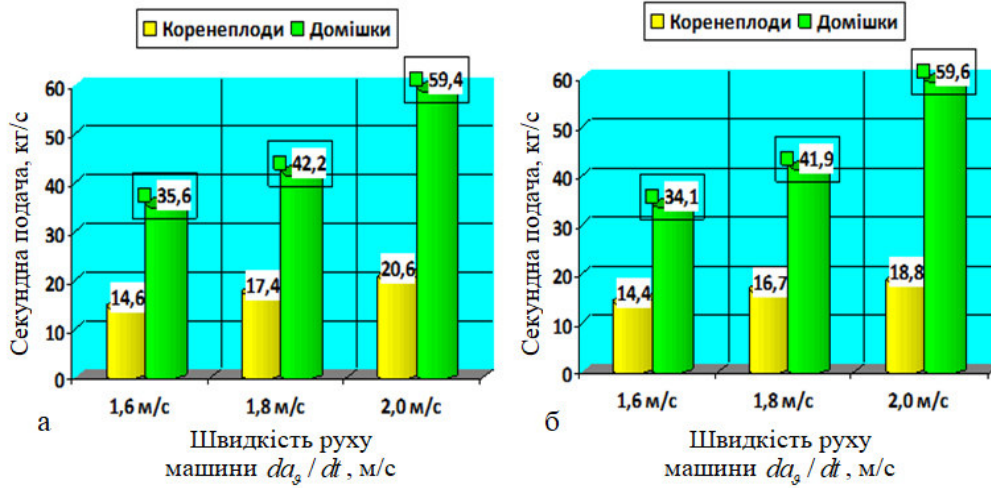


Рис. 8. Діаграма секундної подачі: чистих коренеплодів залежно від розмірів (а) та урожайності (б) коренеплодів; домішок залежно від розмірів коренеплодів і параметрів диска (а) та урожайності коренеплодів і гички (б)

У третьому розділі «Теоретичне моделювання функціонального процесу роботи очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин» розроблено математичні моделі функціонального процесу поетапного відокремлення структурних компонентів домішок робочими органами очисних транспортно-технологічних модулів, переміщення вороху похилим транспортером і подальше його переміщення до очисної гірки.

У розділі описано метод розроблення математичної моделі, яка функціонально описує поетапний процес відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів залежно від часу їх знаходження на кожній k -й ділянці кожного j -го робочого органу ОТТМ коренезбиральних машин.

За основу для розроблення аналітичної математичної моделі поетапного відокремлення домішок від коренеплодів розглянуто процес відокремлення i -их компонентів домішок від коренеплодів, які надходять на поверхні робочих органів ОТТМ, узагальнена схема якого наведена на рис. 9.

Вважаємо, що ОТТМ складається з $j = 1, 2, \dots, n$ очисних робочих органів: перший (похилий транспортер 1), другий (очисна гірка 2), ..., n -й очисний робочий орган (права та ліва система шнеків 6 і 7, очисний вал 5), або j -х етапів очищення.

Нехай до ОТТМ, який має j -і робочі органи (рис. 9) з робочих органів МВК надходить загальна масова кількість вороху $\sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{Bi}(t)/dt$. Поділимо загальну довжину очисної поверхні кожного j -го робочого органу ОТТМ на $q = 1, 2, \dots, k$ ділянок та припустимо, що маса чистих коренеплодів на всіх q -х ділянках кожного j -го робочого органу залишається постійною $dm_k(t)/dt = dm_k^{(nk)}(t_{nk})/dt_{nk} = const$, або у процесі очищення вороху втрати коренеплодів відсутні.

Також для подальшого аналізу функціонального процесу відокремлення структурних компонентів домішок введемо поняття «транспортного запізнення» часу $t + \tau$ пересування домішок очисними поверхнями робочих органів ОТТМ, де τ – час запізнення руху домішок.

Позначимо загальну масову кількість відокремлених домішок як ґрунтового, так і рослинного походження одним окремим j -м робочим органом ОТТМ через $\sum_{i=1}^2 dm_{i.e.o}^{(j)}(t_j + \tau_j)/d(t_j + \tau_j)$, де $t_j + \tau_j$ – загальний час знаходження компонентів вороху на окремому j -му робочому органу ОТТМ, або час реалізації процесу очищення, s ; верхній у дужках індекс (j) відповідає позначенню номера конкретного очисного робочого органу від 1 до n .

Тоді можна записати, що

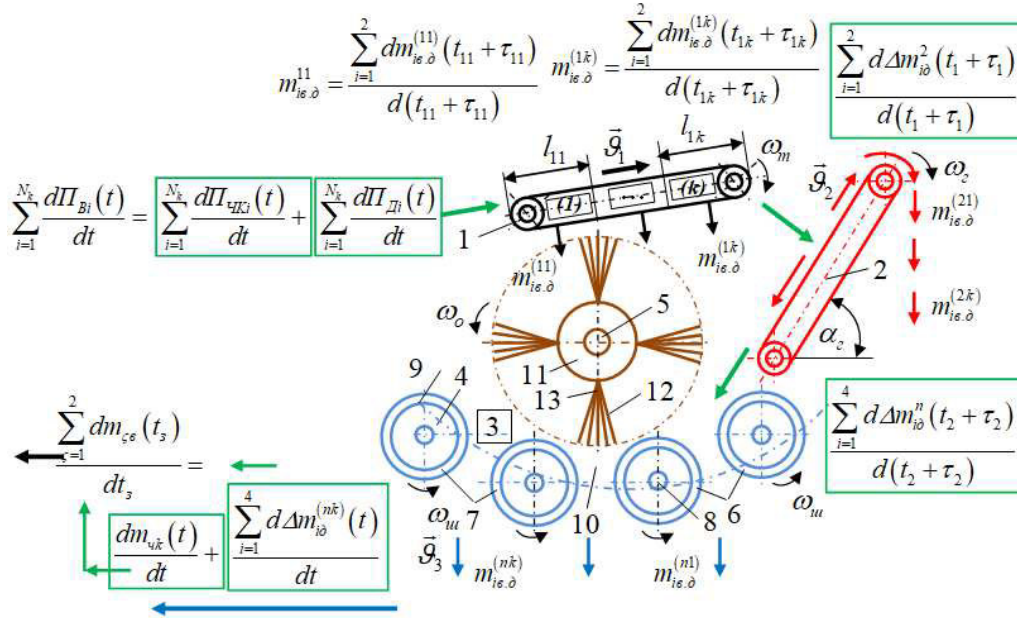


Рис. 9. Схема моделі для розрахунку поетапного відокремлення домішок від коренеплодів робочими органами ОТТМ: 1 – похилий транспортер; 2 – очисна гірка; 3 – комбінований робочий орган; 4 – очисні шнеки; 5 – очисний вал; 6, 7 – права та ліва система; 8 – вал шнека; 9 – нижня вітка еліпса; 10 – жолоб робочого русла; 11 – барабан; 12 – пружні очисні елементи; 13 – пучки ворсу

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^2 \frac{dm_{is,\delta}^{(1)}(t_1 + \tau_1)}{d(t_1 + \tau_1)} &= \sum_{i=1}^2 \frac{dm_{e,z}^{(1)}(t_1 + \tau_1)}{d(t_1 + \tau_1)} + \sum_{i=1}^2 \frac{dm_{e,p}^{(1)}(t_1 + \tau_1)}{d(t_1 + \tau_1)} = \\
 &= \frac{dm_{e,ez}^{(1)}(t_1 + \tau_1)}{d(t_1 + \tau_1)} + \frac{dm_{e,ep}^{(1)}(t_1 + \tau_1)}{d(t_1 + \tau_1)} + \frac{dm_{e,nz}^{(1)}(t_1 + \tau_1)}{d(t_1 + \tau_1)} + \frac{dm_{e,ze}^{(1)}(t_1 + \tau_1)}{d(t_1 + \tau_1)}; \\
 \sum_{i=1}^2 \frac{dm_{is,\delta}^{(2)}(t_2 + \tau_2)}{d(t_2 + \tau_2)} &= \sum_{i=1}^2 \frac{dm_{e,z}^{(2)}(t_2 + \tau_2)}{d(t_2 + \tau_2)} + \sum_{i=1}^2 \frac{dm_{e,p}^{(2)}(t_2 + \tau_2)}{d(t_2 + \tau_2)} = \\
 &= \frac{dm_{e,ez}^{(2)}(t_2 + \tau_2)}{d(t_2 + \tau_2)} + \frac{dm_{ep}^{(2)}(t_2 + \tau_2)}{d(t_2 + \tau_2)} + \frac{dm_{2nz}^{(2)}(t_2 + \tau_2)}{d(t_2 + \tau_2)} + \frac{dm_{e,ze}^{(2)}(t_2 + \tau_2)}{d(t_2 + \tau_2)}; \\
 &\dots\dots\dots; \\
 \sum_{i=1}^2 \frac{dm_{is,\delta}^{(n)}(t_n + \tau_n)}{d(t_n + \tau_n)} &= \sum_{i=1}^2 \frac{dm_{e,z}^{(n)}(t_n + \tau_n)}{d(t_n + \tau_n)} + \sum_{i=1}^2 \frac{dm_{e,p}^{(n)}(t_n + \tau_n)}{d(t_n + \tau_n)} = \\
 &= \frac{dm_{e,ez}^{(n)}(t_n + \tau_n)}{d(t_n + \tau_n)} + \frac{dm_{e,ep}^{(n)}(t_n + \tau_n)}{d(t_n + \tau_n)} + \frac{dm_{e,nz}^{(n)}(t_n + \tau_n)}{d(t_n + \tau_n)} + \frac{dm_{e,ze}^{(n)}(t_n + \tau_n)}{d(t_n + \tau_n)}, \quad (6)
 \end{aligned}$$

де $m_{e,z}^{(1)}, m_{e,z}^{(2)}, \dots, m_{e,z}^{(n)}$, $m_{e,p}^{(1)}, m_{e,p}^{(2)}, \dots, m_{e,p}^{(n)}$; $m_{e,ez}^{(1)}, m_{e,ez}^{(2)}, \dots, m_{e,ez}^{(n)}$, $m_{e,ep}^{(1)}, m_{e,ep}^{(2)}, \dots, m_{e,ep}^{(n)}$; $m_{e,nz}^{(1)}, m_{e,nz}^{(2)}, \dots, m_{e,nz}^{(n)}$, $m_{e,ze}^{(1)}, m_{e,ze}^{(2)}, \dots, m_{e,ze}^{(n)}$; $(t_1 + \tau_1), (t_2 + \tau_2), \dots, (t_n + \tau_n)$ – відповідно, маса відокремлених: ґрунтових і рослинних домішок; вільних ґрунтових і рослинних домішок; налиплого ґрунту на коренеплодах і залишків гички на головках коренеплодів; загальний час знаходження компонентів вороху на 1, 2, ..., n-му робочому органі ОТТМ.

На кожній q-й ділянці похилого транспортера 1 за рахунок просіювання домішок через зазори між прутками відокремлюються тільки два компоненти вільних домішок (вільний ґрунт і вільні рослинні домішки) загальною масовою кількістю, яку

позначимо через $m_{e,\delta}^{(1q)} = \sum_{i=1}^2 dm_{is,\delta}^{(1q)}(t_{1q} + \tau_{1q}) / d(t_{1q} + \tau_{1q})$, де $q = 1, 2, \dots, k$.

Тоді загальна кількість відокремлених компонентів вільних домішок похилим транспортером 1 ОТТМ (рис. 3.1), які відокремлюються кожною q -ю ділянкою похилого транспортера з урахуванням першого рівняння (6) буде становити

$$\sum_{i=1}^2 \frac{dm_{ie,d}^{(i)}(t_1 + \tau_1)}{d(t_1 + \tau_1)} = \frac{dm_{6,6z}^{(11)}(t_{11} + \tau_{11})}{d(t_{11} + \tau_{11})} + \frac{dm_{6,6z}^{(12)}(t_{12} - \tau_{12})}{d(t_{12} - \tau_{12})} + \dots + \frac{dm_{6,6z}^{(1k)}(t_{1k} + \tau_{1k})}{d(t_{1k} + \tau_{1k})} + \frac{dm_{6,ep}^{(11)}(t_{11} + \tau_{11})}{d(t_{11} + \tau_{11})} + \frac{dm_{6,ep}^{(12)}(t_{12} + \tau_{12})}{d(t_{12} + \tau_{12})} + \dots + \frac{dm_{6,ep}^{(1k)}(t_{1k} + \tau_{1k})}{d(t_{1k} + \tau_{1k})}, \quad (7)$$

а загальна масова кількість структурних компонентів домішок, які надходять, наприклад, на робочу поверхню першої (I_2) ділянки очисної гірки 2 (рис. 9), яку позначимо через $\sum_{i=1}^2 dm_{io}^{(2)}(t_1 + \tau_1) / d(t_1 + \tau_1)$, дорівнює різниці загальної масової кількості

структурних компонентів домішок $\sum_{i=1}^2 dm_{io}^{(1)}(t + \tau) / d(t + \tau)$ і $\sum_{i=1}^2 dm_{ie,d}^{(1)}(t_1 + \tau_1) / d(t_1 + \tau_1)$, яка, відповідно, надходить на похилий транспортер і яка відокремилася від коренеплідів кожною q -ю ділянкою похилого транспортера ОТТМ, яку позначимо через $\sum_{i=1}^2 d\Delta m_{io}^{(2)}(t_1 + \tau_1) / d(t_1 + \tau_1)$, тобто

$$\sum_{i=1}^2 \frac{dm_{io}^{(2)}(t_1 + \tau_1)}{d(t_1 + \tau_1)} = \sum_{i=1}^2 \frac{dm_{io}^{(1)}(t + \tau)}{d(t + \tau)} - \sum_{i=1}^2 \frac{dm_{ie,d}^{(1)}(t_1 + \tau_1)}{d(t_1 + \tau_1)} = \sum_{i=1}^2 \frac{d\Delta m_{io}^{(2)}(t_1 + \tau_1)}{d(t_1 + \tau_1)}. \quad (8)$$

Відповідно до аналогії запису (7), отримаємо:

- для очисної гірки 2

$$\sum_{i=1}^2 \frac{dm_{ie,d}^{(2)}(t_2 + \tau_2)}{d(t_2 + \tau_2)} = \frac{dm_{6,6z}^{(21)}(t_{21} + \tau_{21})}{d(t_{21} + \tau_{21})} + \frac{dm_{6,6z}^{(22)}(t_{22} + \tau_{22})}{d(t_{22} + \tau_{22})} + \dots + \frac{dm_{6,6z}^{(2k)}(t_{2k} + \tau_{2k})}{d(t_{2k} + \tau_{2k})} + \frac{dm_{6,ep}^{(21)}(t_{21} + \tau_{21})}{d(t_{21} + \tau_{21})} + \frac{dm_{6,ep}^{(22)}(t_{22} + \tau_{22})}{d(t_{22} + \tau_{22})} + \dots + \frac{dm_{6,ep}^{(2k)}(t_{2k} + \tau_{2k})}{d(t_{2k} + \tau_{2k})}; \quad (9)$$

- для першої (I_3) ділянки правої 6 та лівої 7 системи шнеків

$$\sum_{i=1}^2 \frac{dm_{io}^{(n)}(t_{n-1} + \tau_{n-1})}{d(t_{n-1} + \tau_{n-1})} = \sum_{i=1}^2 \frac{dm_{io}^{(2)}(t_1 + \tau_1)}{d(t_1 + \tau_1)} - \sum_{i=1}^2 \frac{dm_{ie,d}^{(2)}(t_2 + \tau_2)}{d(t_2 + \tau_2)} - \dots - \sum_{i=1}^2 \frac{dm_{ie,d}^{(n)}(t_{n-1} + \tau_{n-1})}{d(t_{n-1} + \tau_{n-1})} = \sum_{i=1}^2 \frac{d\Delta m_{io}^{(n)}(t_{n-1} + \tau_{n-1})}{d(t_{n-1} + \tau_{n-1})}; \quad (10)$$

- для системи шнеків і пружних очисних елементів 12 очисного вала 5 комбінованого очисника 3

$$\sum_{i=1}^2 \frac{dm_{ie,d}^{(n)}(t_n + \tau_n)}{d(t_n + \tau_n)} = \frac{dm_{6,6z}^{(n1)}(t_{n1} + \tau_{n1})}{d(t_{n1} + \tau_{n1})} + \frac{dm_{6,6z}^{(n2)}(t_{n2} + \tau_{n2})}{d(t_{n2} + \tau_{n2})} + \dots + \frac{dm_{6,6z}^{(nk)}(t_{nk} + \tau_{nk})}{d(t_{nk} + \tau_{nk})} + \frac{dm_{6,ep}^{(n1)}(t_{n1} + \tau_{n1})}{d(t_{n1} + \tau_{n1})} + \frac{dm_{6,ep}^{(n2)}(t_{n2} + \tau_{n2})}{d(t_{n2} + \tau_{n2})} + \dots + \frac{dm_{6,ep}^{(nk)}(t_{nk} + \tau_{nk})}{d(t_{nk} + \tau_{nk})} + \frac{dm_{6,nz}^{(n1)}(t_{n1} + \tau_{n1})}{d(t_{n1} + \tau_{n1})} + \frac{dm_{6,nz}^{(n2)}(t_{n2} + \tau_{n2})}{d(t_{n2} + \tau_{n2})} + \dots + \frac{dm_{6,nz}^{(nk)}(t_{nk} + \tau_{nk})}{d(t_{nk} + \tau_{nk})} + \frac{dm_{6,3z}^{(n1)}(t_{n1} + \tau_{n1})}{d(t_{n1} + \tau_{n1})} + \frac{dm_{6,3z}^{(n2)}(t_{n2} + \tau_{n2})}{d(t_{n2} + \tau_{n2})} + \dots + \frac{dm_{6,3z}^{(nk)}(t_{nk} + \tau_{nk})}{d(t_{nk} + \tau_{nk})}. \quad (11)$$

Відповідно, загальна масова кількість вороху, який буде надходити на наступні транспортно-технологічні системи коренезбиральної машини, дорівнює

$$\sum_{i=1}^2 \frac{dm_{ie3}(t_3)}{t_3} = \frac{dm_{\kappa}(t)}{dt} + \sum_{i=1}^2 \frac{dm_{io}(t_3)}{t_3} = \frac{dm_{\kappa}(t)}{dt} + \sum_{i=1}^2 \frac{dm_{io}(t_3)}{t_3} - \sum_{i=1}^2 \frac{d\Delta m_{ie}(t_3)}{t_3}; \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^2 \frac{dm_{ie3}(t_3)}{t_3} = \frac{dm_{\kappa}(t)}{dt} + \sum_{i=1}^2 \frac{dm_{io}(t)}{dt} - \left(\sum_{i=1}^2 \frac{dm_{ie,d}^{(1)}(t_1 + \tau_1)}{d(t_1 + \tau_1)} + \sum_{i=1}^3 \frac{dm_{ie,d}^{(2)}(t_2 + \tau_2)}{d(t_2 + \tau_2)} + \dots + \sum_{i=1}^4 \frac{dm_{ie,d}^{(n)}(t_n + \tau_n)}{d(t_n + \tau_n)} \right). \quad (13)$$

Виразимо: третю складову правої частини диференціального рівняння (13), або сумарну масову кількість відокремлених домішок через масову кількість відокремленого кожного структурного компонента домішок кожною q -ю ділянкою кожного j -го робочого органу ОТТМ; час t_{jq} знаходження структурних компонентів домішок на кожній q -й ділянці кожного j -го робочого органу через довжину кожної q -ї ділянки l_{jq} та швидкість переміщення \mathcal{G}_j структурних компонентів домішок по кожному j -му робочому органу, де $t_{jq} = l_{jq} / \mathcal{G}_{jq}$.

При цьому отримаємо

$$\sum_{i=1}^2 \frac{dm_{i\text{вз}}(t_3)}{dt_3} = \frac{dm_{\kappa}(t)}{dt} + \sum_{i=1}^2 \frac{dm_{i\text{од}}(t)}{dt} -$$

$$\left[\begin{aligned} & \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(11)}\left(\frac{l_{11}}{\mathcal{G}_1} + \tau_{11}\right)}{d\left(\frac{l_{11}}{\mathcal{G}_1} + \tau_{11}\right)} + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(12)}\left(\frac{l_{12}}{\mathcal{G}_1} + \tau_{12}\right)}{d\left(\frac{l_{12}}{\mathcal{G}_1} + \tau_{12}\right)} + \dots + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(1k)}\left(\frac{l_{1k}}{\mathcal{G}_1} + \tau_{1k}\right)}{d\left(\frac{l_{1k}}{\mathcal{G}_1} + \tau_{1k}\right)} + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(11)}\left(\frac{l_{11}}{\mathcal{G}_1} + \tau_{11}\right)}{d\left(\frac{l_{11}}{\mathcal{G}_1} + \tau_{11}\right)} + \\ & + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(12)}\left(\frac{l_{12}}{\mathcal{G}_1} + \tau_{12}\right)}{d\left(\frac{l_{12}}{\mathcal{G}_1} + \tau_{12}\right)} + \dots + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(1k)}\left(\frac{l_{1k}}{\mathcal{G}_1} + \tau_{1k}\right)}{d\left(\frac{l_{1k}}{\mathcal{G}_1} + \tau_{1k}\right)} + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(21)}\left(\frac{l_{21}}{\mathcal{G}_2} + \tau_{21}\right)}{d\left(\frac{l_{21}}{\mathcal{G}_2} + \tau_{21}\right)} + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(22)}\left(\frac{l_{22}}{\mathcal{G}_2} + \tau_{22}\right)}{d\left(\frac{l_{22}}{\mathcal{G}_2} + \tau_{22}\right)} + \\ & + \dots + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(2k)}\left(\frac{l_{2k}}{\mathcal{G}_2} + \tau_{2k}\right)}{d\left(\frac{l_{2k}}{\mathcal{G}_2} + \tau_{2k}\right)} + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(21)}\left(\frac{l_{21}}{\mathcal{G}_2} + \tau_{21}\right)}{d\left(\frac{l_{21}}{\mathcal{G}_2} + \tau_{21}\right)} + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(22)}\left(\frac{l_{22}}{\mathcal{G}_2} + \tau_{22}\right)}{d\left(\frac{l_{22}}{\mathcal{G}_2} + \tau_{22}\right)} + \dots + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(2k)}\left(\frac{l_{2k}}{\mathcal{G}_2} + \tau_{2k}\right)}{d\left(\frac{l_{2k}}{\mathcal{G}_2} + \tau_{2k}\right)} + \\ & + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(n1)}\left(\frac{l_{n1}}{\mathcal{G}_3} + \tau_{n1}\right)}{d\left(\frac{l_{n1}}{\mathcal{G}_3} + \tau_{n1}\right)} + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(n2)}\left(\frac{l_{n2}}{\mathcal{G}_3} + \tau_{n2}\right)}{d\left(\frac{l_{n2}}{\mathcal{G}_3} + \tau_{n2}\right)} + \dots + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(nk)}\left(\frac{l_{nk}}{\mathcal{G}_3} + \tau_{nk}\right)}{d\left(\frac{l_{nk}}{\mathcal{G}_3} + \tau_{nk}\right)} + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(n1)}\left(\frac{l_{n1}}{\mathcal{G}_3} + \tau_{n1}\right)}{d\left(\frac{l_{n1}}{\mathcal{G}_3} + \tau_{n1}\right)} + \\ & + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(n2)}\left(\frac{l_{n2}}{\mathcal{G}_3} + \tau_{n2}\right)}{d\left(\frac{l_{n2}}{\mathcal{G}_3} + \tau_{n2}\right)} + \dots + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(nk)}\left(\frac{l_{nk}}{\mathcal{G}_3} - \tau_{nk}\right)}{d\left(\frac{l_{nk}}{\mathcal{G}_3} - \tau_{nk}\right)} + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(n1)}\left(\frac{l_{n1}}{\mathcal{G}_3} + \tau_{n1}\right)}{d\left(\frac{l_{n1}}{\mathcal{G}_3} + \tau_{n1}\right)} + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(n2)}\left(\frac{l_{n2}}{\mathcal{G}_3} + \tau_{n2}\right)}{d\left(\frac{l_{n2}}{\mathcal{G}_3} + \tau_{n2}\right)} + \\ & + \dots + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(nk)}\left(\frac{l_{nk}}{\mathcal{G}_3} + \tau_{nk}\right)}{d\left(\frac{l_{n1}}{\mathcal{G}_3} + \tau_{n1}\right)} + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(n1)}\left(\frac{l_{n1}}{\mathcal{G}_3} + \tau_{n1}\right)}{d\left(\frac{l_{n1}}{\mathcal{G}_3} + \tau_{n1}\right)} + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(n2)}\left(\frac{l_{n2}}{\mathcal{G}_3} + \tau_{n2}\right)}{d\left(\frac{l_{n1}}{\mathcal{G}_3} + \tau_{n1}\right)} + \dots + \frac{dm_{\text{в.вз}}^{(nk)}\left(\frac{l_{nk}}{\mathcal{G}_3} + \tau_{nk}\right)}{d\left(\frac{l_{nk}}{\mathcal{G}_3} + \tau_{nk}\right)} \end{aligned} \right] \cdot (14)$$

Отримане диференціальне рівняння (14) є математичною моделлю, яка в загальному вигляді функціонально описує поетапний процес відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів залежно від часу t_{jq} знаходження компонентів домішок на кожній q -й ділянці кожного j -го робочого органу складних динамічних транспортно-очисних систем вороху коренезбиральних машин.

Обмежувальною функцією процесу оптимізації параметрів робочих органів є мінімізовані показники якості роботи очисної системи згідно з агротехнічними вимогами шляхом інтегрування моделі (14) визначають час відокремлення домішок на кожному робочому органі та очисною системою загалом і відповідні коефіцієнти сепарації домішок; аналітичний розв'язок моделі дозволяє оптимізувати мінімальну довжину кожного очисного робочого органу та очисної системи машини загалом.

Реалізацію розроблених графічної схеми (рис. 10) та математичної моделі (14) у практичній площині розглянуто на прикладі аналітичного аналізу процесу інтенсифікації відокремлення i -их компонентів домішок від коренеплодів, узагальнену схему моделі якого наведено на рис. 11.

Аналітичне моделювання процесу роботи ОТТМ в аспекті дотримання раціональної технологічності її роботи записано у вигляді накладеної умови

$$\sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\Pi_{Bi}^{(P4)}(t_{p4})}{dt_{p4}} \geq \sum_{i=1}^{N_k} \frac{dQ_{Bi}^{(G)}(t_q)}{dt_q} \geq \sum_{i=1}^{N_k} \frac{dQ_{Bi}^{(P1)}(t_{p2})}{dt_{p2}} \geq \sum_{i=1}^{N_k} \frac{dQ_{Bi}^{(Z)}(t_z)}{dt_z} \geq \sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\Pi_{Bi}(t_\kappa)}{dt_\kappa}, \quad (15)$$

де t_{p4} , t_q , t_{p2} , t_z ; t_κ – час перебування вороху на робочих поверхнях робочого органу 4, 3, 2, 1 (рис.11); час переміщення викопаного вороху до транспортера 1, с.

Тоді з урахуванням загального коефіцієнта сепарації домішок j -х робочих органів ОТТМ, який позначимо $\mu_{30}^{(j)}(c_i, t_i)$, де (c_i, t_i) – сталі коефіцієнти, які враховують властивості домішок, умови роботи тощо) запишемо, що подача

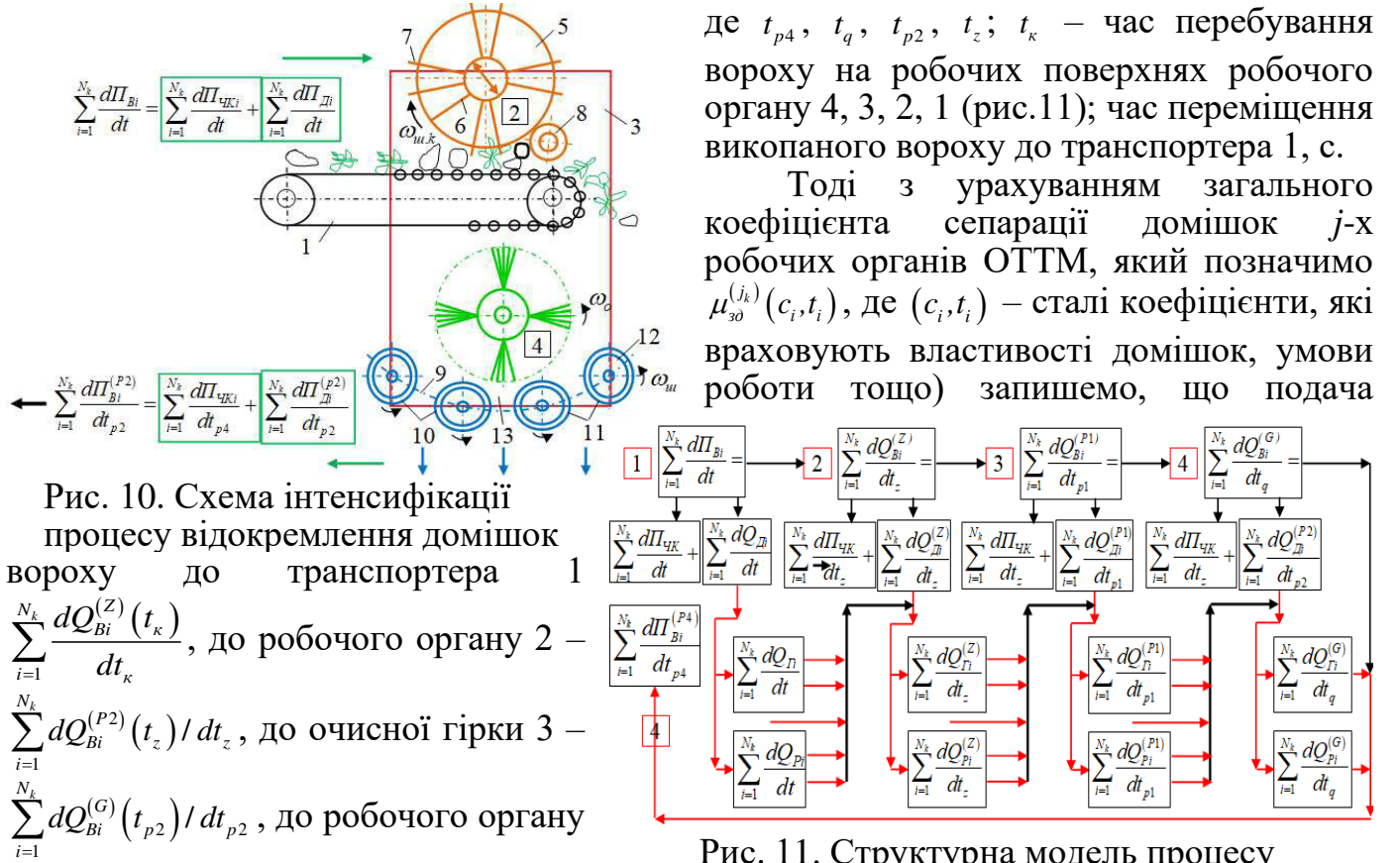


Рис. 10. Схема інтенсифікації процесу відокремлення домішок вороху до транспортера 1 $\sum_{i=1}^{N_k} \frac{dQ_{Bi}^{(Z)}(t_\kappa)}{dt_\kappa}$, до робочого органу 2 – $\sum_{i=1}^{N_k} \frac{dQ_{Bi}^{(P2)}(t_z)}{dt_z}$, до очисної гірки 3 – $\sum_{i=1}^{N_k} \frac{dQ_{Bi}^{(G)}(t_{p2})}{dt_{p2}}$, до робочого органу 4 – $\sum_{i=1}^{N_k} \frac{dQ_{Bi}^{(P4)}(t_q)}{dt_q}$ за t_κ , t_z , t_{p1} , t_q буде становити

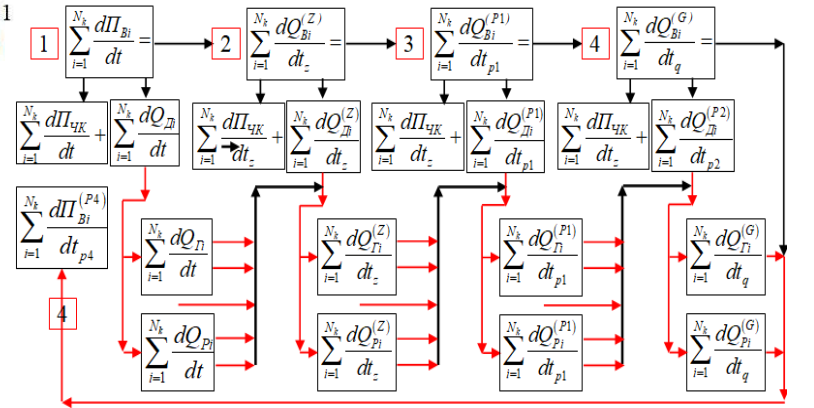


Рис. 11. Структурна модель процесу відокремлення домішок від коренеплідів робочими органами ОТТМ: 1 – транспортер; 2, 4 – комбінований робочий орган; 3 – гірка

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{i=1}^{N_k} \frac{dQ_{Bi}^{(Z)}(t_\kappa)}{dt_\kappa} &= \left(\sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\Pi_{чКi}(t_\kappa)}{dt_\kappa} \right) + \left(\sum_{i=1}^{N_k} \frac{dQ_{лi}(t_\kappa)}{dt_\kappa} \right) \mu_{30}(c_i, t_\kappa); \\ \sum_{i=1}^{N_k} \frac{dQ_{Bi}^{(P2)}(t_z)}{dt_z} &= \left(\sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\Pi_{чКi}(t_z)}{dt_z} \right) + \left(\sum_{i=1}^{N_k} \frac{dQ_{лi}^{(Z)}(t_z)}{dt_z} \right) \mu_{30}^{(Z)}(c_i, t_z); \\ \sum_{i=1}^{N_k} \frac{dQ_{Bi}^{(G)}(t_{p2})}{dt_{p2}} &= \left(\sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\Pi_{чКi}(t_{p2})}{dt_{p2}} \right) + \left(\sum_{i=1}^{N_k} \frac{dQ_{лi}^{(P2)}(t_{p2})}{dt_{p2}} \right) \mu_{30}^{(P2)}(c_i, t_{p2}); \\ \sum_{i=1}^{N_k} \frac{dQ_{Bi}^{(P4)}}{dt_q} &= \left(\sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\Pi_{чКi}(t_{p2})}{dt_{p2}} \right) + \left(\sum_{i=1}^{N_k} \frac{dQ_{лi}^{(P2)}(t_q)}{dt_q} \right) \mu_{30}^{(q)}(c_i, t_q) \end{aligned} \right. \quad (16)$$

Коефіцієнти сепарації домішок $\mu_{30}^{(Z)}(c_i, t_z)$, $\mu_{30}^{(P2)}(c_i, t_{p2})$, $\mu_{30}^{(G)}(c_i, t_q)$, $\mu_{30}^{(P4)}(c_i, t_{p4})$ відповідних робочих органів ОТТМ, з урахуванням тієї кількості домішок, яка відокремлюється на шляху руху вороху до транспортера – $(-\sum_{i=1}^{N_k} dw_{e,d}(t)/dt)$, робочою поверхнею транспортера – $(-\sum_{i=1}^{N_k} dw_{e,d}^{(Z)}(t_z)/dt_z)$, гіркою – $(-\sum_{i=1}^{N_k} dw_{e,d}^{(G)}(t_q)/dt_q)$, очисними поверхнями комбінованих робочих органів – $(-\sum_{i=1}^{N_k} dw_{e,d}^{(P2)}(t_{p2})/dt_{p2})$, $(-\sum_{i=1}^{N_k} dw_{e,d}^{(P4)}(t_{p4})/dt_{p4})$ визначаються:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\mu_{30}^{(Z)}(c_i, t_z) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_k} dw_{\sigma, \delta}^{(Z)} \left(\frac{l_m}{r_3 k_g} \frac{d\varphi_3}{dt} \right) / dt_z}{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d \left[\Pi_{чК}(t) + Q_{Ди}(t) \right] / dt \right) \mu_{30}(c_i, t)}; \\
\mu_{30}^{(P2)}(c_i, t_{p2}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_k} dw_{\sigma, \delta}^{(P2)} \left(\frac{2\pi l_{u,к}}{T_{u,к} k_{g_{u,к}}} \frac{d\varphi_{u,к}}{dt} \right) / dt_{p2}}{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d \left[\Pi_{чК}(t_{p2}) + Q_{Ди}^{(P2)}(t_{p2}) \right] / dt_{p2} \right)}; \\
\mu_{30}^{(G)}(c_i, t_q) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_k} dw_{\sigma, \delta}^{(G)} \left(\frac{\sqrt{L_2 \sin \alpha_2} \lambda_2}{\sqrt{2g} - r_{\delta}} \frac{d\varphi_{\delta}}{dt} \right) / dt_q}{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d \left[\Pi_{чК}(t_q) + Q_{Ди}^{(G)}(t_q) \right] / dt_q \right)}; \\
\mu_{30}^{(P4)}(c_i, t_{p4}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_k} dw_{\sigma, \delta}^{(P4)} \left(\frac{2\pi l_u}{T_u k_{g_u}} \frac{d\varphi_u}{dt} \right) / dt_{p4}}{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d \left[\Pi_{чК}(t_{p4}) + Q_{Ди}^{(P4)}(t_{p4}) \right] / dt_{p4} \right)}
\end{array} \right. , \quad (17)$$

де l_m , r_3 , φ_3 – довжина робочої гілки (м), радіус (м) та кут повороту (рад.) ведучої зірочки транспортера; $l_{u,к}$, $T_{u,к}$; l_u , T_u – довжина гвинтової лінії та крок шнекового конвеєра та шнека, м; $\varphi_{u,к}$ – кут повороту шнекового конвеєра, рад.; L_2 , α_2 , r_{δ} – довжина робочої гілки (м), радіус приводного барабана (м) та кут нахилу (град.) очисної гірки; λ_2 – коефіцієнт пропорційності; φ_{δ} , φ_u – кут повороту барабана та шнека, рад.

Підставивши значення коефіцієнтів сепарації вороху та його часу перебування на робочих поверхнях ОТТМ з (17) у залежності (16), отримаємо

$$\sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\Pi_{Bi}^{(P4)}(t_{p4})}{dt_{p4}} = \sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\Pi_{чК}(t_{p4})}{dt_{p4}} + \left[\sum_{i=1}^{N_k} \frac{d \left[Q_{\sigma,р}^{(P4)}(t_{p4}) + Q_{u,з}^{(P4)}(t_{p4}) \right]}{dt_{p4}} + \sum_{i=1}^{N_k} \frac{d \left[Q_{\sigma,р}^{(P4)}(t_{p4}) + Q_{з,з}^{(P4)}(t_{p4}) \right]}{dt_{p4}} \right] \times \\
\times \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_k} dw_{\sigma, \delta}^{(P4)} \left(\frac{2\pi l_u}{T_u k_{g_u}} \frac{d\varphi_u}{dt} \right) / dt_{p4}}{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d \left[\Pi_{чК}(t_{p4}) + Q_{Ди}^{(P4)}(t_{p4}) \right] / dt_{p4} \right)} \right] \quad (18)$$

Розроблена математична модель (18) характеризує взаємозв'язок функціональної зміни подачі складових компонентів вороху з ОТТМ до наступних транспортно-технологічних систем коренезбиральної машини (як правило – до модуля завантаження коренеплодів у бункер коренезбиральної машини або до модуля вивантаження коренеплодів у технологічний транспорт).

Порівняння значення масової подачі вороху з ОТТМ з подачею вороху з копачів модуля викопування коренеплодів до завантажувального транспортера ОТТМ дозволяє оцінити технологічну ефективність роботи ОТТМ.

Ефективність відокремлення домішок від коренеплодів, або показники якості роботи ОТТМ, значно залежать не тільки від характеристик домішок, параметрів і режимів роботи комбінованого робочого органу 3 (рис. 9) – правої 6 та лівої 7 систем шнеків 4 та очисного вала 5 з пружними очисними елементами 12, а й від технологічних передумов переміщення коренеплодів та домішок до них.

Для розроблення детермінованої математичної моделі руху вороху (коренеплодів і домішок) по робочих поверхнях похилого транспортера, або передумов інтенсифікації відокремлення домішок від коренеплодів, проведено аналіз перебування компонентів вороху на похилому транспортері.

Компоненти вороху 3 (коренеплоди та домішки, рис. 12) надходять на робочу гілку 2 транспортера 1, заповнюють простір між скребками 4 та переміщуються робочою гілкою до вихідної зони.

Для моделювання першої (1), стадії (рис. 12), переміщення компонента вороху до вихідної зони, або до початку його сходження зі скребка транспортера робимо припущення, що компонент масою dm_e переміщується скребком похилого транспортера у просторі системи координат xOy на елементарну відстань $dx/\cos \varepsilon$, де ε – кут встановлення похилого транспортера відносно осі Ox , град.

Рівняння рівноваги сил, які діють на елементарну частинку компонента масою dm_e на осі Oy і Ox під час елементарного переміщенні dx , мають вигляд

$$\begin{cases} N_n \cos \varepsilon - (dm_e)g + (dm_e)a_e \sin \varepsilon - N_n f_m \sin \varepsilon - \eta_c (dm_e)g f_c \sin \varepsilon = 0_{Oy}, \\ (dm_e)a_e \cos \varepsilon - N_n \cos \varepsilon - N_n f_m \cos \varepsilon - \eta_c (dm_e)g f_c \cos \varepsilon = 0_{Ox} \end{cases}, \quad (19)$$

де $a_e = (d\mathcal{G}_e/dt_e)k_g$ – прискорення компонента, м/с²; f_m – коефіцієнт тертя компонента по поверхні прутка; η_c – коефіцієнт бокового тиску компонента на скребок; f_c – коефіцієнт внутрішнього тертя.

Після заміни у другому рівнянні системи (21) значення сили нормальної реакції N_n , яку визначено з першого рівняння, та підставлення значення η_c , отримаємо диференціальне рівняння руху компонента на елементарному шляху dx з початкового стану, за якого $\mathcal{G}_{0e} = 0$, до набуття компонентом робочої швидкості руху $\mathcal{G}_e = \mathcal{G}_m k_g$ за час переміщення $t_e = t + \tau$

$$\frac{d^2x}{d(t+\tau)^2} = \frac{d\mathcal{G}_e}{d(t+\tau)} = \frac{g(\cos \varepsilon + \sin \varepsilon)}{\cos \varepsilon - f_m \sin \varepsilon} \times \left[\left(\frac{2tg^2\varepsilon + tg\varepsilon + 2,2}{(1+2tg^2\varepsilon)(\cos \varepsilon - f_m \sin \varepsilon)} \right) \psi f_c [(1-f_m)\sin \varepsilon] + 1 \right]. \quad (20)$$

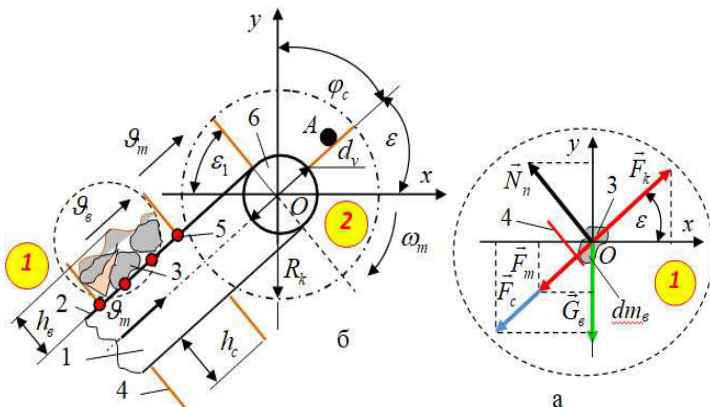


Рис. 12. Схема до розрахунку руху складових компонентів вороху

Виключивши з рівняння (20) час $d(t+\tau) = dx/\mathcal{G}_e$ та виконавши інтегрування правої частини в межах від $\mathcal{G}_{0e} = 0$ до $\mathcal{G}_e = \mathcal{G}_m k_g$, а лівої частини – від 0 до $l_{m.min}$, отримаємо залежність для визначення шляху на якому компонент набуває робочої швидкості руху $\mathcal{G}_e = \mathcal{G}_m k_g$, що буде рівнозначний шляху ковзання компонента, або мінімально-необхідній робочій довжині $l_{m.min}$ (м) похилого транспортера, на якій компонент набуває швидкості руху $\mathcal{G}_e = \mathcal{G}_m k_g$ за час переміщення $t_e = t + \tau$:

$$\int_{\mathcal{G}_{0e}}^{\mathcal{G}_m k_g} \mathcal{G}_e d\mathcal{G}_e = \int_0^{l_{m.min}} \frac{g(\cos \varepsilon + \sin \varepsilon)}{\cos \varepsilon - f_m \sin \varepsilon} \left[\left(\frac{2tg^2\varepsilon + tg\varepsilon + 2,2}{(1+2tg^2\varepsilon)(\cos \varepsilon - f_m \sin \varepsilon)} \right) \psi f_c [(1-f_m)\sin \varepsilon] + 1 \right] dx; \quad (21)$$

$$l_{m.min} = \frac{g_m^2 k_g^2}{2 \frac{g(\cos \varepsilon + \sin \varepsilon)}{\cos \varepsilon - f_m \sin \varepsilon} \left[\left(\frac{2tg^2 \varepsilon + tg \varepsilon + 2,2}{(1 + 2tg^2 \varepsilon)(\cos \varepsilon - f_m \sin \varepsilon)} \right) \psi f_c [(1 - f_m) \sin \varepsilon] + 1 \right]} \quad (22)$$

За умови технологічності роботи транспортера $d\Pi_m / dt \geq F_k g_m k_g \rho_g k_\varepsilon \xi_3 \geq d\Pi_B / dt$, де $d\Pi_m / dt$ і $d\Pi_B / dt$, відповідно, продуктивність транспортера та секундна подача вороху до нього, k_ε – коефіцієнт кута нахилу транспортера до горизонту, ξ_3 – коефіцієнт заповнення об'ємного простору робочої гілки транспортера, отримано залежність для визначення необхідної поступальної швидкості g_m робочої гілки транспортера, яка забезпечує технологічну ефективність роботи та працездатність функціонування ОТТМ

$$g_m \geq \frac{d\Pi_m}{dt} \frac{(1 + 2tg^2 \varepsilon) \left[\psi \left(tg \varepsilon + \frac{\tau_0}{h_c \rho_g g} \right) - tg \varepsilon \right]}{(1,2 + tg \varepsilon) \psi tg \varepsilon} B_m^2 k_g \rho_g k_\varepsilon \xi_3, \quad (23)$$

Для узгодження основних параметрів похилого транспортера, за яких відбуватиметься раціональне функціонування ОТТМ у першому наближенні, побудовано номограму, рис. 13.

Можна констатувати, що забезпечення умови раціонального функціонування похилого транспортера згідно з (23), за умови зміни секундної подачі вороху $d\Pi_B / dt$ до похилого транспортера в межах від 50 до 80 кг/с, досягається за швидкості руху транспортера від 0,7 до 2,1 м/с за зміни висоти скребка від 0,05 до 0,1 м (рис. 13), а мінімальна робоча довжина $l_{m.min}$ транспортера повинна бути більша за або дорівнювати від 0,1 до 1,5 м залежно від зміни g_m від 0,7 до 2,1 м/с, або швидкості руху g в межах від 0,7 до 1,9 м/с.

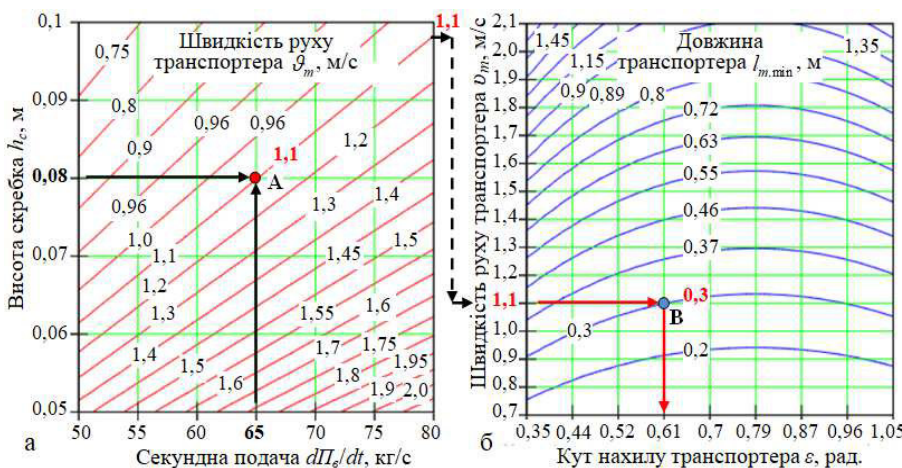


Рис. 13. Номограма для визначення параметрів транспортера: а – $g_m \geq f(d\Pi_B / dt; h_c)$; б – $l_m \geq f(g_m; \varepsilon)$

транспортера для забезпечення раціонального функціонування робочих органів ОТТМ, яка реалізується за принципом оптимальності на основі функції та рівняння Беллмана, що є рекурентним відношенням, яке пов'язує стани системи, сформульовано таким чином:

- умова раціонального функціонування (I) ділянки (рис. 11) (I) стадії (рис. 12) похилого транспортера: $dW_{lm} / dt \geq d\Pi_B / dt$ з урахуванням кількості відокремлених домішок від коренеплодів на шляху переміщення вороху робочою гілкою (I) ділянки похилого транспортера;

- умова раціонального функціонування (k)-ї ділянки (рис. 11) (I) стадії (рис. 12) похилого транспортера: $dW_{km} / dt \geq d\Pi_e^{(k-1)} / dt$ з урахуванням кількості відокремлених структурних компонентів домішок від коренеплодів на шляху переміщення вороху робочою гілкою ділянки (k-1) похилого транспортера.

Приймаючи положення, що пропускна здатність будь-якого транспортуючого технічного пристрою неперервної дії є за своєю технологічною суттю продуктивністю роботи цього пристрою, умову оптимізації раціонального функціонування похилого транспортера та ОТТМ загалом записано у вигляді:

транспортера від 0,7 до 2,1 м/с за зміни висоти скребка від 0,05 до 0,1 м (рис. 13), а мінімальна робоча довжина $l_{m.min}$ транспортера повинна бути більша за або дорівнювати від 0,1 до 1,5 м залежно від зміни g_m від 0,7 до 2,1 м/с, або швидкості руху g в межах від 0,7 до 1,9 м/с.

У другому наближенні умову багатостадійної оптимізації параметрів похилого

$$\left. \begin{aligned} Q_{1m} &= Q_k + Q_\delta - \Delta Q_{1\delta} \geq Q_\delta; \quad \Delta Q_{1\delta} = f_1(x_1, x_2, \dots, x_i) \rightarrow \max; \\ Q_{2m} &= Q_k + Q_{1\delta} - \Delta Q_{2\delta} \geq Q_{1\delta}; \quad \Delta Q_{2\delta} = f_2(x_1, x_2, \dots, x_i) \rightarrow \max; \\ &\dots\dots\dots; \\ Q_{km} &= Q_k + Q_{(k-1)\delta} - \Delta Q_{k\delta} \geq Q_{(k-1)\delta}; \quad \Delta Q_{k\delta} = f_k(x_1, x_2, \dots, x_i) \rightarrow \max \end{aligned} \right\}; \quad (24)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_{1m} &= Q_k + Q_\delta (1 - \mu_{\delta}^{(1)}) \geq Q_\delta; \\ Q_{2m} &= Q_k + Q_{1\delta} (1 - \mu_{\delta}^{(2)}) \geq Q_{1\delta}; \\ &\dots\dots\dots; \\ Q_{km} &= Q_k + Q_{(k-1)\delta} (1 - \mu_{\delta}^{(k)}) \geq Q_{(k-1)\delta} \end{aligned} \right\}, \quad (25)$$

де $\Delta Q_{1\delta}, \Delta Q_{2\delta}, \dots, \Delta Q_{k\delta}$; $\mu_{\delta}^{(1)}, \mu_{\delta}^{(2)}, \dots, \mu_{\delta}^{(k)}$ – відповідно секундна кількість відокремлених компонентів домішок; коефіцієнт ступеня відокремлених компонентів домішок відповідно, 1, 2, ..., k -ю ділянкою робочої гілки похилого транспортера.

На основі рівнянь систем (25) із врахуванням продуктивності похилого транспортера та секундних подач вороху, отримано залежності для визначення швидкості руху \mathcal{G}_{im} кожної 1, 2, ..., k -ї ділянки похилого транспортера:

$$\mathcal{G}_{1m} \geq B_k \mathcal{G}_M b_M (1 - \lambda_{\delta k}) N_k + \left[\frac{a_g}{t} \rho_\varepsilon \lambda_{\delta k} N_k \left[\frac{D_\delta^2 \sin \gamma_\delta}{4} \arccos(2h_\delta / D_\delta) - \frac{h_\delta D_\delta}{2} \right] - \right. \\ \left. - B_k \mathcal{G}_M b_M N_k K_{m_n/m_k} + 2\mathcal{G}_M \lambda_p N_k \sin \gamma_\delta \sqrt{h_\delta (D_\delta - h_\delta)} B_\varepsilon (\mu + \eta) \right] \times \\ \times \frac{2(1 - \mu_{\delta}^{(1)})}{B_m h_{1\max} k_g \rho_\varepsilon k_\varepsilon \xi_\varepsilon} \quad ; \quad (26)$$

$$\mathcal{G}_{2m} \geq B_k \mathcal{G}_M b_M (1 - \lambda_{\delta k}) N_k + \left[\frac{a_g}{t} \rho_\varepsilon \lambda_{\delta k} N_k \left[\frac{D_\delta^2 \sin \gamma_\delta}{4} \arccos(2h_\delta / D_\delta) - \frac{h_\delta D_\delta}{2} \right] - \right. \\ \left. - B_k \mathcal{G}_M b_M N_k K_{m_n/m_k} + 2\mathcal{G}_M \lambda_p N_k \sin \gamma_\delta \sqrt{h_\delta (D_\delta - h_\delta)} B_\varepsilon (\mu + \eta) \right] \times \\ \times \frac{2(1 - \mu_{\delta}^{(1)})(1 - \mu_{\delta}^{(2)})}{B_m h_{2\max} k_g \rho_\varepsilon k_\varepsilon \xi_\varepsilon} \quad ; \quad (27)$$

$$\mathcal{G}_{km} \geq B_k \mathcal{G}_M b_M (1 - \lambda_{\delta k}) N_k + \left[\frac{a_g}{t} \rho_\varepsilon \lambda_{\delta k} N_k \left[\frac{D_\delta^2 \sin \gamma_\delta}{4} \arccos(2h_\delta / D_\delta) - \frac{h_\delta D_\delta}{2} \right] - \right. \\ \left. - B_k \mathcal{G}_M b_M N_k K_{m_n/m_k} + 2\mathcal{G}_M \lambda_p N_k \sin \gamma_\delta \sqrt{h_\delta (D_\delta - h_\delta)} B_\varepsilon (\mu + \eta) \right] \times \\ \times \frac{2(1 - \mu_{\delta}^{(1)})(1 - \mu_{\delta}^{(2)})(1 - \mu_{\delta}^{(k)})}{B_m h_{k\max} k_g \rho_\varepsilon k_\varepsilon \xi_\varepsilon} \quad . \quad (28)$$

У межах зміни секундної подачі вороху Q_δ від 40 до 60 кг/с (рис. 14а) швидкість руху будь-якої k -ї ділянки транспортера збільшується, приблизно в 2 рази та повинна бути більше або дорівнювати: для першої (1) ділянки – від 0,96 до 1,96 м/с, рис. 14; для другої (2) ділянки – від 0,83 до 1,69 м/с; для k -ї ділянки – від 0,8 до 1,55 м/с, рис. 14б. Збільшення коефіцієнта сепарації домішок $\mu_{\delta}^{(i)}$ від 0,5 до 0,8 призводить до зменшення необхідної швидкості руху кожної k -ї ділянки транспортера: для першої (1) ділянки – приблизно в 1,5 рази; для другої (2) ділянки – приблизно в 1,2 рази; для k -ї ділянки – приблизно в 1,1 рази.

Зміна секундної подачі домішок до будь-якої k -ї ділянки робочої гілки практично не впливає на зміну швидкості руху транспортера за зміни коефіцієнта сепарації домішок в межах від 0,75 до 0,8.

На основі порівняльного аналізу швидкостей руху робочої гілки транспортера в першому та другому наближенні необхідно акцентувати, що робочі швидкості руху похилого транспортера в другому наближенні (з урахуванням впливу кількості

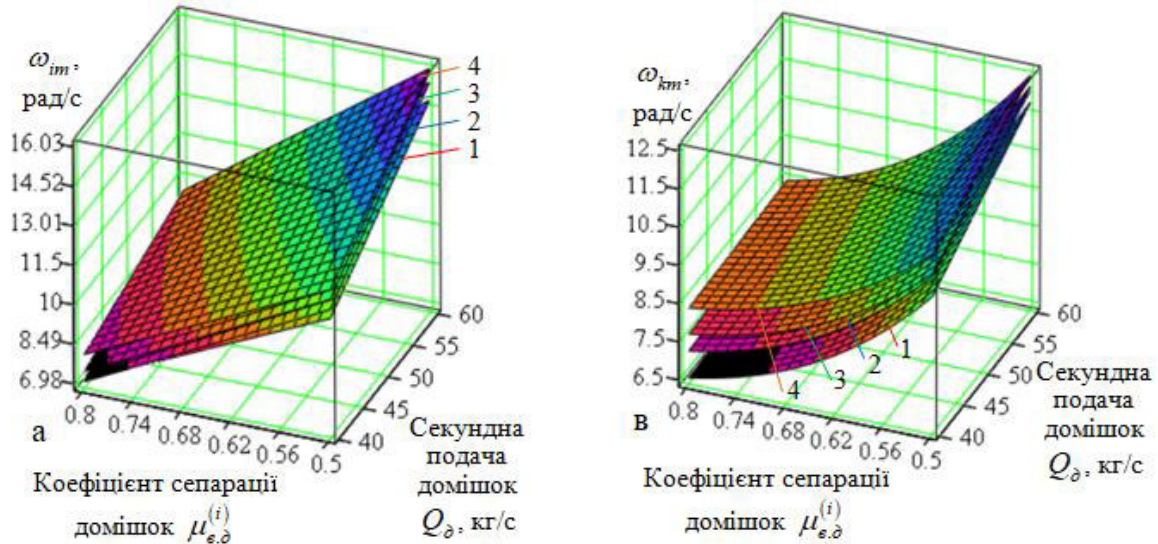


Рис. 18. Залежність зміни кутової швидкості 1 та k -ї ділянки робочої гілки транспортера як функція $\omega_{km} = f_{\omega}(Q_{\partial}, \mu_{\epsilon, \partial}^{(i)})$: а, в – відповідно, першої (1), (k -ї) ділянки; 1, 2, 3, 4 – відповідно, $Q_k = 8, 10, 12, 14$ кг/с

Моделювання процесу взаємодії очисних елементів з налиплим ґрунтом проведено на основі дослідження можливих деформацій очисних елементів, які виникають у результаті їх контакту з поверхнею налиплого ґрунту та дії на них сили тиску шарів коренеплодів з налиплим ґрунтом, які скочуються з робочої гілки очисної гірки.

Для аналізу процесу взаємодії очисних пружних елементів, які закріплено на барабані приводного вала комбінованого робочого органу ОТТМ з налиплим ґрунтом, розглянуто схему (рис. 19). Для цього кожен пружний очисний елемент 12 (рис. 5), який закріплено радіально на барабані приводного вала 6 комбінованого робочого органу 3, розглянуто у вигляді одиничного пружного стрижня 3, (рис. 19).

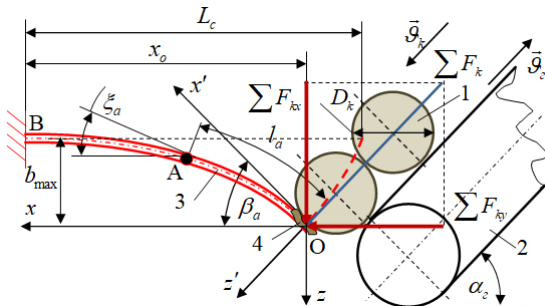


Рис. 19. Схема взаємодії пружного елемента з налиплим ґрунтом:

- 1 – коренеплід; 2 – гірка;
- 3 – пружний елемент;
- 4 – налиплий ґрунт

На одиничний пружний стрижень діє сумарна стискаюча сила $\sum F_k$ (Н), що виникає у результаті тиску коренеплодів 1 (рис. 19), які скочуються з робочої поверхні гірки 2 одиночими шарами один за одним до системи шнеків комбінованого робочого органу ОТТМ.

На основі теореми Лагранжа-Діріхле про мінімум енергії рівноважного стану системи записано диференціальне рівняння пружної лінії стрижня

$$-z \sum F_k = EJ \frac{d\xi_a}{dl_a}, \text{ або } z = -\frac{EJ}{\sum F_k} \frac{d\xi_a}{dl_a}, \quad (31)$$

де E – модуль пружності матеріалу стрижня, Па; J – геометричний осьовий момент інерції стрижня, м^4 ; $d\xi_a/dl_a$ – миттєве значення кривини осьової лінії зігнутого стрижня у точці A , рад./м; ξ_a – кут між дотичною до пружної лінії стрижня і віссю Ox , рад.; l_a – криволінійна абсциса миттєвої точки A , довжина якої дорівнює лінії від точки A до вільного кінця стрижня, м.

Вважаючи, що $dz/dl_a = \sin \xi_a$, $d\xi_a/dl_a = 0$ та з врахуванням (31), отримано:

$$-\sum F_k \sin \xi_a = \frac{EJ}{\sum F_k} \frac{d^2 \xi_a}{dl_a^2}; \quad \sum F_k (\cos \xi_a - \cos \beta_a) = \frac{EJ}{\sum F_k} \left(\frac{d\xi_a}{dl_a} \right)^2. \quad (32)$$

Після інтегрування виразу (32) методом поділу змінних і позначивши вираз $\sum F_k / EJ = \Theta$, $\sin(0,5\beta_a) = q$ та ввівши відносно кута ξ_a переміну ψ , яка пов'язана з ξ_a

рівнянням $\sin(0,5\xi_a) = q \sin \psi = \sin(0,5\beta_a) \sin \psi$, запишемо інтегральний вираз для визначення довжини пружного стрижня L_c :

$$l_a = \frac{1}{2\Theta} \int_0^{\beta_a} \frac{d\xi_a}{\sqrt{\sin^2(0,5\beta_a) - \sin^2(0,5\xi_a)}}; \quad L_c = \frac{1}{\Theta} \int_0^{\pi/2} \frac{d\psi}{\sqrt{1 - q^2 \sin^2 \psi}} = \frac{1}{\Theta} \Phi(q^2), \quad (33)$$

де $\Phi(q^2)$ – повний еліптичний інтеграл Лежандра першого роду, записаний у нормальній формі. При цьому:

- розв'язавши перше рівняння (33) відносно z , яке визначається відношенням $dz = \sin \xi_a dl_a$, отримано залежність для визначення переміщення вільного кінця пружного стрижня у вертикальному Oz напрямку

$$b_{\max} = 2q / \Theta; \quad 1/\Theta = l_a / \Theta(q^2), \quad (34)$$

де $1/\Theta$ визначено з другого рівняння (33);

- приймаючи, що $dx/dl_a = \text{const}$ та виразивши dx_o через dl_a з другого рівняння (40) і виконавши інтегрування отриманого виразу dx_o у межах $(0, \beta)$, де постійна інтегрування C визначається із граничних умов на кінці стрижня $x_o|_{\beta_a=0} = L_c$, та ввівши нову змінну інтегрування t_k , яка пов'язана з відповідною змінною кута ξ_a за прийнятих умов $\sin(0,5\beta_a) = q$ і $\sin(0,5\xi_a) = \sin(0,5\beta_a) \sin t_k$, отримали інтегральний вираз для визначення прогину пружного стрижня у горизонтальному Ox напрямку

$$x_o = L_c - \frac{2}{\Theta} \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - q^2 \sin^2 t_k} dt_k + \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{1 - q^2 \sin^2 t_k}} dt_k, \quad (35)$$

де перший і другий інтеграл є неповним еліптичним інтегралом, відповідно, другого та першого роду, який записано у нормальній формі Лежандра.

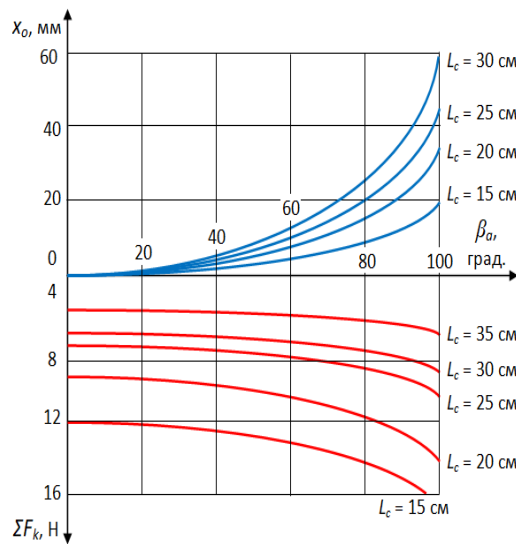
Після розв'язування інтегрального виразу (35) та підстановки значення $1/\Theta$ із залежності (34) в отриману залежність визначено переміщення вільного кінця пружного стрижня у горизонтальному Ox напрямку

$$x_o = 2L_c \left[\frac{1 - E(q^2)}{\Phi(q^2)} \right]. \quad (36)$$

Згідно з (36) побудовано номограму для визначення кута відхилення та переміщення вільного кінця очисного пружного елемента й подальшої оптимізації параметрів очисних пружних елементів і приводного вала комбінованого робочого органу (рис. 20).

Ефективність відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів суттєво залежить від показників ступеня очищення налиплого ґрунту очисними елементами 12 (рис. 4), а ступінь очищення є наслідком взаємодії очисного пружного елемента 5 (рис. 21), закріпленого на барабані 4, з тілом коренеплоду 6, або налиплим ґрунтом 7.

Рис. 20. Номограма для визначення параметрів очисного пружного елемента



Повний момент опору M_1 (Н м) зшкрябування налиплого ґрунту одиничним пружним елементом визначимо за формулою

$$M_1 = 0,5D_B \sum_{i=1}^n F_i = (0,5d_o + l_B) \sum_{i=1}^n F_{1ci}, \quad (37)$$

де D_B – діаметр точки контакту пружного стрижня з поверхнею коренеплоду, або налиплим ґрунтом, м; $\sum_{i=1}^n F_{1ci}$ – сумарна (результуюча) сила процесу зшкрябування

налиплого ґрунту з поверхні тіла одного коренеплоду, H , $i = 1, 2, \dots, n$; d_{ϕ} – діаметр труби барабана, м; l_B – довжина пружного стрижня в точці контакту B , м.

Після підстановки в (37) загальної кількості коренеплодів q_k (шт.) з яких зчищається налиплий ґрунт згідно з (3), загальної кількості K_{ic} пружних стрижнів, які взаємодіють з коренеплодами (шаром налиплого ґрунту) за час t

$$K_{2c} = (L_{1c} + L_{2c}) z_c B_k \vartheta_M b_m (1 - \lambda_{ek}) N_k t / 2T_n,$$

де L_{1c} , L_{2c} – довжина гвинтової лінії розташування пучків пружного ворсу, що беруть участь у зшкрябуванні ґрунту, який налип на поверхню одного коренеплоду за його довжиною L_k та по його діаметру D_k (м), z_c – кількість пружних стрижнів в одному пучку пружного ворсу (шт.), T_n – крок гвинтової лінії розташування пучків пружного ворсу (м), отримано залежність, яка характеризує повний (сумарний) момент опору M_{2c} зшкрябування налиплого ґрунту з коренеплодів залежно від урожайності коренеплодів

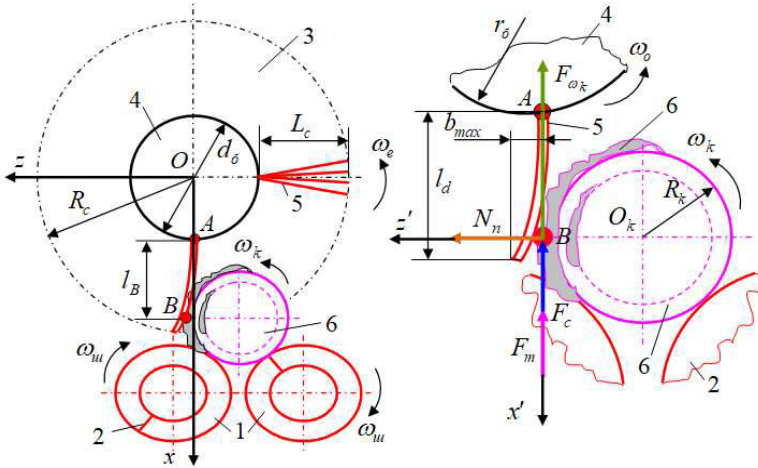


Рис. 21. Схема взаємодії очисного елемента з налиплим ґрунтом: 1 – система шнеків; 2 – виток шнека; 3 – приводний вал; 4 – барабан; 5 – очисний елемент; 6 – коренеплід; 7 – налиплий ґрунт

$$M_{2c} = \frac{(r_{\phi} + l_B)(L_k + D_k)(R_c + r_{\phi})}{2T_n \operatorname{tg}(\pi/4 - 0,5\varphi_o)} \frac{t}{m_{kc}^{(1)}} \cos \left[\operatorname{arctg} \frac{\pi D_B \operatorname{tg}(\pi/4 - 0,5\varphi_o)}{R_c + r_{\phi}} \right] B_k \vartheta_M b_m (1 - \lambda_{ek}) N_k z_c \sum_{i=1}^n F_{2ci}, \quad (38)$$

де $\pi/4 - 0,5\varphi_o = \beta_o$ – кут підйому гвинтової лінії пружних стрижнів, рад.; φ_o – кут тертя ковзання пружних стрижнів по ґрунту, рад.

За умови, що:

$$- \sum_{i=1}^n F_{ic, \max} = W_c [\sigma_{ic, \max}] / l_d = 0,1 d_c^3 [\sigma_{ic, \max}] / l_d, \text{ де } W_c \text{ – коефіцієнт витривалості на згин}$$

очисного стрижня (м^3), d_c – діаметр поперечного перерізу очисного стрижня (м), $[\sigma_{ic, \max}]$ – допустимі напруження, які виникають в пружному стрижні під час його вигину (Па), l_d – вільна довжина пружного стрижня, що деформується (м);

$$- \sum_{k=1}^3 F_{ic, \max k} = (F_{ic, \max} + F_{\omega_k} - F_m) K_c, \text{ де } F_{ic, \max}, F_{\omega_k}, F_m \text{ – відповідно, максимально}$$

допустима сила зшкрябування одиничного коренеплоду, яка діє під час обертання пружних елементів, сила зшкрябування, яка діє під час обертання одного коренеплоду з кутовою швидкістю ω_k , сила тертя одного коренеплоду (Н);

$$- \sum_{i=1}^3 F_{i, \max} = \pi^2 EI / \mu^2 l_e^2, \text{ де } \mu = 2 \text{ – коефіцієнт приведення довжини, } E \text{ – модуль}$$

пружності (Юнга) матеріалу пружного елемента (Н/м^2), I – статичний момент інерції площі поперечного перерізу пружного елемента круглого профілю (м^4) та

$[\sigma_{e, \max}] = \sum_{i=1}^3 F_{i, \max} / S_e$, де $S_e = 0,25\pi d_c^2$ – площа поперечного перерізу пружного елемента, по якій розподілена сумарна сила (м^2), отримано залежність для визначення

максимально допустимої результуючої сили $\sum_{k=1}^3 F_{2ei, \max}$ процесу відокремлення налиплого ґрунту з поверхні тіла коренеплоду та максимально допустимої кутової швидкості пружних елементів $\omega_{2e, \max}$ на вигин:

$$\sum_{i=1}^3 F_{2ei.maxk} = \frac{\{\pi^2 ER_c d_c^3 (L_k + D_k)(R_c + r_o)\Phi + 0,25m_k \omega_k^2 D_k - f_m F_n\} W_{2k}}{160\mu^2 (D_c - d_o)^3 (0,5d_o + l_B) T_n l_d \operatorname{tg}(\pi/4 - 0,5\varphi_o)}; \quad (39)$$

$$\omega_{2e.max} = \sqrt{\frac{\{\pi ER_c d_c^3 (L_k + D_k)(R_c + r_o)\Phi + 0,25m_k \omega_k^2 D_k - f_m F_n\} W_{2k}}{10L_c \rho_e D_c (0,5d_o + l_B)(D_c - d_o)^4 T_n l_d \operatorname{tg}(\pi/4 - 0,5\varphi_o)}}; \quad (40)$$

де $\Phi = \cos \left[\operatorname{arctg} \frac{\pi D_B \operatorname{tg}(\pi/4 - 0,5\varphi_o)}{R_c + r_o} \right]$; $W_{2k} = \left[\frac{t}{m_{kc}^{(1)}} B_k g_M b_m (1 - \lambda_{ok}) N_k z_c \right]$; $m_{kc}^{(1)}$ – середня маса одного коренеплоду, кг; D_c , D_k – діаметр приводного вала та коренеплоду, м; f_m – коефіцієнт тертя пружного елемента по ґрунту; F_n – нормальна сила натягу (сила реакції) пружного елемента, Н.

Встановлено, що за умови забезпечення максимально допустимої пружності на вигин очисних елементів, максимальна допустима результуюча сила $\sum_{k=1}^3 F_{2c.maxk}$ процесу відокремлення налиплого ґрунту з коренеплодів за зміни діаметра приводного вала D_c від 0,4 до 0,6 м і діаметра d_c пружних елементів від 2 до 6 мм за значення, наприклад, секундної подачі коренеплодів $W_k = 7,0$ кг/с (рис. 22б) до шнеків, знаходиться в діапазоні 280...400 Н, а максимально допустима кутова швидкість пружних елементів $\omega_{2e.max}$ – у діапазоні 20...80 рад/с.

Використовуючи побудовані номограми визначено і встановлено комбінації параметрів комбінованого робочого органу 3 (рис. 23) залежно від значень технологічних показників роботи коренезбиральної машини.

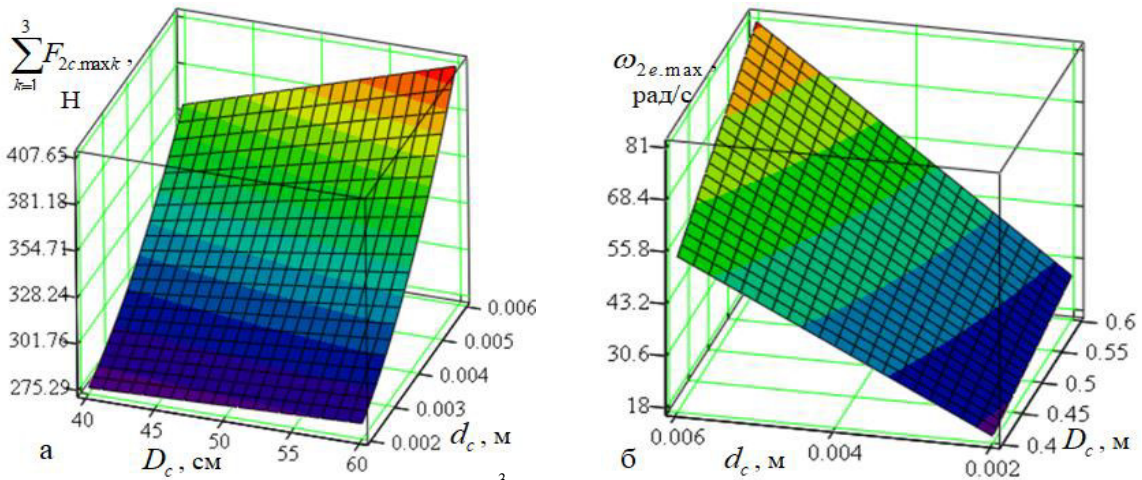


Рис. 22. Залежність зміни: а – $\sum_{k=1}^3 F_{2c.maxk} = f_F(D_c; d_c)$; б – $\omega_{2c.max} = f_\omega(D_c; d_c)$

Діаметр приводного вала D_c , м

■ 0,4 ■ 0,5 ■ 0,6

Діаметр приводного вала D_c , м

■ 0,4 ■ 0,5 ■ 0,6

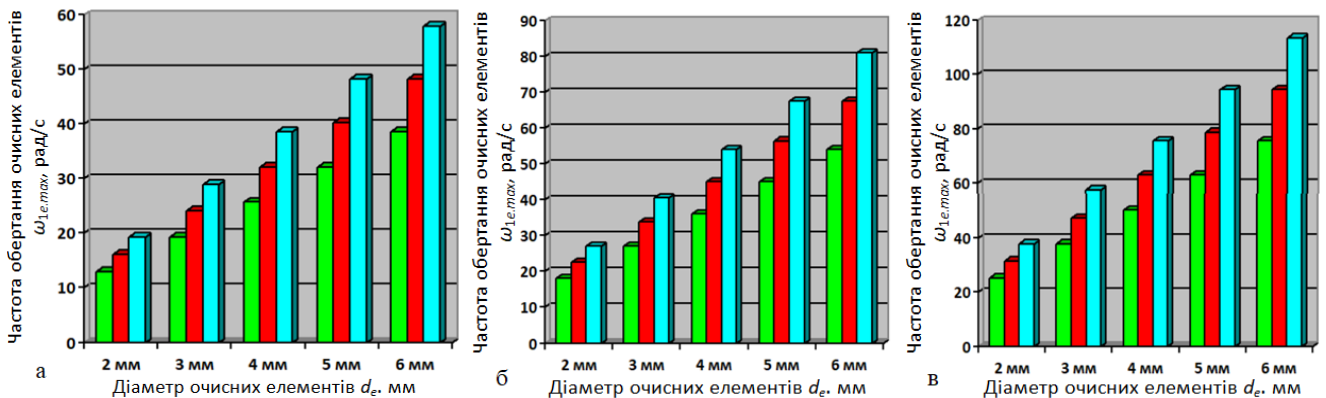


Рис. 23. Діаграма зміни допустимої частоти обертання очисних елементів за секундної подачі коренеплодів: а – $W_k = 5$ кг/с; б – $W_k = 7$ кг/с; в – $W_k = 9$ кг/с

Таким чином, отримані аналітичні залежності є передумовами для проведення оптимізації конструктивно-кінематичних параметрів та режимів роботи робочих органів ОТТМ шляхом розв'язування контактної задачі взаємодії коренеплодів із пружними очисними елементами за умови непошкодження коренеплодів.

У п'ятому розділі «Методологія моделювання експериментальних досліджень очисних транспортно-технологічних модулів» наведено: програму проведення лабораторних і польових натурних та порівняльних досліджень; характеристику лабораторної та польових експериментальних установок; методику проведення експериментальних досліджень з визначення коефіцієнтів сепарації домішок, дальності польоту коренеплодів, методологію реалізації польових експериментальних і порівняльних досліджень очисних транспортно-технологічних модулів.

Програма проведення експериментальних досліджень ОТТМ була такою:

1. Провести експериментальні дослідження з визначення загального коефіцієнта $\mu_{30}^{(z)}$ та коефіцієнта сепарації $\mu_{30}^{(z_q)}$ загальних домішок q -ої ділянки похилого транспортера 2 (рис. 24) під час збирання коренеплодів цикорію.

2. Встановити функціональний характер дальності польоту коренеплодів цикорію з похилого транспортера 2 до очисної гірки (рис. 25).

3. Визначити показники якості роботи запропонованих очисних систем у складі коренезбиральної машини в реальних польових умовах збирання коренеплодів:

- ОТТМ (рис. 4в) на посівах кормових буряків (рис. 26 та 27);
- ОТТМ (рис. 4а,б) на посівах цукрових буряків (рис. 28);
- ОТТМ (рис. 24) на посівах коренеплодів цикорію.

4. Провести порівняльні дослідження показників якості роботи ОТТМ у виробничих умовах і визначити показники енергетичних затрат процесу роботи ОТТМ під час збирання крупних коренеплодів у складі коренезбиральної машини.

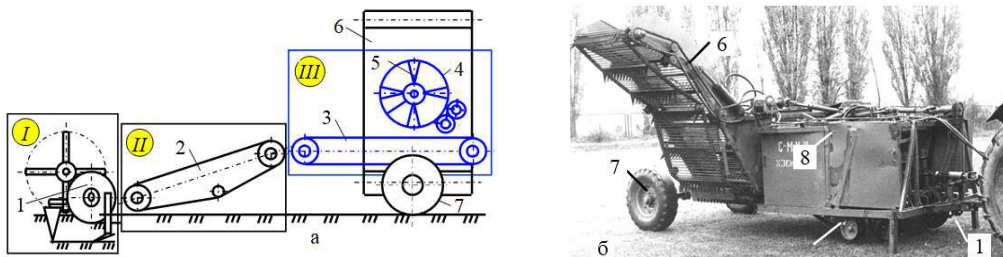


Рис. 24. Причіпна коренезбиральна машина: а – конструктивна схема; б – загальний вигляд; I – МВК; II – очисна система; III – ОТТМ; 1 – копач; 2, 3 – похилий і горизонтальний транспортер; 4 – шнековий конвеєр; 5 – очисні елементи; 6 – вивантажувальний транспортер; 7 – опорне колесо; 8 – рама

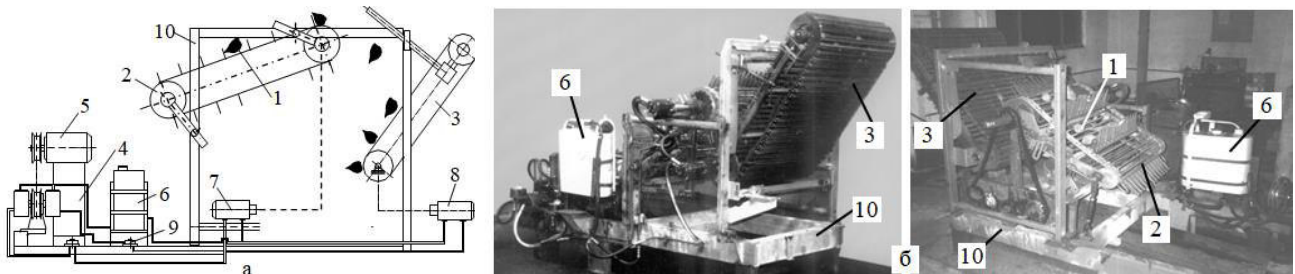


Рис. 25. Лабораторний стенд для проведення експериментальних досліджень: а – конструктивна схема; б – загальний вигляд; 1 – коренеплід; 2 – похилий транспортер; 3 – гірка; 4 – гідравлічна насосна станція; 5 – електродвигун; 6 – масляний бак; 7, 8 – відповідно, гідромотори приводу транспортера та гірки; 9 – регулювальний дросель; 10 – рама

Визначення показників якості роботи ОТТМ у складі коренезбиральної машини за результатами реалізації польових експериментальних досліджень проведено згідно зі стандартною методикою оброблення експериментального масиву даних.

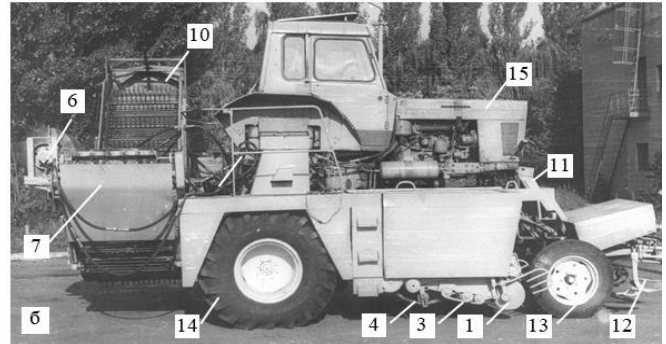
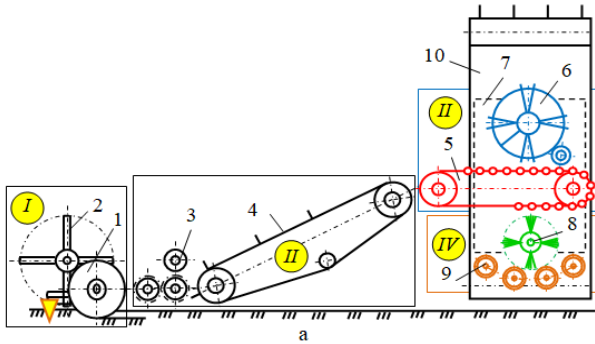


Рис. 26. Модернізована коренезбиральна машина МКК-6А: а – конструктивна схема; б – загальний вигляд; I – МВК; II – очисна система; III, IV – комбінований робочий орган 1 і 2; 1 – копач; 2 – лопатевий вал; 3 – шнековий очисник; 4, 5 – транспортери; 6 – шнековий конвеєр; 7 – гірка; 8 – вал з очисними елементами; 9 – шнеки; 10 – вивантажувальний транспортер; 11 – рама; 12 – система керування; 13, 14 – копіювальне та опорне колесо; 15 – трактор

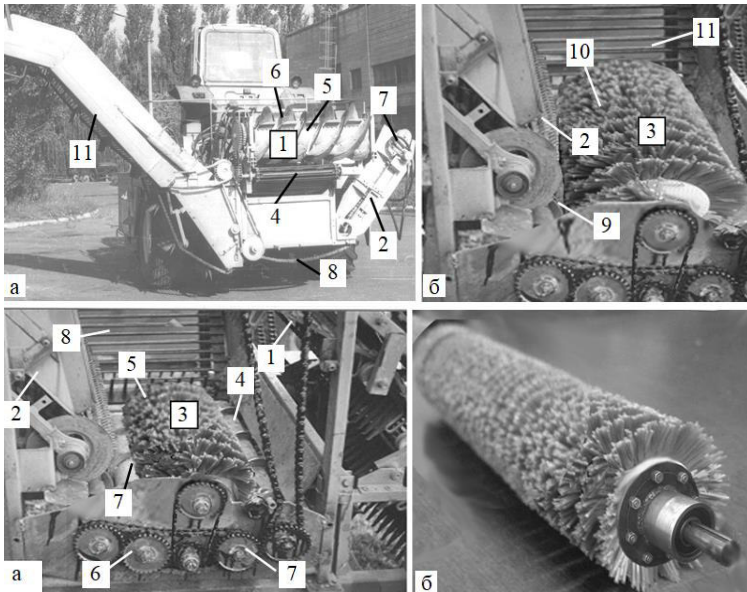


Рис. 27. Загальний вигляд ОТТМ: а – вигляд ззаду; б – комбінований робочий орган; 1, 3 – комбінований робочий орган; 2 – гірка; 4, 8, 11 – горизонтальний, поперечний, завантажувальний транспортер; 5 – шнековий конвеєр; 6 – виток шнека; 7 – гідромотор; 9 – шнек; 10 – очисний вал

Рис. 38. Загальний вигляд ОТТМ: а – вигляд збоку; б – очисного вала: 1 – похилий транспортер; 2 – гірка; 3 – комбінований робочий орган; 4 – шнек; 5 – очисний вал; 6, 7 – системи шнеків; 8 – завантажувальний транспортер

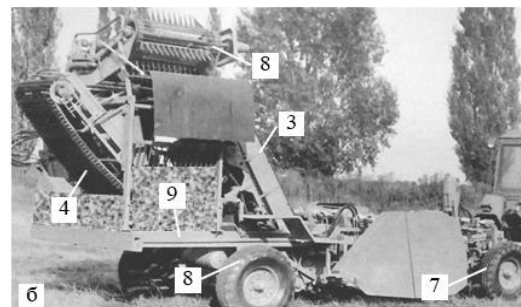
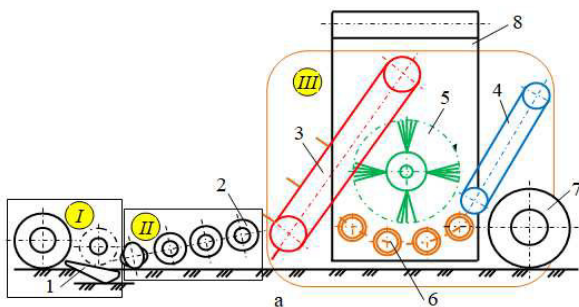


Рис. 28. Модернізована коренезбиральна машини МПК-4: а – конструктивна схема; б – загальний вигляд; I – МВК; II – очисна система; III – ОТТМ; 1 – копач; 2 – шнек; 3 – похилий транспортер; 4 – гірка; 5 – очисний вал; 6 – система шнеків; 7, 8 – колесо

Модель реалізації та схему реалізації експериментів з визначення загального коефіцієнта $\mu_{30}^{(z)}$ та коефіцієнтів сепарації $\mu_{30}^{(z_q)}$ загальних домішок q -ої ділянки похилого транспортера 2 (рис. 24) наведено відповідно, на рис. 29 та 30. Рівні варіювання факторами наведено в табл. 1.

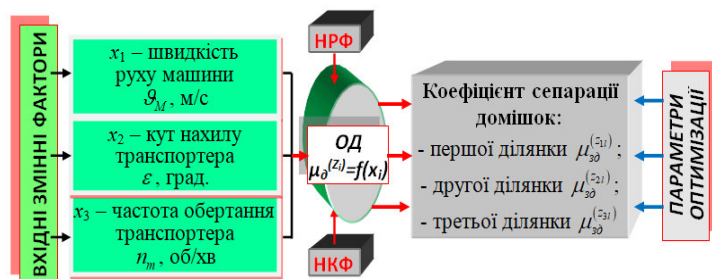


Рис. 29. Модель реалізації експериментів

Модель реалізації експериментів з визначення значення дальності польоту коренеплодів наведено на структурній схемі (рис. 31), а фактори та рівні варіювання факторами – в табл. 2.

Таблиця 1. Рівні варіювання факторами

Назва фактора	Кодоване познач. / Рівні варіювання		
	Нижній	Нульовий	Верхній
Швидкість руху машини ϱ_M , км/год	-1/5	0/6	+1/7
Кут нахилу транспортера ε , град.	-1/10	0/20	+1/30
Частота обертання транспортера n_m , об/хв	-1/90	0/120	+1/150

Таблиця 2. Рівні варіювання факторами

Назва фактора	Кодоване познач. / Рівні варіювання		
	Нижній	Нульовий	Верхній
Кут нахилу транспортера ε , град.	-1/20	0/30	+1/40
Частота обертання транспортера n_m , об/хв	-1/90	0/120	+1/150

При проведенні польових досліджень визначено функціональний характер зміни показників якості роботи запропонованих ОТТМ (рис. 4) у складі коренезбиральних машин (рис. 24–27): загальних домішок $ЗД_k$ (шнеки круглого перерізу) та $ЗД_e$ (еліпсні шнеки); маси налиплого ґрунту на коренеплодах $НГ_k$ (шнеки круглого перерізу) та $НГ_e$ (еліпсні шнеки); пошкодження коренеплодів $ПК_k$ (шнеки круглого перерізу) та $ПК_e$ (еліпсні шнеки).

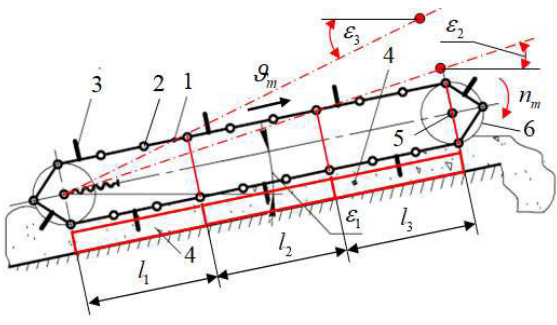


Рис. 30. Схема похилого транспортера: 1 – робоча гілка транспортера; 2 – пруток; 3 – скребок; 4 – ємність; 5 – ведучий вал; 6 – привідна зірочка

Модель реалізації експериментів з визначення функціонального характеру зміни показників якості роботи ОТТМ під час збирання кормових і цукрових буряків проведено згідно з структурною схемою (рис. 32), де рівні варіювання факторами наведено у табл. 3.

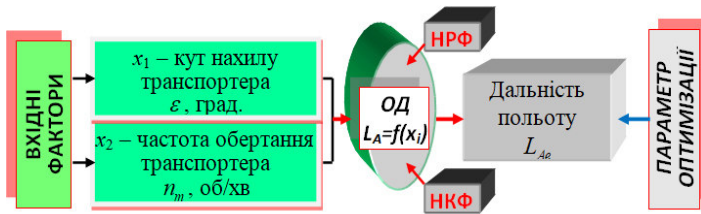


Рис. 31. Модель реалізації експериментів збирання картоплі. Модель реалізації експериментів з визначення функціонального характеру зміни показників якості роботи ОТТМ під час збирання коренеплодів цикорію проведено згідно з розробленою структурною схемою (рис. 33), де рівні варіювання факторами наведено у табл. 4.

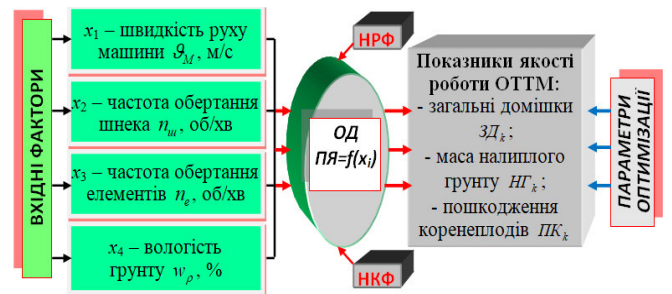


Рис. 32. Модель реалізації експериментів збирання буряків

Таблиця 3. Рівні варіювання факторами

Назва фактора	Кодоване познач. / Рівні варіюв.		
	Нижній	Нульовий	Верхній
Швидкість руху машини ϱ_M , км/год	-1/5	0/6	+1/7
Частота обертання шнека n_m , об/хв	-1/100	0/150	+1/200
Частота обертання пружних елементів n_e , об/хв	-1/300	0/500	+1/700
Вологість ґрунту w_p , %	-1/18	0/22	+1/26

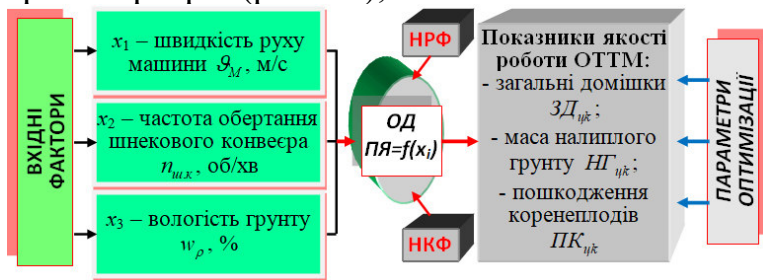
Порівняльні дослідження показників якості роботи ОТТМ під час збирання крупних коренеплодів проведено згідно зі стандартною методикою.

Таблиця 4. Рівні варіювання факторами

Назва фактора	Кодоване познач. / Рівні варіювання		
	Нижній	Нульовий	Верхній
Швидкість руху машини \mathcal{Q}_M , км/год	-1/5	0/6	+1/7
Частота обертання шнекового конвеєра $n_{ш.к}$, об/хв	-1/100	0/150	+1/200
Вологість ґрунту w_p , %	-1/18	0/22	+1/26

При цьому порівнювали:

- під час збирання кормових буряків: ОТТМ коренезбиральної машини МКК-6А (рис. 26) та очисну систему машини МКК-6А, з якої було демонтовано комбінований робочий орган 2, а замість нього встановлено серійний поперечний транспортер 8 (рис. 27);



- під час збирання цукрових буряків: ОТТМ коренезбиральної машини МПК-4 та очисну систему машини МПК-4 (рис. 28), з якої було демонтовано приводний очисний вал 5 (рис. 28);

- під час збирання коренеплодів цикорію: ОТТМ причіпної коренезбиральної машини

Рис. 33. Модель реалізації експериментів

(рис. 24) та очисну систему машини, де очисні пружні елементи 5 (рис. 24) було демонтовано з шнекового конвеєра 4.

Під час проведення експериментальних досліджень застосовували методологію реалізації планованих факторних експериментів типу ПФЕ 3^2 , ПФЕ 3^3 та ПФЕ 4^3 . При реалізації ПФЕ 3^3 та ПФЕ 4^3 застосовували рандомізовану несиметричну план-матрицю Бокса-Бенкіна.

Технологічні показники (загальний коефіцієнт сепарації $\mu_{30}^{(z)}$ (%) і коефіцієнти сепарації $\mu_{30}^{(z_q)}$ (%) домішок кожної l_1, l_2, l_3 ділянки (рис. 33) похилого транспортера) та показники якості роботи ОТТМ визначено за формулою:

$$\mu_{30}^{(z)} = \frac{m_{30}}{m_g} 100\%; \mu_{30}^{(z_{l1})} = \frac{m_{130}}{m_g} 100\%; \mu_{30}^{(z_{l2})} = \frac{m_{230}}{m_g - m_{130}} 100\%; \mu_{30}^{(z_{l3})} = \frac{m_{330}}{m_g - m_{130} - m_{230}} 100\%, \quad (41)$$

де m_g, m_{30} – маса викопаного вороху та загальна маса відокремлених і просіяних структурних компонентів домішок, кг; $m_{130}, m_{230}, m_{330}$ – відповідно загальна маса просіяних структурних компонентів домішок на кожній ділянці похилого транспортера, кг;

$$ЗД_i = (M_{30} / M_k) 100\%; НГ_i = (M_{нз} / M_k) 100\%; ПК_i = (M_{нк} / M_k) 100\%, \quad (42)$$

де $M_{30}, M_{нз}, M_{нк}, M_k$ – відповідно маса загальних домішок, налиплого ґрунту, пошкоджених коренеплодів і маса чистих коренеплодів із зібраного вороху після викопування машиною з однієї залікової ділянки поля, кг.

Оброблення експериментального масиву даних під час визначення технологічних показників і показники якості роботи ОТТМ проведено згідно із загальноприйнятою методикою обробки експериментальних даних, при цьому: невідому функціональну залежність показників $\Pi_j = f_{\Pi}(x_1; x_2; x_i)$ для проведення апроксимації експериментального масиву даних знаходили шляхом перебору відомих алгебраїчних функцій за найбільшим значенням коефіцієнта чисельної детермінації D_i відповідної алгебраїчної залежності; мінливість функції оцінювали стандартним відхиленням і коефіцієнтом кореляції; невідомі коефіцієнти рівняння регресії функціональної залежності $\Pi_j = f_{\Pi}(x_1; x_2; x_i)$ визначали за допомогою прикладної комп'ютерної програми; адекватність моделі та значущість коефіцієнтів рівняння регресії встановлювали за F -критерієм Фішера та t -критерієм Ст'юдента.

У шостому розділі «Результати експериментальних досліджень очисних транспортно-технологічних модулів» наведено: результати польових експериментальних досліджень коефіцієнтів сепарації домішок похилого транспортера та лабораторних експериментальних досліджень дальності польоту коренеплодів з похилого транспортера до очисної гірки; результати польових експериментальних досліджень показників якості роботи очисних транспортно-технологічних модулів; порівняльні дані польових досліджень процесів роботи комбінованих очисних систем вроху.

За результатами статистичної обробки отриманого експериментального масиву даних і аналізу статистичних показників значень загального коефіцієнта $\mu_{30e}^{(Z)}$, коефіцієнтів сепарації $\mu_{30e}^{(Z_q)}$ загальних домішок кожної ділянки похилого транспортера встановлено, що найбільше значення коефіцієнта чисельної детермінації ($D_{\mu}^Z = 0,959$; $D_{\mu}^{Z11} = 0,955$; $D_{\mu}^{Z12} = 0,955$; $D_{\mu}^{Z13} = 0,945$) відповідало математичній моделі повного полінома другої степені.

Після перевірки значущості коефіцієнтів рівняння регресії та адекватності моделі отримано кінцеві емпіричні рівняння регресії в натуральних факторах, які характеризують функціональну залежність зміни:

- загального коефіцієнта $\mu_{30e}^{(Z)}$ сепарації загальних домішок

$$\mu_{30e}^{(Z)} = -8,45 + 23,78\vartheta_M + 0,52\varepsilon + 0,01n_m - 0,08\vartheta_M\varepsilon - 0,003\vartheta_M n_m - 2,12\vartheta_M^2 + 0,01\varepsilon^2 + 0,001n_m^2; \quad (43)$$

- коефіцієнтів $\mu_{30e}^{(Z_{11})}$, $\mu_{30e}^{(Z_{21})}$, $\mu_{30e}^{(Z_{31})}$ сепарації загальних домішок l_1 , l_2 , l_3 ділянки:

$$\mu_{30e}^{(Z_{11})} = -17,08 + 25,11\vartheta_M + 0,56\varepsilon - 0,08\vartheta_M\varepsilon - 0,03\vartheta_M n_m - 2,78\vartheta_M^2 + 0,01\varepsilon^2 + 0,0004n_m^2; \quad (44)$$

$$\mu_{30e}^{(Z_{21})} = -13,08 + 25,11\vartheta_M + 0,56\varepsilon - 0,08\vartheta_M\varepsilon - 0,003\vartheta_M n_m - 2,28\vartheta_M^2 + 0,01\varepsilon^2 + 0,0004n_m^2; \quad (45)$$

$$\mu_{30e}^{(Z_{31})} = -4,6 + 24,0\vartheta_M + 0,74\varepsilon - 0,075\vartheta_M\varepsilon - 0,0014\vartheta_M n_m - 2,068\vartheta_M^2 + 0,001\varepsilon^2 + 0,001n_m^2; \quad (46)$$

Аналіз поверхонь відгуку та їх двомірних перерізів (рис. 34) показує, що зміна апроксимованих значень параметрів оптимізації залежно від встановлених меж зміни вхідних факторів (згідно з табл. 1) знаходиться в такому діапазоні: загальний коефіцієнт $\mu_{30e}^{(Z)}$ сепарації загальних домішок похилого транспортера – від 54 до 72 % (рис. 35а); коефіцієнти $\mu_{30e}^{(Z_{11})}$, $\mu_{30e}^{(Z_{21})}$, $\mu_{30e}^{(Z_{31})}$ сепарації загальних домішок кожної l_1 , l_2 , l_3 відповідної ділянки похилого транспортера – від 52 до 67 % (рис. 34б), від 54 до 71 % (рис. 34в), від 62 до 78 % (рис. 34г) відповідно, а розсіювання експериментальних даних відповідає нормальному закону імовірного розподілення за довірчого інтервалу 0,95.

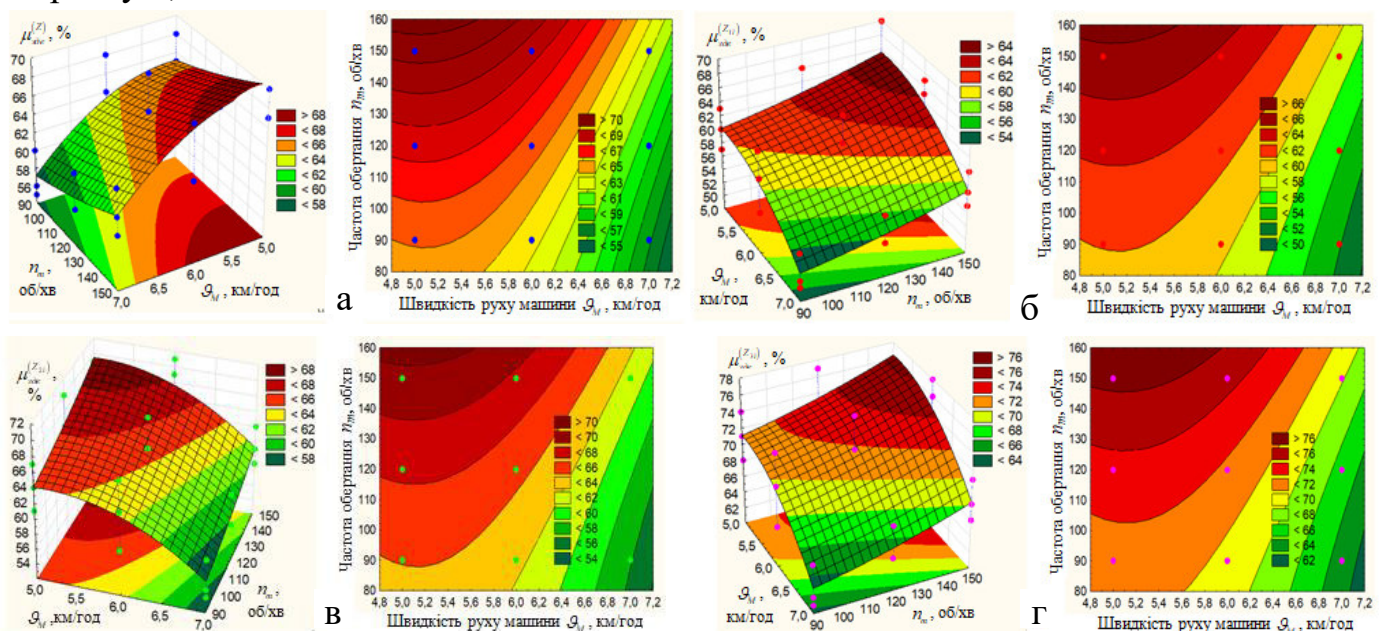


Рис 34. Поверхня відгуку та її двомірний переріз залежності зміни як функція:
 а, б, в, г – $\mu_{30e}^{(Z)} = f_{\mu}(\vartheta_M; n_m)$; $\mu_{30e}^{(Z_{11})} = f_{\mu}(\vartheta_M; n_m)$; $\mu_{30e}^{(Z_{21})} = f_{\mu}(\vartheta_M; n_m)$; $\mu_{30e}^{(Z_{31})} = f_{\mu}(\vartheta_M; n_m)$

Критерієм оптимізації параметрів похилого транспортера ОТТМ є максимальне значення загального коефіцієнта $\mu_{30e}^{(Z)}$ та коефіцієнтів сепарації $\mu_{30e}^{(Z_{11})}$, $\mu_{30e}^{(Z_{21})}$, $\mu_{30e}^{(Z_{31})}$ кожної l_1, l_2, l_3 ділянки транспортера, тобто $\mu_{30e}^{(Z)} \rightarrow \max$, $\mu_{30e}^{(Z_{11})} \rightarrow \max$, $\mu_{30e}^{(Z_{21})} \rightarrow \max$, $\mu_{30e}^{(Z_{31})} \rightarrow \max$.

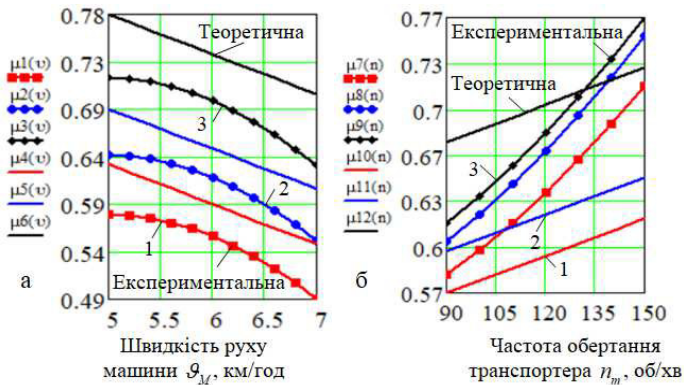


Рис. 35. Залежність зміни $\mu_{30e}^{(Z)}$ та $\mu_{30e}^{(Z_{ii})}$ як

функція: а – $\mu_{30e}^{(Z)}(\mu_{30e}^{(Z_{ii})}) = f_{\mu}(\mathcal{G}_M)$,

1, 2, 3 – $n_m = 90, 120$ і 150 об/хв; б –

$\mu_{30e}^{(Z)}(\mu_{30e}^{(Z)}) = f_{\mu}(n_m)$, 1, 2, 3 – $\mathcal{G}_M = 5, 7$ і 9 км/год

теоретичних $\mu_{30e}^{(Z)}$ і експериментальних $\mu_{30e}^{(Z)}$ значень коефіцієнта сепарації загальних домішок знаходиться в межах 10...15%. Тоді можна констатувати, що розроблена теоретична модель (17), яка характеризує функціональну зміну $\mu_{30e}^{(Z)}$ загальних домішок, є адекватною значенням емпіричного розподілу $\mu_{30e}^{(Z)}$.

За результатами статистичної обробки отриманого експериментального масиву даних показників якості роботи ОТТМ у складі коренезбиральних машин встановлено, що найбільше значення коефіцієнтів чисельної детермінації ($D_{3Дкк} = 0,940$; $D_{3Дек} = 0,938$; $D_{НГкк} = 0,790$; $D_{НГек} = 0,962$; $D_{ПКкк} = 0,965$; $D_{ПКек} = 0,816$) відповідало математичній моделі повного полінома другої степені.

Після перевірки значущості коефіцієнтів рівняння регресії та адекватності моделі отримано кінцеві емпіричні рівняння регресії в натуральних факторах, які характеризують функціональну залежність зміни: загальних домішок $3Д_k$ (шнеки круглого перерізу) та $3Д_e$ (еліпсні шнеки); маси налиплого ґрунту на коренеплодах $НГ_k$ (шнеки круглого перерізу) та $НГ_e$ (еліпсні шнеки); пошкодження коренеплодів $ПК_k$ (шнеки круглого перерізу) та $ПК_e$ (еліпсні шнеки):

- під час збирання кормових буряків машиною МКК-6 (рис. 26 та 27):

$$3Д_{кк} = 139,8 - 0,94\mathcal{G}_M - 0,29n_{uu} - 10,16w_{\rho} + 0,45 \cdot 10^{-2}\mathcal{G}_M n_{uu} - 0,13 \cdot 10^{-2}\mathcal{G}_M n_e + 0,64 \cdot 10^{-2}\mathcal{G}_M w_{\rho} + 0,23 \cdot 10^{-4}n_{uu}n_e + 0,16\mathcal{G}_M^2 + 0,77 \cdot 10^{-3}n_{uu}^2 - 0,16 \cdot 10^{-5}n_e^2 + 0,23w_{\rho}^2; \quad (47)$$

$$3Д_{ек} = 133,5 - 0,75\mathcal{G}_M - 0,29n_{uu} - 0,57 \cdot 10^{-2}n_e - 9,82w_{\rho} + 0,6 \cdot 10^{-2}\mathcal{G}_M n_{uu} - 0,17 \cdot 10^{-2}\mathcal{G}_M n_e + 0,63 \cdot 10^{-2}\mathcal{G}_M w_{\rho} + 0,28 \cdot 10^{-4}n_{uu}n_e + 0,94 \cdot 10^{-4}n_e w_{\rho} + 0,13\mathcal{G}_M^2 + 0,7 \cdot 10^{-3}n_{uu}^2 - 0,78 \cdot 10^{-5}n_e^2 + 0,22w_{\rho}^2; \quad (48)$$

$$НГ_{кк} = 27,5 - 0,22\mathcal{G}_M - 0,5 \cdot 10^{-2}n_{uu} - 0,01n_e - 2,08w_{\rho} - 0,25 \cdot 10^{-5}n_{uu}n_e + 0,16 \cdot 10^{-4}n_{uu}^2 + 0,72 \cdot 10^{-5}n_e^2 + 0,047w_{\rho}^2; \quad (49)$$

$$НГ_{ек} = 23,9 - 0,032n_{uu} - 0,42 \cdot 10^{-2}n_e - 1,7w_{\rho} + 0,25 \cdot 10^{-2}\mathcal{G}_M n_{uu} - 0,25 \cdot 10^{-5}n_{uu}n_e + 0,38 \cdot 10^{-3}n_{uu}w_{\rho} + 0,31 \cdot 10^{-4}n_{uu}^2 + 0,31 \cdot 10^{-5}n_e^2 + 0,037w_{\rho}^2; \quad (50)$$

$$ПК_{кк} = 11,6 + 2,55\mathcal{G}_M + 0,05n_{uu} - 0,41 \cdot 10^{-2}n_e - 1,41w_{\rho} + 0,15 \cdot 10^{-2}\mathcal{G}_M n_{uu} - 0,12 \cdot 10^{-2}\mathcal{G}_M n_e - 0,11\mathcal{G}_M w_{\rho} - 0,88 \cdot 10^{-3}n_{uu}w_{\rho} + 0,37 \cdot 10^{-3}n_e w_{\rho} + 0,12\mathcal{G}_M^2 + 0,31 \cdot 10^{-4}n_{uu}^2 + 0,31 \cdot 10^{-5}n_e^2 + 0,044w_{\rho}^2; \quad (51)$$

$$ПК_{ек} = 37,9 - 1,82\mathcal{G}_M - 0,047n_{uu} - 0,11n_e - 1,66w_{\rho} + 0,02\mathcal{G}_M n_{uu} - 0,14\mathcal{G}_M w_{\rho} + 0,14 \cdot 10^{-2}n_{uu}w_{\rho} + 0,27 \cdot 10^{-3}n_e w_{\rho} + 0,28\mathcal{G}_M^2 - 0,22 \cdot 10^{-3}n_{uu}^2 + 0,33 \cdot 10^{-5}n_e^2 + 0,045w_{\rho}^2; \quad (52)$$

Встановлено, що раціональні параметри похилого транспортера ОТТМ за максимальних значень вхідних факторів будуть: $\mathcal{G}_M = 7$ км/год (2,1 м/с), $\varepsilon = 30$ град., $n_m = 150$ об/хв за існуючих параметрів стандартного ряду пруткових транспортерів. При цьому значення коефіцієнтів сепарації (технологічної ефективності роботи) похилого транспортера ОТТМ коренезбиральної машини під час збирання коренеплодів цикорію є такими: $\mu_{30e}^{(Z)} = 65\%$; $\mu_{30e}^{(Z_{11})} = 60\%$; $\mu_{30e}^{(Z_{21})} = 64\%$; $\mu_{30e}^{(Z_{31})} = 70\%$.

На основі аналізу залежностей (рис. 35) встановлено, що розбіжність

- під час збирання цукрових буряків машиною МПК-4, рис. 30:

$$3D_{ku} = 220,4 - 15,78\vartheta_M - 0,32n_{uu} - 0,014n_e - 12,53w_p + 0,014\vartheta_M n_{uu} + 0,33 \cdot 10^{-2} \vartheta_M n_e + 0,57\vartheta_M w_p + 0,3 \cdot 10^{-4} n_{uu} n_e - 0,37 \cdot 10^{-3} n_e w_p - 0,058\vartheta_M^2 + 0,67 \cdot 10^{-3} n_{uu}^2 - 0,74 \cdot 10^{-5} n_e^2 + 0,21w_p^2; \quad (53)$$

$$3D_{eu} = 217,6 - 15,52\vartheta_M - 0,32n_{uu} - 0,97 \cdot 10^{-2} n_e - 12,45w_p + 0,014\vartheta_M n_{uu} + 0,29 \cdot 10^{-2} \vartheta_M n_e + 0,57\vartheta_M w_p + 0,28 \cdot 10^{-4} n_{uu} n_e - 0,36 \cdot 10^{-3} n_e w_p - 0,07\vartheta_M^2 + 0,65 \cdot 10^{-3} n_{uu}^2 - 0,86 \cdot 10^{-5} n_e^2 + 0,21w_p^2; \quad (54)$$

$$HG_{ku} = 14,8 + 1,36\vartheta_M - 0,13 \cdot 10^{-2} n_{uu} - 0,12 \cdot 10^{-2} n_e - 1,55w_p - 0,25 \cdot 10^{-2} \vartheta_M n_{uu} - 0,35 \cdot 10^{-3} \vartheta_M n_e - 0,036\vartheta_M w_p + 0,51 \cdot 10^{-4} n_{uu}^2 + 0,27 \cdot 10^{-5} n_e^2 + 0,04w_p^2; \quad (55)$$

$$HG_{eu} = 12,38 + 1,49\vartheta_M + 0,017n_{uu} + 3,51 \cdot 10^{-3} n_e - 1,58w_p - 2,59 \cdot 10^{-3} \vartheta_M n_{uu} - 3,9 \cdot 10^{-4} \vartheta_M n_e - 0,038\vartheta_M w_p - 1,75 \cdot 10^{-5} n_{uu} n_e + 0,16 \cdot 10^{-4} n_{uu}^2 + 0,04w_p^2; \quad (56)$$

$$PK_{ku} = -103,2 + 36,1\vartheta_M + 0,52n_{uu} - 0,43 \cdot 10^{-2} n_e - 2,77w_p - 0,07\vartheta_M n_{uu} - 0,44 \cdot 10^{-2} \vartheta_M n_e - 0,11\vartheta_M w_p + 0,13 \cdot 10^{-2} n_{uu} w_p + 0,25 \cdot 10^{-3} n_e w_p - 1,77\vartheta_M^2 - 0,34 \cdot 10^{-3} n_{uu}^2 + 0,25 \cdot 10^{-4} n_e^2 + 0,07w_p^2; \quad (57)$$

$$PK_{eu} = 9,5 + 10,5\vartheta_M - 0,09n_{uu} - 0,02n_e - 2,01w_p + 0,02\vartheta_M n_{uu} - 0,13\vartheta_M w_p + 0,13 \cdot 10^{-2} n_{uu} w_p + 0,28 \cdot 10^{-3} n_e w_p - 0,77\vartheta_M^2 - 0,86 \cdot 10^{-4} n_{uu}^2 + 0,93 \cdot 10^{-5} n_e^2 + 0,05w_p^2; \quad (58)$$

На основі аналізу поверхонь відгуку (рис. 36–41) встановлено, що апроксимовані значення показників якості роботи ОТТМ залежно від зміни вхідних факторів (табл. 3, 4) під час збирання крупних коренеплодів змінюються у межах:

- загальні домішки: кормові буряки – від 5,5 до 11,5% (круглі шнеки) та від 3,5 до 10,5% (еліпсні шнеки); цукрові буряки – від 5,5 до 12,5% (круглі шнеки) та від 4,5 до 11,5% (еліпсні шнеки); коренеплоди цикорію – від 6,5 до 15,5%;

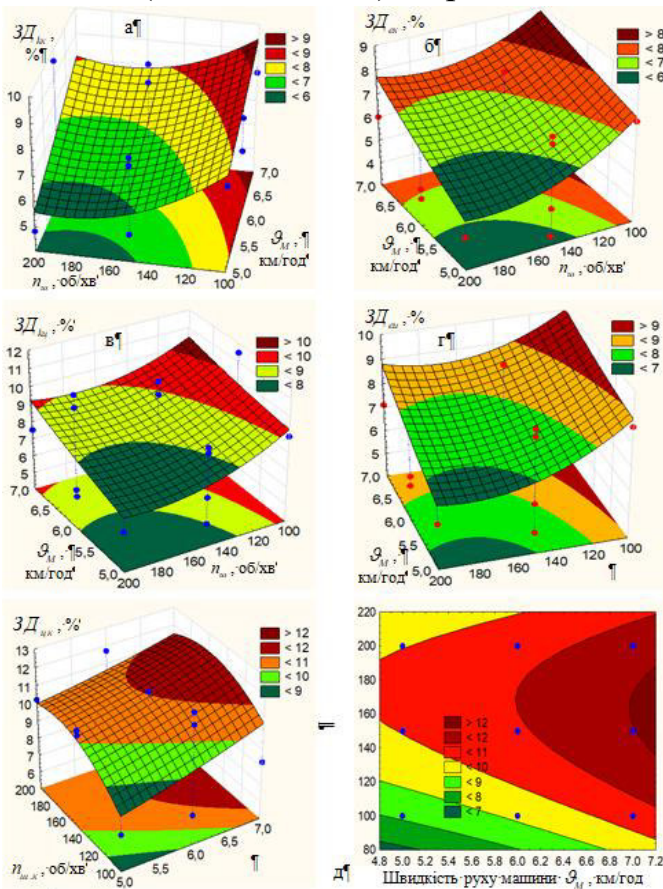


Рис. 36. Поверхня відгуку загальних домішок як функція:

а – $3D_{kk} = f_{3D}(\vartheta_M; n_{uu})$; б – $3D_{ek} = f_{3D}(\vartheta_M; n_{uu})$;

в – $3D_{ku} = f_{3D}(\vartheta_M; n_{uu})$;

г – $3D_{eu} = f_{3D}(\vartheta_M; n_{uu})$; д – $3D_{kk} = f_{3D}(\vartheta_M; n_{u,k})$

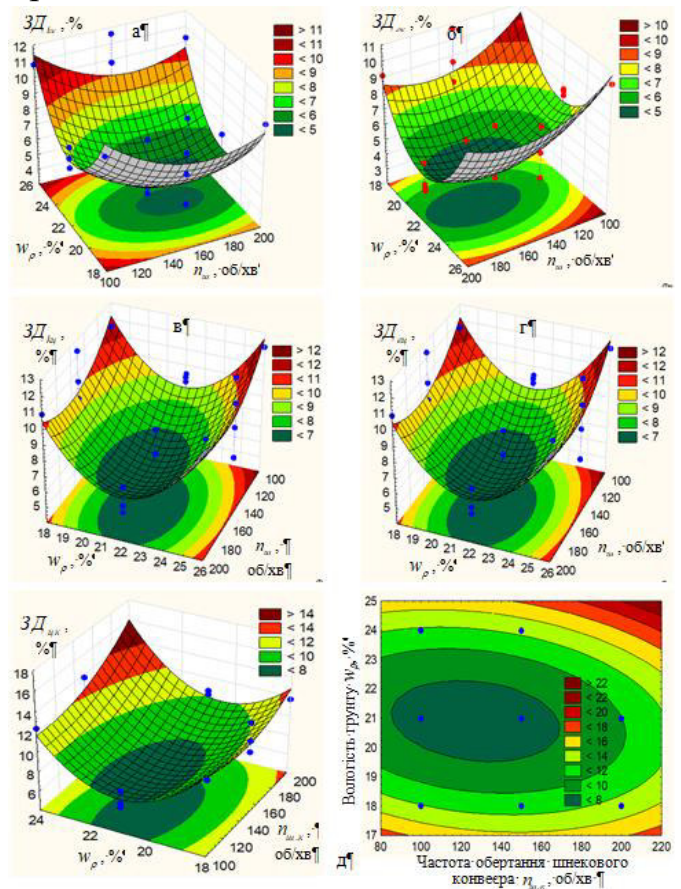


Рис. 37. Поверхня відгуку загальних домішок як функція:

а – $3D_{kk} = f_{3D}(n_{uu}; w_p)$; б – $3D_{ek} = f_{3D}(n_{uu}; w_p)$;

в – $3D_{ku} = f_{3D}(n_{uu}; w_p)$;

г – $3D_{eu} = f_{3D}(n_{uu}; w_p)$; д – $3D_{kk} = f_{3D}(n_{u,k}; w_p)$

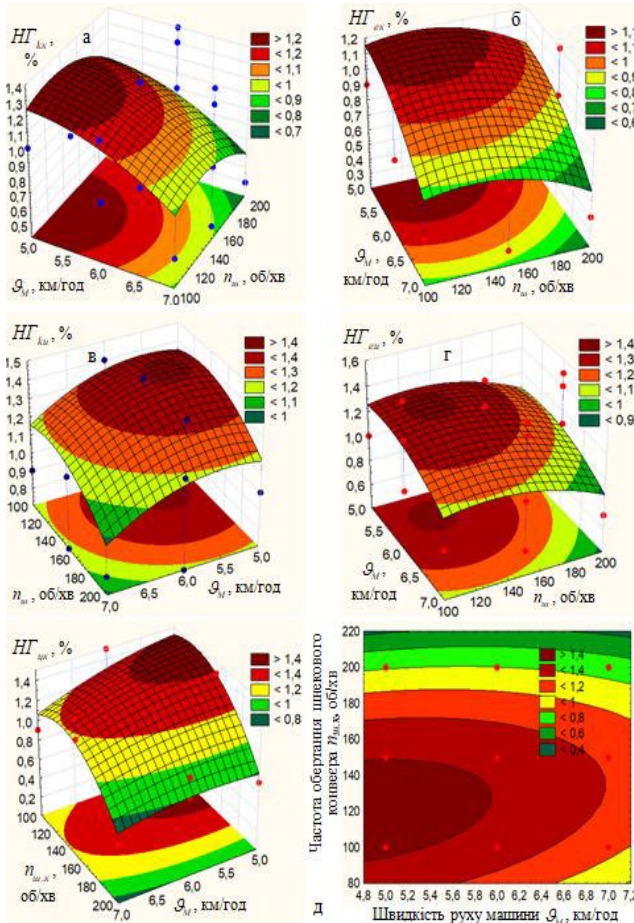


Рис. 38. Поверхня відгуку налиплого ґрунту на коренеплодах як функція:

$$\begin{aligned} \text{а} - HG_{кк} &= f_{HG}(\varrho_M; n_u); & \text{б} - HG_{ек} &= f_{HG}(\varrho_M; n_u); \\ \text{в} - HG_{кц} &= f_{HG}(\varrho_M; n_u); \\ \text{г} - HG_{еу} &= f_{HG}(\varrho_M; n_u); & \text{д} - HG_{цк} &= f_{HG}(\varrho_M; n_u) \end{aligned}$$

- маса налиплого ґрунту: кормові буряки – від 0,5 до 1,6% (шнеки круглого перерізу) та від 4,5 до 1,5% (еліпсні шнеки); цукрові буряки – від 0,6 до 1,8% (шнеки круглого перерізу) та від 0,6 до 1,6% (еліпсні шнеки); коренеплоди цикорію – від 0,3 до 1,6%;

- пошкодження коренеплодів: кормові буряки – від 8 до 16% (шнеки круглого перерізу) та від 10 до 19% (еліпсні шнеки); цукрові буряки – від 8 до 15% (шнеки круглого перерізу) та від 10 до 17% (еліпсні шнеки); коренеплоди цикорію – від 5 до 17%.

Критерієм оптимізації раціональних параметрів робочих органів ОТТМ коренезбиральних машин є оптимальні значення показників якості роботи, тобто $ЗД_i \rightarrow \min$, $HG_i \rightarrow \min$, $ПК_i \rightarrow \min$, які регламентовані агротехнічними вимогами.

За результатами проведених польових досліджень визначено параметри робочих органів ОТТМ, за яких значення показників якості роботи мінімальні.

1. Загальні домішки $ЗД_i \rightarrow \min$:

- кормові буряки $ЗД_{ік} \rightarrow \min$: шнеки круглого перерізу – $ЗД_{кк} \rightarrow \min = 5,5\%$ за швидкості руху ϱ_M машини до 5,5 км/год, частоти обертання шнеків n_{uu} 140...180 об/хв, частоти обертання n_e очисних елементів 650...700 об/хв, вологості ґрунту w_p від 21 до 23%; еліпсні шнеки – $ЗД_{ек} \rightarrow \min = 3,5\%$ за швидкості руху ϱ_M машини до 6,0 км/год, частоти обертання шнеків n_{uu} 130...200 об/хв, частоти обертання n_e очисних елементів 600...700 об/хв, вологості ґрунту w_p від 20 до 22% (рис. 42а);

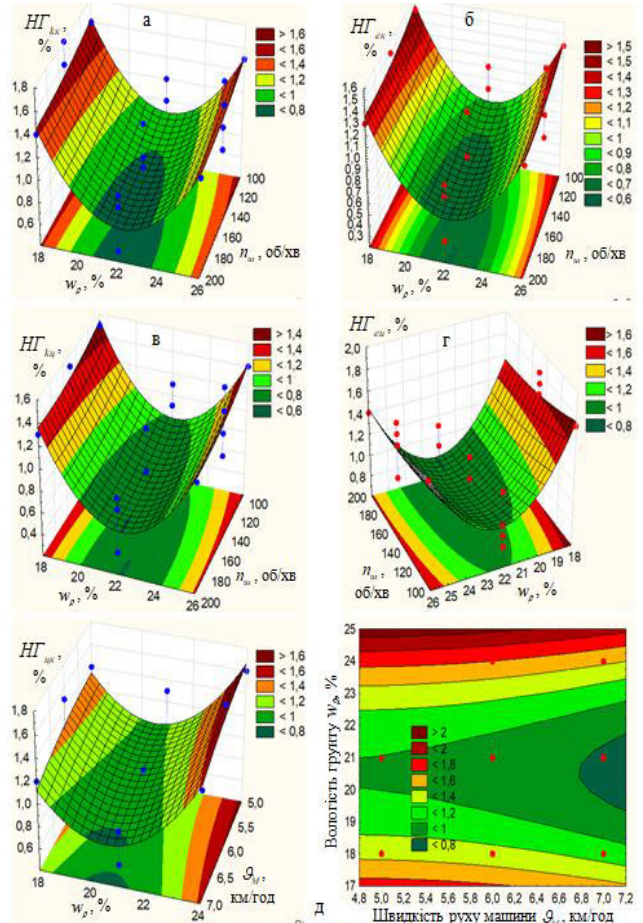


Рис. 39. Поверхня відгуку налиплого ґрунту на коренеплодах як функція:

$$\begin{aligned} \text{а} - HG_{кк} &= f_{HG}(n_u; w_p); & \text{б} - HG_{ек} &= f_{HG}(n_u; w_p); \\ \text{в} - HG_{кц} &= f_{HG}(n_u; w_p); \\ \text{г} - HG_{еу} &= f_{HG}(n_u; w_p); & \text{д} - HG_{цк} &= f_{HG}(n_u; w_p) \end{aligned}$$

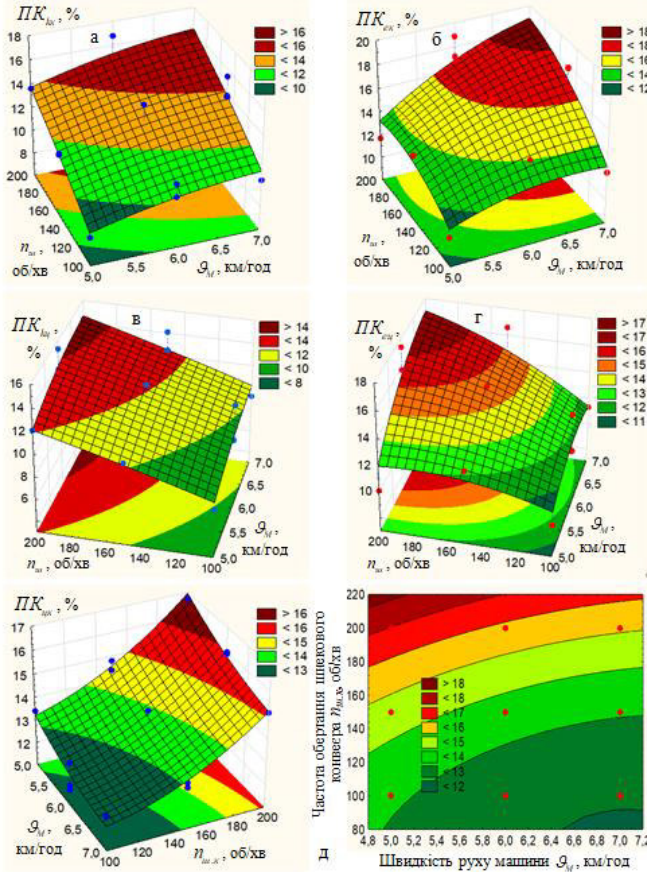


Рис. 40. Поверхня відгуку пошкодження коренеплодів як функція:

$$\begin{aligned} \text{а} - PK_{кк} &= f_{ПК}(\mathcal{Q}_M; n_{ш}); & \text{б} - PK_{ек} &= f_{ПК}(\mathcal{Q}_M; n_{ш}); \\ \text{в} - PK_{ку} &= f_{ПК}(\mathcal{Q}_M; n_{ш}); & \text{г} - PK_{ек} &= f_{ПК}(\mathcal{Q}_M; n_{ш}); \\ \text{д} - PK_{цк} &= f_{ПК}(\mathcal{Q}_M; n_{ш.к}) \end{aligned}$$

- цукрові буряки $3D_{ш} \rightarrow \min$: шнеки круглого перерізу – $3D_{ку} \rightarrow \min = 5,5\%$ за швидкості руху \mathcal{Q}_M машини до 6,0 км/год, частоти обертання шнеків $n_{ш}$ 130...180 об/хв, частоти обертання n_e очисних елементів 650...700 об/хв, вологості ґрунту w_p від 20 до 22%; еліпсні шнеки – $3D_{ек} \rightarrow \min = 3,5\%$ за швидкості руху \mathcal{Q}_M машини до 6,0 км/год, частоти обертання шнеків $n_{ш}$ 120...200 об/хв, частоти обертання n_e очисних елементів 600...700 об/хв, вологості ґрунту w_p від 20 до 22%, рис. 42а;

- коренеплоди цикорію – $3D_{цк} \rightarrow \min = 6,5\%$ за швидкості руху \mathcal{Q}_M машини до 6,0 км/год, частоти $n_{ш.к}$ обертання шнекового конвеєра 100...170 об/хв, вологості ґрунту w_p від 20 до 22% (рис. 42а).

2. Налиплий ґрунт на коренеплодах $НГ_i \rightarrow \min$:

- кормові буряки $НГ_{ік} \rightarrow \min$: шнеки круглого перерізу – $НГ_{кк} \rightarrow \min = 0,6\%$ за швидкості руху \mathcal{Q}_M машини до 5,5 км/год, частоти обертання $n_{ш}$ шнеків 100...160 об/хв, частоти обертання n_e очисних елементів 500...700 об/хв, вологості ґрунту w_p від 20 до 22%; еліпсні шнеки – $НГ_{ек} \rightarrow \min = 0,5\%$ за швидкості руху \mathcal{Q}_M машини до 6,0 км/год, частоти обертання $n_{ш}$ шнеків 100...180 об/хв, частоти обертання n_e очисних елементів 600...700 об/хв, вологості ґрунту w_p 20...22% (рис. 42б);

- цукрові буряки $НГ_{іц} \rightarrow \min$: шнеки круглого перерізу – $НГ_{ку} \rightarrow \min = 0,5\%$ за швидкості руху \mathcal{Q}_M до 6,5 км/год, частоти обертання $n_{ш}$ шнеків 100...200 об/хв і очисних n_e елементів 550...700 об/хв, вологості ґрунту w_p 20...22%, (рис. 42б);

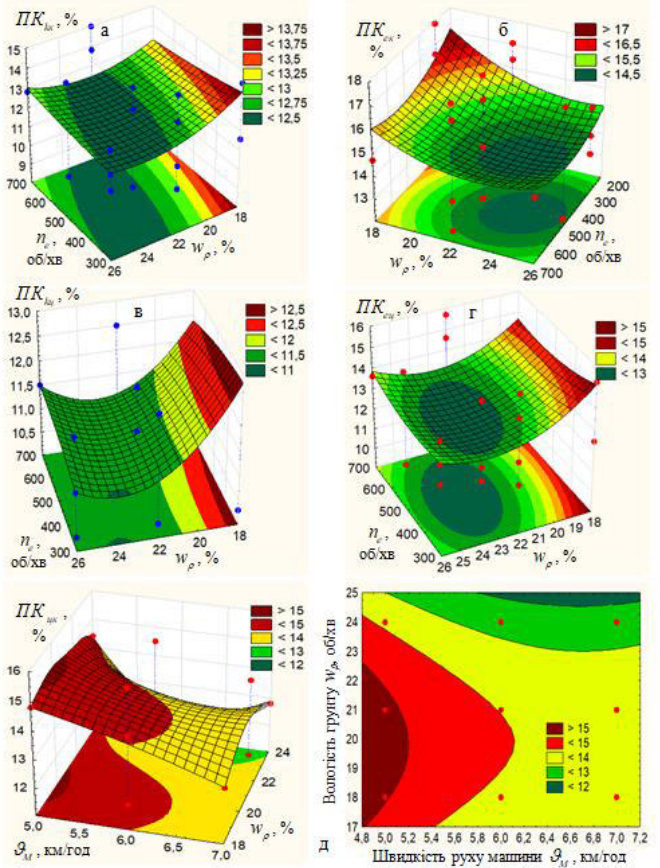


Рис. 41. Поверхня відгуку пошкодження коренеплодів як функція:

$$\begin{aligned} \text{а} - PK_{кк} &= f_{ПК}(n_e; w_p); & \text{б} - PK_{ек} &= f_{ПК}(n_e; w_p); \\ \text{в} - PK_{ку} &= f_{ПК}(n_e; w_p); & \text{г} - PK_{ек} &= f_{ПК}(n_e; w_p); \\ \text{д} - PK_{цк} &= f_{ПК}(\mathcal{Q}_M; w_p) \end{aligned}$$

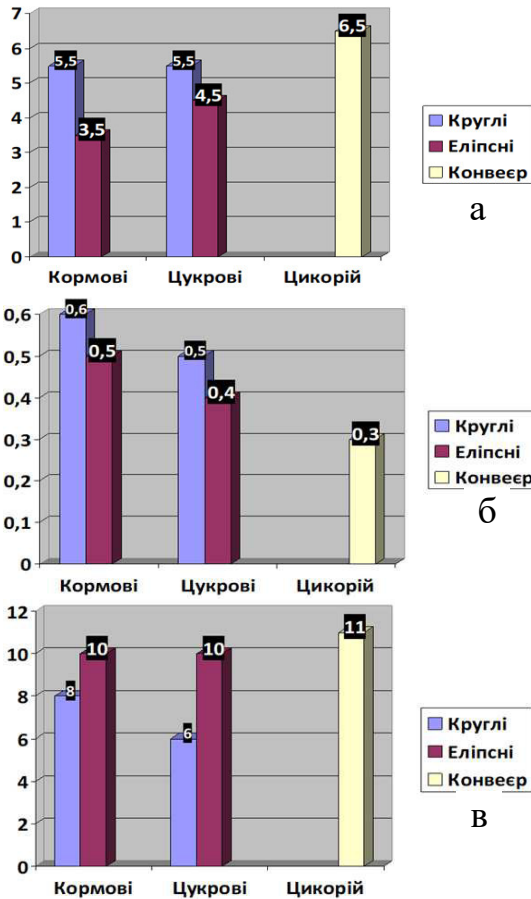


Рис. 42. Діаграма мінімальних значень: а – загальних домішок ($ЗД_i \rightarrow \min$, %); б – налиплого ґрунту ($НГ_i \rightarrow \min$, %); в – пошкодження коренеплодів ($ПК_i \rightarrow \min$, %)

20 до 22%; еліпсні шнеки – $ПК_{ек} \rightarrow \min = 10,0\%$ за швидкості руху \mathcal{G}_M машини до 5,5 км/год, частоти обертання $n_{ш}$ шнеків 100...120 об/хв, частоти обертання n_e очисних пружних елементів 300...700 об/хв, вологості ґрунту w_p від 20 до 22%, рис. 42в;

- коренеплоди цикорію – $ПК_{цк} \rightarrow \min = 11,0\%$ за швидкості руху \mathcal{G}_M машини до 7,0 км/год, частоти обертання $n_{ш.к}$ шнекового конвеєра 100...150 об/хв, вологості ґрунту w_p від 20 до 22%, рис. 42в.

Проте значення параметрів робочих органів ОТТМ і швидкості руху \mathcal{G}_M коренезбиральної машини, за яких показники якості їх роботи під час збирання крупних коренеплодів є мінімальними з умови $ПЯ_i \rightarrow \min$ будуть забезпечувати необхідну пропускну здатність ОТТМ, або необхідну продуктивність роботи збирального комплексу, або продуктивність W_M коренезбиральної машини, яка регламентує ефективність техніко-економічних показників доцільності її виробничого застосування.

На основі аналізу отриманих результатів апроксимованих значень згідно з емпіричними моделями (45)-(56) та графічною інтерпретацією результатів функціональної зміни показників якості роботи ОТТМ і врахуванням впливу всіх діючих факторів встановлено, що максимально допустимі значення функції, або показника якості роботи згідно з агротехнічними вимогами (загальних домішок $ЗД_i \leq 8,0\%$ (кормові та цукрові буряки), $ЗД_{цк} \leq 6,0\%$ (коренеплоди цикорію), маси

- еліпсні шнеки – $НГ_{ец} \rightarrow \min = 0,4\%$ за швидкості руху \mathcal{G}_M машини до 6,5 км/год, частоти обертання $n_{ш}$ шнеків 100...200 об/хв, частоти обертання n_e очисних елементів 650...700 об/хв, вологості ґрунту w_p від 20 до 22%, рис. 42б;

- коренеплоди цикорію – $НГ_{цк} \rightarrow \min = 0,3\%$ за швидкості руху \mathcal{G}_M машини до 6,0 км/год, частоти обертання шнекового конвеєра 180...200 об/хв, вологості ґрунту від 20 до 22%, рис. 42б.

3. Пошкодження коренеплодів $ПК_i \rightarrow \min$:

- кормові буряки $ПК_{ік} \rightarrow \min$: шнеки круглого перерізу – $ПК_{кк} \rightarrow \min = 8,0\%$ за швидкості руху \mathcal{G}_M машини до 5,5 км/год, частоти обертання $n_{ш}$ шнеків 100...120 об/хв, частоти обертання n_e очисних елементів 300...700 об/хв, вологості ґрунту w_p від 20 до 22%; еліпсні шнеки – $ПК_{ек} \rightarrow \min = 10\%$ за швидкості руху \mathcal{G}_M машини до 5,0 км/год, частоти обертання $n_{ш}$ шнеків 100...110 об/хв, частоти обертання n_e очисних елементів 300...700 об/хв, вологості ґрунту w_p від 20 до 22%, рис. 42в;

- цукрові буряки: шнеки круглого перерізу – $ПК_{кк} \rightarrow \min = 6,0\%$ за швидкості руху \mathcal{G}_M машини до 6,5 км/год, частоти обертання $n_{ш}$ шнеків 100...150 об/хв, частоти обертання n_e очисних елементів 300...700 об/хв, вологості ґрунту w_p від

налиплого ґрунту $НГ_i \leq 1,5\%$ (кормові та цукрові буряки), $НГ_{цк} \leq 1,0\%$ (коренеплоди цикорію) та пошкодження коренеплодів $ПК_i \leq 15,0\%$ (кормові та цукрові буряки), $ПК_{цк} \leq 10,0\%$ (коренеплоди цикорію), отримано за таких значень вхідних факторів:

- кормові та цукрові буряки: для шнеків круглого перерізу: частоти обертання $n_{ш}$ шнеків 150...160 об/хв; частоти обертання n_e пружних елементів 500...700 об/хв; вологості ґрунту w_p 20...22%; швидкості руху машини до 5...6 км/год; для еліптичних шнеків: частоти обертання $n_{ш}$ шнеків 120...160 об/хв; частоти обертання n_e очисних елементів 500...700 об/хв; вологості ґрунту w_p 20...22%; швидкості руху машини до 6...7 км/год;

- коренеплоди цикорію: частоти обертання $n_{ш.к}$ шнекового конвеєра 140...150 об/хв; вологості ґрунту w_p 20...22%; швидкості руху коренезбиральної машини до 6...7 км/год.

Під час проведення порівняльних польових досліджень на першому етапі провели дослідження процесу роботи ОТТМ:

- на операції збирання кормових буряків коренезбиральною машиною ММК-6А з якої було демонтовано комбінований робочий орган IV, рис. 26 (базовий варіант);

- на операції збирання цукрових буряків коренезбиральною машиною МПК-4 з якої було демонтовано приводний очисний вал 5, рис. 28 (базовий варіант);

- на операції збирання коренеплодів цикорію причіпною трирядною коренезбиральною машиною з якої було демонтовано очисні пружні елементи 5 (рис. 24) (базовий варіант).

У подальшому визначали агротехнічні показники якості роботи запропонованої компоновальної схеми ОТТМ і, на основі порівняльної характеристики показників якості роботи модернізованої і базової коренезбиральної машини, визначали загальну технологічну ефективність ОТТМ і її окремих робочих органів.

Швидкість руху модернізованої і базової машини була однаковою та становила 1,6 м/с у всіх випадках реалізації польових порівняльних досліджень, які провели впродовж одного дня та в однакових ґрунтово-кліматичних умовах.

Результати агротехнічних показників якості виконання технологічного процесу порівнюваних коренезбиральних машин під час збирання крупних коренеплодів наведено у табл. 5.

За результатами порівняльних досліджень агротехнічних показників якості роботи коренезбиральних машин під час збирання крупних коренеплодів встановлено, що кількість загальних домішок із застосуванням ОТТМ порівняно з базовою машиною зменшується приблизно в 1,9 рази (4,6% проти 8,7% у базової) під час збирання кормових буряків, у 1,2 рази (5,0% проти 5,9% у базової) під час збирання коренеплодів цукрових буряків і в 1,2 рази (6,1% проти 6,9% у базової) під час збирання коренеплодів цикорію.

На основі проведеного аналізу порівняльних польових досліджень модернізованої та базової машини можна стверджувати, що використання розробленого ОТТМ у складі коренезбиральних машин забезпечує значне підвищення ефективності процесу відокремлення домішок від коренеплодів і є перспективним напрямком для подальшого удосконалення технологічного процесу збирання крупних коренеплодів.

У сьомому розділі «Узагальнені результати конструктивно-технологічної ефективності математичного моделювання наукових досліджень» наведено енергетичну оцінку очисних транспортно-технологічних модулів, економічну ефективність застосування очисних транспортно-технологічних модулів у складі коренезбиральних машин та подано рекомендації їх застосування на виробництві.

Таблиця 5. Показники якості виконання технологічного процесу збирання крупних коренеплодів при проведенні польових порівняльних досліджень

Найменування показників	Значення показників						АТВ
	Кормові		Цукрові		Цикорій		
	М	Б	М	Б	М	Б	
Робоча швидкість руху, м/с	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Глибина підкопування:							
- середня, см	9,0	9,0	9,2	9,2	11,5	11,5	-
- середньоквадратичне відхилення, ± см	0,85	0,85	0,95	0,95	0,81	0,81	-
Якість підкопування і підбору коренеплодів, %:							
- зібрано машиною	98,7	98,7	98,9	98,9	97,3	97,3	
- втрати, всього	1,3/	1,3/	1,1/	1,1/	/2,7	/2,7	1,5/2,5
у тому числі:							
- невикопаних коренеплодів	0,4/	0,4/	0,3/	0,3/	/2,1	/2,1	1,0/2,0
- на поверхні ґрунту	0,3	0,4	0,4	0,6	0,3	0,4	-
- присипаних ґрунтом	0,6	0,5	0,4	0,2	0,3	0,2	-
Склад вороху зібраних коренеплодів, %:							
- коренеплоди	95,4	90,9	95,0	94,1	95,6	92,2	
- домішки, всього	4,6	8,7	5,0	5,9	6,1	6,9	8,0
у тому числі:							
- вільного ґрунту	1,3	3,2	1,1	1,5	1,5	1,8	5,0
- налиплого ґрунту на коренеплодах	0,9	1,7	1,5	1,9	1,0	1,4	1,5
- рослинних решток, всього	2,4	3,8	2,4	2,5	3,6	3,8	3,0
у тому числі:							
- вільної гички та бур'янів	0,8	1,2			2,5	2,6	
- залишків гички на головках коренеплодів	1,6	2,6			1,1	1,2	0,5
Пошкодження коренеплодів, %:							
- всього	/9,4	/9,7	/9,8	/9,4	/22,5	/22,5	15/20
у тому числі:							
- сильнопошкоджених	3,7	3,5	3,7	3,7	/11,5	/11,5	8/9

Після обробки експериментального масиву даних отримано рівняння регресії в натуральних величинах, які характеризують зміну витрат споживаної потужності для шнеків круглого перерізу: очисної гірки P_z , кВт; шнеків P_{ku} , кВт; сумарних витрат споживаної потужності $\sum P_{(z+ku)}$, кВт; витрат споживаної потужності P_{kp} , кВт; сумарних витрат споживаної потужності ОТТМ $\sum P_{кОТТМ}$, кВт

$$\left. \begin{aligned} P_z &= -2,23 - 0,58g_M + 0,07n_{uu} - 0,0005g_M n_{uu} + 0,07g_M^2 + 0,0002n_{uu}^2; \\ P_{ku} &= -3,14 + 1,58g_M + 0,01n_{uu} - 0,11g_M^2 + 7,67 \cdot 10^{-5} n_{uu}^2; \\ \sum P_{(z+ku)} &= -5,37 + 1,0g_M + 0,06n_{uu} - 0,0005g_M n_{uu} - 0,04g_M^2 - 8,67 \cdot 10^{-5} n_{uu}^2; \\ P_{kp} &= -1,61 - 1,08g_M + 0,004n_{uu} - 0,0005g_M n_{uu} - 0,07g_M^2 + 4,33 \cdot 10^{-5} n_{uu}^2; \\ \sum P_{кОТТМ} &= -3,96 + 0,53g_M + 0,07n_{uu} - 0,0005g_M n_{uu} - 0,01g_M^2 - 0,0001n_{uu}^2 \end{aligned} \right\}. \quad (59)$$

За результатами аналізу графічних моделей констатовано наступні положення:

- апроксимовані значення витрат споживаної потужності P_z становлять від 1,15 до 2,65 кВт та пропорційно зростають залежно від збільшення швидкості руху машини в межах $5 \leq g_M \leq 7$ км/год за рахунок зростання секундної подачі вороху

$\sum_{i=1}^2 Q_{ie}$, або збільшення масового навантаження ворохом робочої гілки очисної гірки.

За результатами обробки експериментального масиву даних витрат споживаної потужності робочих органів ОТТМ для еліптичних шнеків встановлено, що витрати споживаної потужності при застосуванні еліптичних шнеків зростають порівняно з шнеками круглого перерізу в межах 0,3...0,5 кВт (рис. 43).

Встановлено, що максимальне значення загальних витрат споживаної потужності холостого ходу, які необхідні лише на привод робочих органів ОТТМ в обертальний рух, тобто за відсутності подачі вороху на МВК і, відповідно, на робочі органи ОТТМ, становлять 0,9 кВт, відповідно на привод гірки – 0,2 кВт, шнеків круглого перерізу – 0,25 кВт, еліптичних шнеків – 0,3 кВт, очисного вала – 0,15 кВт, комбінованого робочого органу для шнеків круглого перерізу – 0,4 кВт, комбінованого робочого органу для еліптичних шнеків – 0,45 кВт.

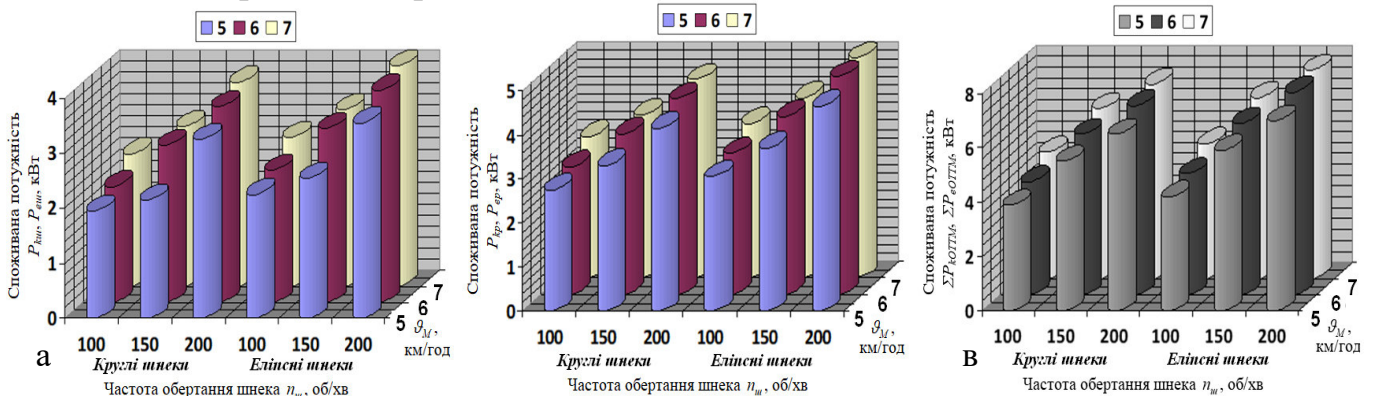


Рис. 43. Діаграма витрат споживаної потужності:

а – P_{kin} і P_{ein} ; б – P_{kr} і P_{ep} ; в – $\sum P_{кОТТМ}$ і $\sum P_{еОТТМ}$

При максимальній подачі вороху, яка відповідає одночасному викопуванню 4-х рядків цукрових буряків, сумарні витрати споживаної потужності ОТТМ становлять 7,15 кВт.

За результатами експериментальних досліджень витрат споживаної потужності, необхідної на виконання технологічного процесу відокремлення домішок від коренеплодів робочими органами ОТТМ, встановлено, що в порівнянні з базовою машиною МПК-4 загальні витрати потужності модернізованої машини збільшуються в середньому на 2,5%.

Використання ОТТМ у складі коренезбиральної машини є раціональним в умовах надмірної вологості ґрунту за погіршених природно-кліматичних умов роботи коренезбиральних машин. Річний економічний ефект від застосування складає 188482,6 грн.

У контексті отриманих результатів досліджень рекомендовані такі основні параметри робочих органів ОТТМ для виробництва: швидкість руху: коренезбиральної машини – 7 км/год; горизонтального та похилого транспортера – 1,6 м/с; діаметр шнекового конвеєра – 0,6 м; діаметр шнеків (круглі/еліптичні) – 0,2/0,18 м; частота обертання шнекового конвеєра та шнеків – 180 об/хв; кут встановлення гірки – 55 град.; швидкість руху гірки – 1,3 м/с; частота обертання очисних елементів – 700 об/хв.

Розроблені транспортно-технологічні модулі, яким є запропоновані ОТТМ, доцільно застосовувати для модернізації очисних систем існуючих причіпних (начіпних) 3-х, 4-х та 6-ти рядних коренезбиральних машин і підбирачів-навантажувачів, які реалізують двофазний (прямий або валковий) спосіб збирання коренеплодів різними типами машин.

ОТТМ з еліптичними шнеками доцільно застосовувати під час збирання крупних коренеплодів за технологією, коли зібрані коренеплоди будуть доставлятися безпосередньо з поля для підготовки сировини для її прямої переробки на підприємствах, тобто коли зібрані коренеплоди не підлягають зберіганню.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У дисертаційній роботі наведено нове узагальнене вирішення наукової проблеми підвищення показників якості роботи збирання крупних коренеплодів шляхом розроблення наукової концепції та механіко-технологічної моделі інтенсифікації функціонального процесу відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів і оптимізації параметрів робочих органів очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин.

1. Алгоритм розроблення очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин, на робочі органи яких надходить значна кількість домішок (грунту – до 80...90%, у тому числі налиплого ґрунту – до 3...5%; рослинних домішок – до 10...15%, залишків гички на головках коренеплодів – до 5...10% відносно сумарних загальних домішок), базується на основі наукової концепції та математичного моделювання технологічного процесу інтенсифікації відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів, який функціонально пов'язаний з необхідністю значного відокремлення різних за своїми фізико-механічними властивостями ґрунтових і рослинних домішок, які перебувають у вільному та пов'язаному станах відносно коренеплодів.

2. Підвищення ефективності збирання крупних коренеплодів, або інтенсифікація процесу відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів значною мірою залежить від подальшого поглиблення та розвитку загальної концепції побудови раціональних конструктивно-компонувальних схем сучасних коренезбиральних машин і їх структурних складових, або транспортно-технологічних модулів, які забезпечують послідовність виконання основних операцій збирання коренеплодів.

3. В основу розроблення процесу інтенсифікації відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів покладено метод і принцип динамічного моделювання Беллмана та реалізації багатостадійної оптимізації за методом академіка Л. Погорілого, які реалізовані послідовністю виконання технологічних постадійних n -х операцій окремим робочим органом з транспортним запізненням переміщення вороху в різних умовах роботи коренезбиральних машин. При цьому запропоновано метод розроблення математичної моделі, яка функціонально описує поетапний процес відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів залежно від часу знаходження складових структурних компонентів домішок на кожній q -й ділянці кожного j -го робочого органу складних динамічних транспортно-очисних систем вороху коренезбиральних машин.

4. Встановлено, що мінімально необхідна робоча довжина похилого транспортера, яка забезпечує технологічну стійкість роботи, повинна бути більша або дорівнювати від 0,1 до 1,5 м залежно від зміни робочої швидкості руху похилого транспортера від 0,7 до 2,1 м/с, або швидкості руху вороху в межах від 0 до 1,9 м/с. При цьому секундна подача чистих коренеплодів до першої ділянки (1) похилого транспортера знаходиться в середніх межах від 8 до 15 кг/с за зміни діаметра коренеплодів від 0,15 до 0,2 м і довжини коренеплодів, що дорівнює 0,2 м, а секундна подача домішок знаходиться в середніх межах від 30 до 40 кг/с за зміни урожайності гички від 0,6 до 1,2 кг/м² (60-120 ц/га) й урожайності коренеплодів 2,5 кг/м².

5. У межах зміни секундної подачі коренеплодів від 8 до 14 кг/с швидкість руху будь-якої k -ї ділянки робочої гілки похилого транспортера збільшується, приблизно в 2 рази та повинна бути більше або дорівнювати: для першої (1) ділянки – від 0,96 до 1,96 м/с; для другої (2) ділянки – від 0,83 до 1,69 м/с; для k -ї ділянки – від 0,8 до 1,55 м/с. Збільшення коефіцієнта сепарації домішок від 0,5 до 0,8 призводить до зменшення необхідної швидкості руху відповідно кожної k -ї ділянки робочої гілки похилого транспортера: для першої (1) ділянки – приблизно в 1,5 рази; для другої (2) ділянки – приблизно в 1,2 рази; для k -ї ділянки – приблизно в 1,1 рази.

6. Встановлено, що теоретична дальність польоту коренеплодів цикорію з похилого транспортера до очисної гірки за зміни кута встановлення похилого транспортера від 20 до 40 град. знаходиться в межах: для коренеплодів масою 0,35 кг – від 0,6 до 1,2 м; для коренеплодів масою 0,5 кг – від 0,55 до 1,15 м, для

коренеплодів масою 0,65 кг – від 0,5 до 0,95 м. При цьому адекватна зміна апроксимованих значень дальності польоту коренеплодів цикорію у межах частоти обертання приводного вала похилого транспортера від 90 до 150 об/хв знаходиться в діапазоні: від 0,7 до 1,4 м для коренеплодів масою 0,35 кг; від 0,7 до 1,3 м для коренеплодів масою 0,5 кг; від 0,4 до 1,0 м для коренеплодів масою 0,65 кг, а розбіжність теоретичних і апроксимованих експериментальних значень дальності польоту коренеплоду знаходиться в межах 6...15%.

7. З умови забезпечення максимально допустимої пружності на вигин очисних пружних елементів встановлено, що залежно від зміни діаметра приводного вала в діапазоні 0,4...0,6 м та діаметра очисних пружних елементів 2...6 мм максимальні значення допустимої результуючої сили процесу відокремлення налиплого ґрунту з поверхні тіла коренеплодів знаходяться в середніх межах від 280 до 400 Н, допустима максимальна кутова швидкість очисних пружних елементів – від 20 до 80 рад/с.

8. Встановлено, що за зміни швидкості руху коренезбиральної машини в межах від 5 до 7 км/год, кута встановлення від 10 до 30 град та частоти обертання приводного вала похилого транспортера від 90 до 150 об/хв загальний коефіцієнт та коефіцієнти сепарації загальних домішок першої, другої та третьої ділянок становлять, відповідно, від 54 до 72 %, від 52 до 67 % та від 54 до 71 %. Раціональні параметри похилого транспортера досягаються за максимальних значень вхідних факторів: швидкості руху коренезбиральної машини 7 км/год (2,1 м/с), кута встановлення похилого транспортера до горизонту 30 град., частоти обертання приводного вала похилого транспортера 150 об/хв за існуючих параметрів стандартного пруткового транспортера: ширини пруткового транспортера 0,9 м, діаметра прутків 0,025 м, зазору між прутками 0,045 м.

9. Значення коефіцієнтів технологічної ефективності роботи, або загального коефіцієнта та коефіцієнтів сепарації загальних домішок першої, другої та третьої ділянок похилого транспортера становлять 65%, 60% та 70% відповідно, а розбіжність теоретичних та експериментальних значень коефіцієнта сепарації загальних домішок знаходиться в межах 10...15%.

10. Максимально допустимі значення показників якості роботи згідно з агротехнічними вимогами отримано за таких компромісних значень вхідних факторів: кормові та цукрові буряки: для шнеків круглого перерізу: частоти обертання шнеків 150...160 об/хв; частоти обертання пружних елементів 500...700 об/хв; вологості ґрунту 20...22%; швидкості руху коренезбиральної машини – до 5...6 км/год; для еліпсних шнеків: частоти обертання шнеків 120...160 об/хв; частоти обертання пружних елементів 500...700 об/хв; вологості ґрунту 20...22%; швидкості руху коренезбиральної машини – до 6...7 км/год; коренеплоди цикорію: частоти обертання шнекового конвеєра 140...150 об/хв; вологості ґрунту 20...22%; швидкості руху коренезбиральної машини – до 6...7 км/год.

11. На основі порівняльного аналізу показників якості виконання технологічного процесу збирання крупних коренеплодів встановлено, що кількість загальних домішок із застосуванням ОТТМ порівняно з базовою машиною зменшується в 1,9 раза (4,6% проти 8,7% у базовій) під час збирання кормових буряків, у 1,2 раза (5,0% проти 5,9% у базовій) під час збирання цукрових буряків і в 1,2 раза (6,1% проти 6,9% у базовій) під час збирання цикорію, при цьому загальні домішки у зібраних коренеплодах зменшилися у середньому в 1,4 раза, у тому числі: вільні ґрунтові домішки – у середньому в 1,7 раза; налиплий ґрунт на поверхні тіла коренеплодів – у середньому в 1,5 раза.

12. Апроксимовані значення сумарних витрат споживаної потужності ОТТМ для шнеків круглого перерізу становлять від 3,9 до 7,15 кВт, а для еліпсних шнеків зростають порівняно з шнеками круглого перерізу в межах 0,3...0,5 кВт.

13. Річний економічний ефект від застосування очисних транспортно-технологічних модулів у складі коренезбиральної машини складає 188482,6 грн. Застосування ОТТМ найбільш раціональне під час збирання крупних коренеплодів в умовах надмірної вологості ґрунту за погіршення природно-кліматичних умов під час роботи коренезбиральних машин.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні результати дисертаційної роботи

1. Lyashuk Oleg. Investigation of the bulk material movement kinematics in conical screw conveyor / Andrii Diachun, Ihor Tkachenko, Mykola Stashkiv, Andrii Babii, **Maria Pankiv**, Zhanna Babiak et al. INMATEH – Agricultural Engineering. 2024. Vol. 74. Iss. 3. P. 724. (**Scopus**). DOI: <https://doi.org/10.35633/inmate-74-65>.
2. Baranovsky Viktor. Theoretical-experimental investigations of the second serve of the root crop pile components / Baranovsky Viktor, **Maria Pankiv**, Jan Jobbagy, Sergey Marynenko, Roman Komar. Acta Technologica Agriculturae. 2023. Vol. 26. Issue 1/2023. P. 49 – 58. (**Scopus**).
3. Pidgurskyi Mykola, Gerasymchuk Halina, **Pankiv Maria**. Theoretical studies of the technological process of harvesting chicory root crops. Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. 2023. Vol. 111. No 3. P. 139 – 151. (**Фахове видання України**). https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2023.03.
4. Viktor Baranovsky, **Maria Pankiv**, Oleksiy Kukhar, Oleg Gurik. Results of the experimental investigations of fodder beets harvesting technologies. Scientific journal of TNTU. Tern.: TNTU, 2022. Vol. 105. No 2. P. 6–16. (**Фахове видання України**). https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2022.02.
5. **Pankiv Maria**. Method of step-by-step development of a mathematical model of the process of separating impurities from root crops / Maria Pankiv, Mykola Pidhurskyi, Mykhailo Pylypets, Myroslav Burda. Scientific Journal of TNTU. Tern.: TNTU, 2021. Vol. 104. No 4. P. 74 – 86. (**Фахове видання України**). https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.04.
6. Барановський В.М. Технологічні аспекти процесів роботи гичкозбиральних модулів : монографія / В.М. Барановський, Є.Б. Береженко, **М.Р. Паньків**, Б.М. Береженко, В.А. Бойко. Тернопіль: Ред.-вид. відділ ТНТУ ім. І. Пулюя, 2021. 294 с.
7. Baranovsky Viktor. Research of a contact impact of a root crop with a screw auger / Viktor Baranovsky, Olena Truchanska, **Maria Pankiv**, Valentina Bandura. Research in Agricultural Engineering (RAE). 2020. No. 66 (2020). P. 33 – 42. (**Scopus**). <https://doi.org/10.17221/75/2017-RAE>.
8. **Pankiv V.**, Pidhurskyi M. Experimental studies of quality indicators of the transport cleaning system. Innovative Solutions In Modern Science. 2020. № 6(42). P. 177 – 187. (**Рецензоване зарубіжне періодичне видання країн ОЕСР. Google Scholar, Index Copernicus**). DOI: 10.26886/2414-634X.6(42)2020.10
9. **Марія Паньків**, Микола Підгурський. Результати експериментальних досліджень транспортно-очисних систем вороху коренеплодів. Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження. 2020. № 24. С. 44 – 52. (**Фахове видання України**). <https://doi.org/10.31734/agroengineering2020.24.045>.
10. Pankiv M. Mathematical model of the process of interaction of cleaning elements with the biggest soil on roots. 2019. No. 9(36). С. 50 – 60. (**Рецензоване зарубіжне періодичне видання країн ОЕСР. Google Scholar, Index Copernicus**). DOI: 10.26886/2414-634X.9(36)2019.3
11. **Pankiv M.R.**, Pankiv V.R. Coefficient of kinematic interaction of root crops with the auger reef. Materialele Simpozionului Științific Internațional «Realizări și perspective în ingineria agrară și transport auto», dedicat aniversării a 85 de ani de la fondarea Universității Agrare de Stat din Moldova. Chișinău : UASM, 2018. Vol. 51. P. 58 – 64.
12. Барановський В.М., Підгурський М.І., **Паньків М.Р.** Технологічні аспекти розроблення модулів транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин. Вісник ЛНАУ : агроінженерні дослідження. 2018. № 22. С. 65 – 76. (**Фахове видання України**). DOI: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2018.01.065>

13. Baranovsky V.M. Chicory root crops combined harvester / V.M. Baranovsky, **M.R. Pankiv**, O.Yu. Skalsky, A.S. Pastushenko. INMATEH – Agricultural Engineering. 2017. Vol. 53. No. 3/2017. P. 41 – 50. (**Scopus, Web of Science**).

14. Baranovsky V., **Pankiv M.**, Dubchak N. Experimental research of stripping the leaves from root crops. Acta Technologica Agriculturae. 2017. Vol. 20. Is. 3 (Sep 2017). P. 69 – 73. (**Scopus**). <https://doi.org/10.1515/ata-2017-0014>.

15. Труханська О.О. Комбінована транспортно-очисна система вороху коренезбиральних машин : монографія / О.О. Труханська, В.М. Барановський, **М.Р. Паньків**, А.Ю. Виговський. К.: ЦП «Компрінт», 2017. 248 с.

16. Барановський В. Результати експериментальних досліджень коефіцієнта проходження коренеплодів / В. Барановський, **М. Паньків**, В. Теслюк, В. Онищенко. Вісник ЛНАУ : агроінженерні дослідження. 2017. № 21. С. 58 – 69. (**Фахове видання України**).

17. Baranovsky V.M., **Pankiv M.R.**, Potapenko M.V. Mathematical model of functioning of conveying and cleaning system. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ, 2017. Вип. 262. С. 314 – 322. (**Фахове видання України**).

18. **Pankiv M.R.**, Tesluk V.V., Baranovskij V.M. Investigation of the structural model of adapted machine for harvesting root crops. Innovative solutions in modern science. 2016. No. 8(8).P. 70 – 80. (**Рецензоване зарубіжне періодичне видання ОЕСР, Google Scholar, Index Copernicus**).

19. Барановський В.М. Енергоощадний спосіб збирання гички коренеплодів / Барановський В.М., **Паньків М.Р.**, В.В.Теслюк, Ч.В. Пулька. Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК». Вінниця : ВНАУ, 2016. № 3 (95). С. 21 – 26. (**Фахове видання України**).

20. Барановський В.М. Основи розроблення комбінованих очисних систем коренезбиральних машин : монографія / В.М. Барановський, Н.А. Дубчак, В.В. Теслюк, **М.Р. Паньків**, В.Б. Онищенко. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2015. 176 с.

21. Pankiv M.R. Deterministic mathematical model of movement of root crops by a conveyor scraper. Chisinau: State Agrarian University of Moldova. Collection of scientific papers. 2015. T. 45. P. 58 – 61.

22. Барановський В.М., Підгурський М.І., **Паньків М.Р.** Методологічні та конструктивно-технологічні аспекти розроблення адаптованих коренезбиральних машин. Вісник Тернопільського національного технічного університету. Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2014. № 2 (74). С. 106 – 113. (**Фахове видання України**).

23. Паньків М.Р. Процес інтенсифікації очищення вороху коренеплодів. Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». 2014. Вип. 196. Ч. 1. С. 303 – 309. (**Фахове видання України**).

24. Дубчак Н.А, Барановський В.М., **Паньків М.Р.** Результати порівняльних досліджень очисної системи вороху коренеплодів. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. Вінниця : ВНАУ, 2012. Вип. 11. Т. 1 (65). С. 141 – 146. (**Фахове видання України**).

25. **Паньків М.Р.**, Барановський В.М., Рамш В.Ю. Дослідження продуктивності комбінованого очисника вороху коренеплодів. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2012. Вип. 121. С. 102–109. (**Фахове видання України**).

26. Рамш В.Ю., Барановський В.М., **Паньків М.Р.** Результати експериментальних досліджень показників якості роботи очисника. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. Вінниця : ВНАУ, 2012. Вип. 11. Т. 2 (66). С. 255 – 259. (**Фахове видання України**).

27. Герасимчук Г.А. Аналіз тенденцій розвитку робочих органів для сепарації вороху коренеплодів / Г.А. Герасимчук, В.М. Барановський, **М.Р. Паньків**, В.Ю. Рамш. Наукові нотатки. Луцьк : ЛНТУ, 2011. Вип. 21. Т. 1. С. 119 – 123. (**Фахове видання України**).

28. Барановський В.М., **Паньків М.Р.**, Герасимчук Г.А. Обґрунтування основних параметрів комбінованого однодискового копача коренеплодів. Зб. наук. праць ВНАУ. 2011. № 6. С. 29 – 36. **(Фахове видання України).**

29. Рамш В.Ю. Технологічний розрахунок подачі вороху до очисника / В.Ю. Рамш, В.М. Барановський, М.І. Підгурський, **М.Р. Паньків.** Збірник наукових праць ВНАУ. 2011. № 9. С. 105 – 115. **(Фахове видання України).**

30. Рамш В.Ю. Аналіз тенденцій розвитку робочих органів для сепарації вороху коренеплодів / В.Ю. Рамш, В.М. Барановський, **М.Р. Паньків**, Г.А. Герасимчук. Наукові нотатки. 2011. № 31. С. 298 – 305. **(Фахове видання України).**

31. Рамш В.Ю. Методика та результати експериментальних досліджень комбінованого очисника вороху коренеплодів / В.Ю. Рамш, В.М. Барановський, **М.Р. Паньків**, Г.А. Герасимчук. Наукові нотатки. 2011. Вип. 35. С. 146–152. **(Фахове видання України).**

32. Барановський В.М., Герасимчук Г.А., **Паньків М.Р.** Експериментальні дослідження секундних подач складових компонента домішок коренеплодів. Сільськогосподарські машини. 2011. Вип. 21. Т. 1. С. 119 – 123. **(Фахове видання України).**

33. Барановський В.М., **Паньків М.Р.** Експериментальні дослідження маси та товщини шару налиплого ґрунту на коренеплодах. Науковий вісник НУБіПУ. Зб. наук. праць. К. : НУБіПУ, 2010. Вип. 144. Част. 2. С. 351 – 356. **(Фахове видання України).**

34. Барановський В.М. Експериментальні дослідження поправочного коефіцієнта та маси налиплого ґрунту на бічній поверхні тіла коренеплоду. / В.М. Барановський, **М.Р. Паньків**, Н.А. Дубчак, А.В. Спирін. Збірник наукових праць ВНАУ, 2011. № 6. – С. 64 – 71. **(Фахове видання України).**

35. Барановський В.М., **Паньків М.Р.**, Дубчак Н.А. Результати експериментальних досліджень очисної системи вороху коренеплодів. Науковий журнал. Вісник ТДТУ. Тернопіль, 2008 Том 13. № 1. С. 93 – 99. **(Фахове видання України).**

36. Барановський В.М., **Паньків М.Р.**, Рамш В.Ю. Удосконалений комбінований робочий орган для викопування коренеплодів. Науковий журнал. Вісник ТДТУ. Тернопіль, 2008. Том 13. № 2. С. 61 – 73. **(Фахове видання України).**

37. **Паньків М.Р.**, Постол О.М. Математична модель пропускну здатності комбінованого очисника. Науковий журнал. Вісник ТДТУ. 2007. Т. 12. № 3. С. 76 – 83. **(Фахове видання України).**

38. Барановський В.М., **Паньків М.Р.** Розрахунок масових характеристик коренеплодів. Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей. Луцьк : ЛДТУ, 2007. Вип. 15. С. 30 – 43. **(Фахове видання України).**

39. **Паньків М.Р.**, Барановський В.М. Енергетична оцінка очисної системи вороху коренеплодів. Науковий журнал. Вісник ТДТУ. 2006. Т. 11. № 1. С. 57 – 60.. **(Фахове видання України).**

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертаційної роботи

40. **Паньків М.Р.** Алгоритми розроблення технологічних процесів транспортно-очисних модулів коренезбиральних машин : тези доп. X Міжн. наук.-техн. конф. «Крамаровські читання» з нагоди 116-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віцепрезидента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987). К.: Видавничий центр НУБіП України, 2023. С. 353 – 355.

41. **Паньків М.Р.** Моделювання – метод оптимізації робочих процесів транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин. Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики : тези доп. Міжн.. наук.-практ. конф. присвяченої 90-річчю від дня народження професора Рибак Тимотія Івановича та 60-річчю кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2022. С. 31 –32.

42. Паньків М.Р. Моделювання процесу переміщення компоненту вороху коренеплодів на очисну гірку : тези доп. XXI Міжн. наук. конф. «Сучасні проблеми землеробської механіки». Харків: ХНТУСГ, 2020. С. 140.
43. Паньків М.Р. Моделювання процесу взаємодії очисних пружних елементів з налиплим ґрунтом на коренеплодах: тези доп. XII Міжн. наук.-практ. конф. «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки». Кропивницький: ЦНТУ. 2019. С. 50 – 51.
44. **Паньків М.Р.**, Потапенко М.В. Аналіз процесу роботи завантажувального транспортера транспортно-очисної системи вороху коренеплодів : тези доп. VI Міжн. наук.-техн. конф. «Крамаровські читання» з нагоди 112-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) 21-22 лют. 2019 р. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2019. С. 133 – 135.
45. Підгурський М., **Паньків М.** Детермінована модель процесу відокремлення ґрунту від коренеплодів. Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій : тези доп. Міжн. наук.-техн. конф. до 100-річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя (100-річчя з дня смерті). Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2018. С. 45 – 47.
46. Паньків М. Технологічні аспекти процесу відокремлення домішок від коренеплодів : Актуальні задачі сучасних технологій : тези доп. міжн. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів. Тернопіль : ТНТУ, 2017. С. 191 – 192.
47. **Паньків М.Р.**, Герасимчук Г.А. Аналіз процесу руху коренеплоду по скребку завантажувального транспортера : тези доп. XI Міжн. наук.-практ. конф. «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки». Кропивницький, ЦНТУ, 2017. С. 77 – 79.
48. Pankiv M.R. Investigation of the structural model of adapted machine for harvesting root crops : мат. V Всеукраїнської наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в АПК». Луцьк : РВВ Луцького НТУ, 2015. С. 6 – 8.
49. Паньків М.Р. Інтенсифікація процесу очищення вороху коренеплодів : тези доп. V Міжн. практ. конф. «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації с-г техніки» 7-8 листопада 2013 р. Кіровоград : КНТУ, 2013. С. 128 – 131.
50. Барановський В.М., **Паньків М.Р.**, Дубчак Н.А. Результати порівняльних досліджень очисної системи вороху коренеплодів : тези доп. XIII Міжн. наук. конф. «Сучасні проблеми землеробської механіки». Вінниця, ВНАУ, 17-19 жовтня 2012 р. С. 31 – 32.
51. **Паньків М.Р.**, Паньків В.Р. Оптимізаційний синтез компонувальних схем технологічних систем : тези доп. XV наук.-практ. конф. ТНТУ, 2012. С. 71.
52. **Паньків М.Р.**, Паньків В.Р. Побудова імітаційної моделі роботи систем масового обслуговування : тези доп. наук. конф. «Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті». Тернопіль : ТНТУ, 2011. С. 43 – 44.
53. **Паньків М.Р.**, Паньків В.Р. Методи розв'язку задач лінійного програмування : тези доп. наук. конф. «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій АНКТ-2011». Хмельницький : ХНУ, 2011. С. 32 – 36.
- Наукові праці, які додатково розкривають результати дисертаційної роботи**
54. Гевко Р.Б. Розробка та аналіз роботи машин для енергоощадних технологій збирання коренебульбоплодів / Р.Б. Гевко, С.В. Синій, **М.Р. Паньків**, М.А. Варголяк. Вісник Інженерної Академії України. 2014. Вип. 3-4. С. 46 – 52.
55. Патент на корисну модель 8017 Україна, МПК А 01D 33/08. Пристрій для відокремлення домішок від коренеплодів / **М.Р. Паньків**, В.М. Барановський, А.Ю. Виговський; заявник і власник Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя; № 20041210972; заявл. 30.12.2004; опубл. 15.07.2005. Бюл. № 7/2005. 4 с.
56. Патент на корисну модель 14391 Україна, МПК А 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів / В.М. Барановський, **М.Р. Паньків**, А.Ю. Виговський, О.В. Барановський; заявник і власник Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя; № u200510816; заявл. 15.11.2005; опубл. 15.06.2006. Бюл. № 5/2006. 5 с.

57. Патент на корисну модель 28465 Україна, МПК А 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів / **М.Р. Паньків**, В.М. Барановський, Н.А. Дубчак, О.Ф.Олійник; заявник і власник Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя; № u200708888; заявл. 01.08.2007; опубл. 10.12.2007. Бюл. № 20/2007. 5 с.

58. Патент на корисну модель 34881 Україна, МПК А 01D 33/08. Комбінований очисник вороху коренеплодів / **М.Р. Паньків**, Н.А. Дубчак, В.М. Барановський, В.Ю. Рамш; заявник і власник Тернопільський державний технічний університет ім. Івана Пулюя; № u200803995; заявл. 31.03.2008; опубл. 26.08.2008. Бюл. № 16/2008. 4 с.

59. Патент на корисну модель 643572 Україна, МПК А 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів / В.М. Барановський, М.І. Підгурський, **М.Р. Паньків**, Н.А. Дубчак, В.Р. Паньків; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; № u201103196; заявл. 18.03.2011; опубл. 10.11.2011. Бюл. № 21/2011. 4 с.

60. Патент на корисну модель 64373 Україна, МПК А 01D 33/08. Пристрій для відокремлення домішок від коренеплодів / В.М. Барановський, М.І. Підгурський, **М.Р. Паньків**, Н.А. Дубчак, В.Р. Паньків; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; № u201103197; заявл. 18.03.2011; опубл. 10.11.2011. Бюл. № 21/2011. 4 с.

61. Патент на корисну модель 64631 Україна, МПК А 01D 33/08. Пристрій для відокремлення домішок від коренеплодів / В.М. Барановський, М.І. Підгурський, **М.Р. Паньків**, Н.А. Дубчак; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; № u201105278; заявл. 26.04.2011; опубл. 10.11.2011. Бюл. № 21/2011. 4 с.

62. Патент на корисну модель 65050 Україна, МПК А 01D 33/08. Пристрій для відокремлення домішок від коренеплодів / В.М. Барановський, М.І. Підгурський, О.О. Труханська, **М.Р. Паньків**; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; № u201105288; заявл. 26.04.2011; опубл. 25.11.2011. Бюл. № 22/2011. 4 с.

63. Патент на корисну модель 65051 Україна, МПК А 01D 33/08. Пристрій для відокремлення домішок від коренеплодів / В.М. Барановський, М.І. Підгурський, Н.А. Дубчак, **М.Р. Паньків**; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; № u201105240; заявл. 26.04.2011; опубл. 25.11.2011. Бюл. № 22/2011. 4 с.

64. Патент на корисну модель 72184 Україна, МПК А 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів / В.М. Барановський, М.І. Підгурський, **М.Р. Паньків**, В.Р. Паньків; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; № u201200901; заявл. 30.01.2012; опубл. 10.08.2012. Бюл. № 15/2012. 4с.

65. Патент на корисну модель 73137 Україна, МПК А 01D 33/08. Пристрій для відокремлення домішок від коренеплодів / В.М. Барановський, М.І. Підгурський, **М.Р. Паньків**, В.Ю. Рамш, В.Р. Паньків; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; № u201203159; заявл. 19.03.2012; опубл. 10.09.2012. Бюл. № 17/2012. 4 с.

66. Патент на корисну модель 74625 Україна, МПК А 01D 33/08. Пристрій для відокремлення домішок від коренеплодів / І.Є. Кравченко, О.О. Труханська, В.М. Барановський, М.І. Підгурський, **М.Р. Паньків**; заявник і власник Вінницький національний аграрний університет; № u201203172; заявл. 19.03.2012; опубл. 12.11.2012. Бюл. № 21/2012. 5 с.

67. Патент на корисну модель 74629 Україна, МПК А 01D 33/08. Пристрій для відокремлення домішок від коренеплодів / І.Є. Кравченко, В.М. Барановський, М.І. Підгурський, **М.Р. Паньків**, О.О. Труханська; заявник і власник Вінницький національний аграрний університет; № u201203172; заявл. 19.03.2012; опубл. 12.11.2012. Бюл. № 21/2012. 5 с.

68. Патент на корисну модель 77981 Україна, МПК А 01D 33/08. Пристрій для відокремлення домішок від коренеплодів / В.М. Барановський, М.І. Підгурський, О.О. Труханська, **М.Р. Паньків**; заявник і власник Вінницький національний

аграрний університет; № u201207308; заявл. 15.06.2012; опубл. 10.03.2013. Бюл. № 5/2013. 5 с.

69. Патент на корисну модель 80478 Україна, МПК А 01D 33/08. Пристрій для відокремлення домішок від коренеплодів / О.О. Труханська, В.М. Барановський, І.Є. Кравченко, **М.Р. Паньків**, Н.А. Дубчак; заявник і власник Вінницький національний аграрний університет; № u201300246; заявл. 08.01.2013; опубл. 27.05.2013. Бюл. № 10/2013. 5 с.

70. Патент на корисну модель 80479 Україна, МПК А 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів / О.О. Труханська, В.М. Барановський, І.Є. Кравченко, **М.Р. Паньків**, В.Р. Паньків, В.Ю. Рамш; заявник і власник Вінницький національний аграрний університет; № u201300247; заявл. 08.01.2013; опубл. 27.05.2013. Бюл. № 10/2013. 4 с.

71. Патент на корисну модель 82076 Україна, МПК А 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів / В.М. Барановський, **М.Р. Паньків**, В.Р. Паньків, Н.А. Дубчак, О.О. Труханська; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; № u201213815; заявл. 03.12.2012; опубл. 25.07.2013. Бюл. № 14/2013. 4 с.

72. Патент на корисну модель 82076 Україна, МПК А 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів / В.М. Барановський, **М.Р. Паньків**, В.Р. Паньків, Н.А. Дубчак, О.О. Труханська; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; № u201213815; заявл. 03.12.2012; опубл. 25.07.2013. Бюл. № 14/2013. 4 с.

АНОТАЦІЯ

Паньків М.Р. «Механіко-технологічне моделювання процесів роботи комбінованих очисних систем коренезбиральних машин». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, спеціальність 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 2025 р.

У дисертаційній роботі наведено узагальнене вирішення наукової проблеми підвищення показників якості роботи збирання крупних коренеплодів шляхом розробки наукової концепції та механіко-технологічної моделі інтенсифікації функціонального процесу відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів і оптимізації параметрів робочих органів очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та поставлено задачі дослідження. Описано наукову новизну, практичне значення отриманих результатів та наведено особистий внесок здобувача у проведених дослідженнях. Наведено відомості щодо апробації та опублікування результатів наукових досліджень, структуру та обсяг дисертаційного дослідження.

У першому розділі розкрито суть і стан наукової проблеми та сучасні тенденції функціонування технологічних процесів збирання крупних коренеплодів і робочих органів комбінованих очисних систем. Викладено аналіз алгоритмів розробки технологічних процесів і оптимізації параметрів робочих органів очисників вороху.

У другому розділі: обґрунтовані принципи розробки наукової концепції математичного моделювання процесу роботи очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин; подано алгоритм розробки механіко-технологічної моделі та проведення досліджень очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин; розкрито технологічні передумови розробки механіко-технологічних моделей робочих процесів комбінованих модулів очищення коренеплодів від домішок.

В основу розробки процесу інтенсифікації відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів покладено метод і принцип динамічного моделювання Беллмана та реалізації багатостадійної оптимізації за методом академіка Л. Погорілого та послідовність виконання технологічних постадійних n -х операцій окремого робочого органу з транспортним запізненням переміщення вороху у різних умовах роботи коренезбиральних машин.

У третьому розділі розроблено математичні моделі функціонального процесу поетапного відокремлення структурних компонентів домішок робочими органами очисних транспортно-технологічних модулів, переміщення вороху завантажувальним транспортером і подальше його переміщення до очисної гірки.

У розділі описано метод розробки математичної моделі, яка функціонально описує поетапний процес відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів залежно від часу їх знаходження на кожній g -й ділянці кожного j -го робочого органу складних динамічних транспортно-очисних систем вороху коренезбиральних машин.

У четвертому розділі розкрито математичні моделі функціонального процесу динамічної взаємодії очисних елементів з налиплим ґрунтом, компонентів вороху з рифом шнека та відокремлення налиплого ґрунту з коренеплодів.

Наведено зв'язок максимальних значень допустимої кутової швидкості пружних очисних елементів із значеннями діаметра описаного кола та діаметра пружних елементів. Виведено умови раціонального протікання технологічного процесу роботи очисних транспортно-технологічних модулів та забезпечення максимальної пружності очисних елементів на вигин.

У п'ятому розділі наведено: програму проведення лабораторних і польових експериментальних і порівняльних досліджень; характеристику лабораторної та польових експериментальних установок; методику проведення експериментальних досліджень з визначення коефіцієнта сепарації домішок, дальності польоту коренеплодів, методологію реалізації польових експериментальних і порівняльних досліджень очисних транспортно-технологічних модулів.

У шостому розділі наведено: результати польових експериментальних досліджень коефіцієнтів сепарації домішок похилого транспортера та лабораторних експериментальних досліджень дальності польоту коренеплодів з похилого транспортера до очисної гірки; результати польових експериментальних досліджень показників якості роботи очисних транспортно-технологічних модулів; наведено порівняльні дані польових досліджень процесів роботи комбінованих очисних систем вороху.

У сьомому розділі наведено енергетичну оцінку очисних транспортно-технологічних модулів, економічну ефективність застосування очисних транспортно-технологічних модулів у складі коренезбиральних машин та подано пропозиції та рекомендації їх застосування на виробництві.

Річний економічний ефект від застосування очисних транспортно-технологічних модулів у складі коренезбиральної машини складає 188482,6 грн.

Ключові слова: коренеплоди, технологічний процес, очисний транспортно-технологічний модуль, похилий транспортер, шнек, очисні елементи, загальні домішки, відокремлення домішок, математична модель, секундна подача, оптимізація, параметри, швидкість, кутова швидкість, коефіцієнт сепарації, сила, дальність польоту, експеримент, показники якості, налиплий ґрунт, пошкодження коренеплодів.

ANNOTATION

Pankiv M.R. «Mechanical and technological modeling of the work processes of combined cleaning systems of root-harvesting machines». – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.05.11 – machines and means of mechanization of agricultural production. Ivan Pulyu Ternopil National Technical University, Ternopil, 2025.

The dissertation provides a generalized solution to the scientific problem of increasing the quality indicators of harvesting large root crops. By developing a scientific concept and a mechanical-technological model of intensification of the functional process of separating structural components of impurities from root crops and optimizing the parameters of the working organs of the cleaning transport-technological modules of root-harvesting machines.

The first chapter reveals the essence and state of the scientific problem and modern trends in the functioning of technological processes of harvesting large root crops and working bodies of combined purification systems. The analysis of the algorithms for the development of technological processes and the optimization of the parameters of the working bodies of pile cleaners is presented.

In the second chapter: the well-founded principles of developing a scientific concept of mathematical modeling of the work process of cleaning transport-technological modules of root-harvesting machines. The algorithm for developing a mechanical-technological model and carrying out research on cleaning transport-technological modules of root-harvesting machines is presented. The technological prerequisites for the development of mechanical and technological models of the work processes of combined modules for cleaning root crops from impurities have been revealed.

The basis of the development of the process of intensification of the separation of structural components of impurities from root crops is the method and principle of Bellman dynamic modeling and the implementation of multistage optimization according to the method of academician L. Pogorilii. Burnt and the sequence of execution of technological constants n -x operations of a separate working body with a transport delay in the movement of the pile in different operating conditions of root-harvesting machines.

In the third chapter, mathematical models of the functional process of the step-by-step separation of structural components of impurities by the working bodies of the cleaning transport-technological modules, the movement of the pile by the loading conveyor and its subsequent movement to the cleaning slide are developed.

The section describes the method of developing a mathematical model that functionally describes the step-by-step process of separating the structural components of impurities from root crops depending on the time they are in each g -th area of each j -th the working body of complex dynamic transport and cleaning systems of a pile of root-harvesting machines.

In the fourth chapter, the mathematical models of the functional process of the dynamic interaction of the cleaning elements with the adhering soil, the components of the pile with the auger reef and the separation of the adhering soil from the root crops are revealed.

The relationship between the maximum values of the permissible angular velocity of the elastic cleaning elements and the diameter of the circumscribed circle and the diameter of the elastic elements is given. The conditions for the rational flow of the technological process of the cleaning transport-technological modules and ensuring the maximum elasticity of the cleaning elements for bending have been derived.

The seventh chapter provides an energy assessment of cleaning transport-technological modules, the economic efficiency of using cleaning transport-technological modules as part of root-harvesting machines, and offers and recommendations for their use in production. The annual economic effect of the use of cleaning transport and technological modules as part of a root harvester is UAH 188482,6.

Keywords: root crops, technological process, cleaning transport and technological module, inclined conveyor, auger, cleaning elements, general impurities, separation of impurities, mathematical model, second feed, optimization, parameters, speed, angular velocity, separation coefficient, force, flight range, experiment, quality indicators, sticky soil, damage to root crops.

Підписано до друку 04.02.2025 р. Формат 60×90, 1/16
Друк лазерний. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.
Умовно-друк. арк. 0,9. Наклад 50 прим.
Замовлення № 04022020.

Друк ФОП Паляниця В.А.
Свідоцтво ДК №4870 від 20.03.2015 р.
м. Тернопіль, вул. Б.Хмельницького, 9а, оф.38.
тел. (0352) 528-777