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

Наукова праця
на правах рукопису

**ПАНЬКІВ МАРІЯ РОМАНІВНА**

**УДК 631.356.2**

**ДИСЕРТАЦІЯ**

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

05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ М.Р. Паньків

Науковий консультант: Підгурський Микола Іванович, доктор технічних наук, професор

Тернопіль – 2025

# 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 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.

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.

Вирішення даної проблеми зведено до розв’язування 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 обгрунтувати процес контактної взаємодії коренеплодів і домішок з рифом очисного шнека та пружними очисними елементами гвинтового конвеєра або приводного очисного 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 й визначити економічну ефективність її застосування в виробничих умовах.

За результатами проведених досліджень визначено комплексні наукові засади основних напрямків підвищення ефективності збирання крупних коренеплодів у різних грунтово-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;

- 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 обгрунтувати параметри раціонального конструктивного розміщення похилого транспортера та очисної гірки;

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

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 розроблення технологічних процесів і оптимізації параметрів робочих органів очисників вороху.

У другому розділі: обґрунтовані принципи розроблення наукової концепції математичного моделювання процесу роботи очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин; подано 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 від домішок.

Алгоритм розроблення очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин, на робочі органи яких надходить значна кількість домішок (ґрунту – 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. При цьому домішки можуть бути у вільному та пов’язаному станах відносно коренеплодів.

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, який реалізовано послідовністю виконання технологічних постадійних $n$-х операцій на окремому робочому органі 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 і переміщення вороху по похилому (завантажувальному) транспортері.

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 $g$-й ділянці кожного $j$-го робочого органу складних динамічних транспортно-очисних систем вороху коренезбиральних машин.

Встановлено мінімально-необхідну робочу довжину похилого транспортера, яка забезпечує технологічну стійкість роботи, секундну подачу чистих коренеплодів за рекомендованих швидкостей руху коренезбиральної машини; обгрунтовано робочу швидкість руху кожної $g$-ї ділянки робочої гілки похилого транспортера; визначено дальність польоту коренеплодів та взаємозв’язок між коефіцієнтом сепарації і швидкістю руху гілок транспортера.

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 рівною: 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, а збільшення коефіцієнта сепарації домішок від 0,5 до 0,8 призводить до зменшення необхідної швидкості руху відповідної 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.

У четвертому розділі розкрито математичні моделі функціонального процесу динамічної взаємодії очисних елементів з налиплим грунтом, або процесу відокремлення налиплого грунту 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.

Встановлено, що 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 грунту з поверхні тіла коренеплодів знаходяться в середніх межах від 280 до 400 Н;

- допустима максимальна кутова швидкість очисних пружних елементів знаходиться в середніх межах від 20 до 80 рад/с.

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 коефіцієнті 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; результати польових експериментальних досліджень показників якості роботи очисних транспортно-технологічних модулів; наведено порівняльні дані польових досліджень процесів роботи комбінованих очисних систем вороху.

У розділі експериментально визначено:

- значення загального коефіцієнта $\mu_{зде}^{(Z)}$ та коефіцієнти $\mu_{зде}^{(Z_{1l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{2l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ сепарації загальних домішок на кожній з трьох ділянок похилого транспортера за рекомендованих значеннях зміни швидкості руху коренезбиральної машини, кута встановлення та частоти обертання приводного вала;

- значення коефіцієнтів технологічної ефективності роботи похилого транспортера.

Встановлено також екстремально-допустимі значення показника якості роботи згідно з агротехнічними вимогами та оцінено зменшення кількості загальних домішок із застосуванням очисних транспортно-технологічних модулів порівняно з базовою машиною.

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

Максимально-допустимі значення показника 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 грунту 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 грунту 20…22%; швидкості руху коренезбиральної машини до 6…7 км/год; коренеплоди цикорію: частоти обертання шнекового конвеєра 140…150 об/хв; вологості грунту 20…22%; швидкості руху коренезбиральної машини до 6…7 км/год.

На основі порівняльного аналізу показників якості виконання технологічного процесу збирання крупних коренеплодів встановлено, що кількість загальних домішок із застосуванням очисних транспортно-технологічних модулів порівняно з базовою машиною зменшується в

середньому в 1,9 рази під час збирання коренеплодів кормових буряків, в 1,2 рази під час збирання коренеплодів цукрових буряків і в 1,8 рази під час збирання коренеплодів цикорію.

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 коренезбиральних машин складає 188482,6 грн.

У додатках наведено довідкові матеріали, які доповнюють основні результати наукових досліджень, а також розроблені математичні моделі, які функціонально описують процес переміщення коренеплодів з похилого транспортера до очисної гірки та процес взаємодії компонентів вороху з рифом шнека.

Встановлено, що теоретична дальність польоту коренеплодів 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.

Уточнено значення дальності польоту коренеплодів залежно від зміни вхідних факторів в межах кута встановлення похилого транспортера, частоти обертання приводного вала похилого транспортера для коренеплодів різної маси. Визначено розбіжність теоретичних і апроксимованих експериментальних значень дальності польоту коренеплодів цикорію, яка знаходиться в межах 6…15%.

**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 грунт, пошкодження коренеплодів.

# ABSTRACT

**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 introduction substantiates the relevance of the topic, formulates the goal and sets the objectives of the research. The scientific novelty, the practical significance of the obtained results are described, and the personal contribution to the conducted research is given. Information on the approval and publication of the results of scientific research, the structure and scope of the dissertation research is provided.

The solution to this problem consists of solving the following fundamental and applied problems:

1. To analyze modern technologies of harvesting large root crops, structural and technological features of cleaning transport and technological systems of root harvesting machines and the methodology of modeling technological processes of complex technical systems.

2. Based on the analysis, propose structural schemes, a scientific concept, and a methodology for developing a mechano-technological model of intensification of the functional process of separating the structural components of impurities from root crops. Conducting a study of cleaning transport and technological modules of root harvesting machines.

3. Develop mathematical models that functionally describe the process of the arrival of the constituent structural components of impurities and root crops to the working bodies of the cleaning transport and technological modules of root harvesting machines.

4. At the analytical level, to investigate the functional process of the step-by-step separation of structural components of impurities from root crops by the working surfaces of cleaning transport-technological modules by developing deterministic mathematical models and optimizing the parameters of working bodies.

5. To establish the functional regularity of the kinematic-dynamic processes of the movement of impurities and root crops from the loading conveyor or screw conveyor to the cleaning slide. Also from the cleaning slide to the system of cleaning screws.

6. Theoretically justify the process of contact interaction of root crops and impurities with the reef of the cleaning auger and the elastic cleaning elements of the screw conveyor or the drive cleaning shaft. Based on the development of mathematical models and the optimization of structural and kinematic parameters of the working bodies of cleaning transport and technological modules of root harvesting machines.

7. Develop a program and methodology for conducting experimental research to verify the adequacy of developed theoretical mathematical models in laboratory and field conditions by comparison and analysis with the obtained empirical models.

8. To conduct comparative field studies of performance indicators of the basic and advanced root harvesting machine and to determine the economic efficiency of its use in production conditions.

Based on the results of the conducted research, the complex scientific foundations of the main areas of increasing the efficiency of harvesting large root crops in different soil and climatic conditions have been determined. Through the development of conceptual principles and algorithms for intensification of processes of separation of structural components of impurities from root crops. And optimization of parameters of working bodies of cleaning transport and technological modules at the stage of technical design.

Based on conducted complex of scientific research:

- for the first time, a scientific concept, methods of construction and development of the structure of mechanical and technological models are proposed, which describe the processes of intensification of the separation of structural components of impurities from root crops by the working bodies of cleaning transport and technological modules of root harvesting machines;

- for the first time, a mathematical model of the process of moving root crops and impurities through the working surfaces of the cleaning transport-technological module, taking into account the transport delay of the pile movement, which is written in parametric and operator form, was obtained;

- deterministic mathematical models have been developed that describe the functional process of changing the step-by-step separation of structural components of impurities from root crops depending on the working conditions and provide further development of analytical criteria for the selection of rational parameters of the working bodies of cleaning transport and technological modules of root harvesting machines;

- the analytical dependences that describe the functional nature of the movement of root crops and structural components of impurities from the inclined conveyor to the working branch of the cleaning hill depending on the parameters of the working organs and the size and mass characteristics of root crops and impurities have been specified;

- empirical models that determine the coefficients of step-by-step separation of common impurities of individual sections of the inclined conveyor have been specified, which made it possible to optimize the main parameters of the inclined conveyor of combined purification systems;

- analytical models of the dynamic interaction of root crops and impurities with the working surfaces of augers and elastic elements of the drive shaft of the combined cleaning system have been further developed, taking into account the nature of the movement of root crops through the working branch of the cleaning slide;

- the empirical models of the flight range of root crops, which describe the process of their movement from the inclined conveyor to the cleaning hill, have gained further development, which made it possible to justify the parameters of the rational constructive placement of the inclined conveyor and the cleaning hill;

- empirical models that describe the functional nature of changes in general impurities, the mass of soil stuck on root crops, and damage to root crops were further developed, which made it possible to predict and determine quantitative indicators of the quality of the combined cleaning systems 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.

Algorithm for the development of cleaning transport and technological modules of root-harvesting machines, the working bodies of which receive a significant amount of impurities (soil – to 80…90%, including sticky soil – up to 3…5%; plant impurities – to 10…15%, the remains of haulm on the heads of root crops – up to 5…10% relative to total general impurities), is based on a scientific concept and mathematical modeling of the technological process of intensification of the separation of structural components of impurities from root crops. At the same time, impurities can be in a free and bound state relative to root crops.

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 section, mathematical models of the functional process of step-by-step separation of structural components of impurities by the working bodies of the cleaning transport and technological modules and the movement of the heap along the inclined (loading) conveyor are developed.

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

The minimum required working length of the inclined conveyor is established, which ensures technological stability of the work, the second supply of clean root crops at the recommended speeds of movement of the root harvesting machine; the working speed of movement of each *g*-th section of the working branch of the inclined conveyor is justified; the flight range of root crops and the relationship between the separation coefficient and the speed of movement of the conveyor branches are determined.

Within the limits of changing the per-second feed of root crops from 8 to 14 kg/s, the speed of movement of any *k*-th section of the working branch of the inclined conveyor increases approximately by 2 times and must be greater than or equal to: for the first (1) section – from 0.96 to 1.96 m/s; for the second (2) section – from 0.83 to 1.69 m/s; for the *k*-th section – from 0.8 to 1.55 m/s, and an increase in the impurity separation coefficient from 0.5 to 0.8 leads to a decrease in the required speed of movement of each *k*-th section of the working branch of the inclined conveyor: for the first (1) section – approximately by 1.5 times; for the second (2) section – approximately by 1.2 times; for the *k*-th section – approximately by 1.1 times.

The fourth section reveals mathematical models of the functional process of dynamic interaction of cleaning elements with adhered soil, or the process of separating adhered soil from root crops.

The relationship between the maximum values of the permissible angular velocity of elastic cleaning elements with the values of 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 cleaning transport and technological modules and ensuring maximum elasticity of cleaning elements for bending are derived.

It is established that from the condition of ensuring the maximum permissible elasticity for bending of cleaning elastic elements, it is established that depending on the change in the diameter of the drive shaft in the range of 0.4…0.6 m and the diameter of cleaning elastic elements – 2…6 mm:

- the maximum values of the permissible resulting force of the process of separating adhered soil from the surface of the body of root crops are in the average range from 280 to 400 N;

- the maximum permissible angular velocity of the cleaning elastic elements is in the average range from 20 to 80 rad/s.

The fifth section provides: a program for conducting laboratory and field experimental and comparative studies; characteristics of laboratory and field experimental installations; a methodology for conducting experimental studies to determine the coefficient of separation of impurities, the flight range of root crops, a methodology for implementing field experimental and comparative studies of cleaning transport and technological modules.

The sixth section provides: the results of field experimental studies of the coefficients of separation of impurities of the inclined conveyor; the results of field experimental studies of the quality indicators of the cleaning transport and technological modules; comparative data on field studies of the processes of operation of combined cleaning systems of the heap are provided.

The section experimentally determined:

- the value of the total coefficient and the coefficients , , of the separation of total impurities on each of the three sections of the inclined conveyor at the recommended values of the change in the speed of movement of the root harvester, the angle of installation and the frequency of rotation of the drive shaft;

- the values of the coefficients of technological efficiency of the inclined conveyor.

The extreme permissible values of the quality indicator of work in accordance with agrotechnical requirements were also established and the reduction in the number of total impurities with the use of cleaning transport and technological modules compared to the base machine was estimated.

The values of the coefficients of technological efficiency of work, or the total coefficient and the coefficients of separation of total impurities of the first, second and third sections of the inclined conveyor, respectively, are 65%, 60% and 70%, and the discrepancy between the theoretical and experimental values of the coefficient of separation of total impurities by the inclined conveyor is within 10…15%.

The maximum permissible values of the quality of work indicator according to agrotechnical requirements were obtained for the following compromise values of input factors:

- fodder and sugar beets:

- for round-section augers: auger rotation frequency 150…160 rpm; elastic element rotation frequency 500…700 rpm; soil moisture 20…22%; root harvester movement speed up to 5…6 km/h;

- for elliptical augers: auger rotation frequency 120…160 rpm; elastic element rotation frequency 500…700 rpm; soil moisture 20…22%; seams speed of movement of the root harvester up to 6…7 km/h;

- chicory roots: screw conveyor rotation frequency 140…150 rpm; soil moisture 20…22%; speed of movement of the root harvester up to 6…7 km/h.

Based on a comparative analysis of the quality indicators of the technological process of harvesting large root crops, it was established that the amount of total impurities with the use of cleaning transport and technological modules compared to

the base machine decreases on average by 1.9 times during harvesting of fodder beet roots, by 1.2 times during harvesting of sugar beet roots and by 1.8 times during harvesting of chicory roots.

The seventh section presents the energy assessment of cleaning transport and technological modules, the economic efficiency of using cleaning transport and technological modules as part of root harvesting machines, and presents proposals and recommendations for their use in production.

The annual economic effect of using cleaning transport and technological modules as part of root harvesting machines is UAH 188,482.6.

The appendices provide reference materials that complement the main results of scientific research, as well as mathematical models that functionally describe the process of moving root crops from an inclined conveyor to a cleaning slide and the interaction of the heap components with the auger reef.

It has been established that the theoretical flight range of root crops from an inclined conveyor to a cleaning slide when changing the angle of installation of the inclined conveyor from 20 to 40 degrees is within the following limits: for root crops weighing 0.35 kg from 0.6 to 1.2 m; for root crops weighing 0.5 kg from 0.55 to 1.15 m, for root crops weighing 0.65 kg from 0.5 to 0.95 m.

The value of the flight range of root crops has been specified depending on the change in input factors within the angle of installation of the inclined conveyor, the frequency of rotation of the drive shaft of the inclined conveyor for root crops of different weights. The discrepancy between the theoretical and approximate experimental values of the flight range of chicory root crops has been determined, which is within 6…15%.

**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.

## 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. 732 – 744. *Здобувачем наведено аналіз технологічних процесів роботи шнеків*. **(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. *Здобувачем розроблено математичну модель секундної подачі складових компонентів домішок однодисковим копачем*. **(Scopus)**. DOI: 10.2478/ata-2023-0007.

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. *Здобувачем обгрунтовано секундні подачі загальних домішок і чистих коренеплодів одностороннім сферичним диском*. **(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. *Здобувачем наведено аналіз технологій викопування коренеплодів*. **(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. *Здобувачем розроблено математичну модель поетапного відокремлення компонентів домішок від коренеплодів*. **(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. *Здобувачем наведено методику розрахунку подачі втрат зрізаної гички до очисних систем коренезбиральних машин*.

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. *Здобувачем запропоновано методику проведення лабораторних досліджень*. **(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. *Здобувачем розроблено рівняння регресії загальних домішок і пошкодження коренеплодів*. **(Рецензоване зарубіжне періодичне видання країн OECP. Gooqle 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. *Здобувачем розроблено рівняння регресії показників якості роботи очисної системи*. **(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). C. 50 – 60. **(Рецензоване зарубіжне періодичне видання країн OECP. Gooqle 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 Ştiinţific Internaţional «Realizări şi perspective în ingineria agrară şi transport auto», dedicat aniversării a 85 de ani de la fondarea Universităţii Agrare de Stat din Moldova. Chişinău : UASM, 2018. Vol. 51. P. 58 – 64. *Здобувачем розроблено модель скочування коренеплоду з очисної гірки до системи шнеків*.

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. *Здобувачем запропоновано концепцію розроблення очисних систем коренезбиральних машин*. **(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. *Здобувачем розроблено аналітичні залежності секундних подач домішок до очисника*. **(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. *Здобувачем запропоновано методику проведення лабораторних досліджень*. **(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. *Здобувачем розроблено математичну модель процесу взаємодії коренеплодів з витком шнека*.

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. *Здобувачем розроблено методологію проведення експериментальних досліджень.* **(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. *Здобувачем розроблено математичну модель технологічного процесу інтенсифікації відокремлення домішок від коренеплодів*. **(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. *Здобувачем запропоновано алгоритм розроблення комбінованих очисних систем коренезбиральних машин*. **(Рецензоване зарубіжне періодичне видання OECP, Gooqle 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. *Здобувачем наведено структурний аналіз властивостей гички крупних коренеплодів*. **(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. *Здобувачем запропоновано методологію розроблення транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин.*

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. Vol. 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. *Здобувачем запропоновано методологію дослідження очисних систем коренезбиральних машин*. **(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. *Здобувачем розроблено методику проведення експериментальних порівняльних досліджень*. **(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. *Здобувачем описано метод розміщення очисних елементів на шнеку*. **(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. *Здобувачем розроблено методику проведення експериментальних досліджень*. **(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. *Здобувачем наведено технологічний аналіз роботи еліпсних очисників*. **(Фахове видання України)**.

28. Барановський В.М., **Паньків М.Р.**, Герасимчук Г.А. Обгрунтування основних параметрів комбінованого однодискового копача коренеплодів. Зб. наук. праць ВНАУ. 2011. № 6. С. 29 – 36. *Здобувачем розроблено аналітичну модель визначення секундної подачі грунту сферичним копачем коренеплодів*. **(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. *Здобувачем обгрунтовано секундну подачу чистих коренеплодів під час їх викопування вібраційними копачами*. **(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. *Здобувачем наведено аналіз процесу роботи шнекових очисників*. **(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. *Здобувачем наведена методика проведення експериментальних досліджень*. **(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. *Здобувачем розроблено рівняння регресії секундної подачі загальних домішок і налиплого грунту на коренеплодах кормових буряків*. **(Фахове видання України)**.

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

34. Барановський В.М. Експериментальні дослідження поправочного коефіцієнта та маси налиплого грунту на бічній поверхні тіла коренеплоду. / В.М. Барановський, **М.Р. Паньків**, Н.А. Дубчак, А.В. Спірін. Збірник наукових праць ВНАУ, 2011. № 6. – С. 64 – 71. *Здобувачем розроблено емпіричну залежність маси налиплого грунту на коренеплодах кормових буряків конусної форми*. **(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. *Здобувачем отримано рівняння регресії пошкодження коренеплодів кормових буряків.* **(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. *Здобувачем наведено технологічний аналіз подачі домішок копачем*. **(Фахове видання України)**.

37. **Паньків М.Р.**, Постол О.М. Математична модель пропускної здатності комбінованого очисника. Науковий журнал. Вісник ТДТУ. 2007. Т. 12. № 3. С .76 – 83. *Здобувачем розроблено залежності для визначення секундної подачі загальних домішок*. **(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. *Здобувачем обгрунтовано масу коренеплодів конічної форми*. **(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. *Здобувачем наведено результати експериментів з визначення енергетичних показників процесу роботи очисної системи.* **(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 Рибака Тимофія 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 грунтом 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. *Здобувачем розроблено залежність для визначення необхідної швидкості руху завантажувального транспортера*.

45. Підгурський М., **Паньків М.** Детермінована модель процесу відокремлення грунту 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. *Здобувачем розроблено залежність для визначення сили зскрібання налиплого грунту з коренеплоду*.

46. Паньків М. Технологічні аспекти процесу відокремлення домішок від коренеплодів : Актуальні задачі сучасних технологій : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів. Тернопіль : ТНТУ, 2017. С. 191 – 192.

47. **Паньків М.Р.**, Герасимчук Г.А. Анализ процесу руху корнеплоду по скребку завантажувального транспортера : тези доп. XI Міжн. наук.-практ. конф. «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки». Кропивницький, ЦНТУ, 2017. С. 77 – 79. *Здобувачем розроблено модель переміщення коренеплоду по скребку похилого транспортера.*

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. *Здобувачем розроблено методику проведення досліджень*.

51. **Паньків М.Р.**, Паньків В.Р. Оптимізаційний синтез компонувальних схем технологічних систем : тези доп. XV наук.-практ. конф. ТНТУ, 2012. С. 71. *Здобувачем розроблено модель технічної системи*.

52. **Паньків М.Р.**, Паньків В.Р. Побудова імітаційної моделі роботи систем масового обслуговування : мат. наук. конф. «Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті». Тернопіль : ТНТУ, 2011. С. 43 – 44. *(Здобувачем запропоновано імітаційну модель системи масового обслуговування)*.

53. **Паньків М.Р.**, Паньків В.Р. Методи розв’язування задач лінійного програмування : тези доп. наук. конф. «Актуальні проблеми комп’ютерних технологій АНКТ-2011». Хмельницький : ХНУ, 2011. С. 32 – 36. *(Здобувачем запропоновано метод розв’язування задачі в середовищі Mathcad)*.

*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. *Здобувачем запропоновано конструкцію комбінованого шнекового очисника*.

55. Патент на корисну модель 8017 Україна, МПК A 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 A 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 A 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 A 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 імені Івана Пулюя; № u200803995; заявл. 31.03.2008; опубл. 26.08.2008. Бюл. № 16/2008. 4 с.

59. Патент на корисну модель 643572 Україна, МПК A 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 A 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 A 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 A 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 A 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 A 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. 4 с.

65. Патент на корисну модель 73137 Україна, МПК A 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 A 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 A 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 A 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 A 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 A 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 A 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 A 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.

**ЗМІСТ**

ВСТУП ..... 33

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ І МЕТОДОЛОГІЧНИХ ОСНОВ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ОЧИСНИХ СИСТЕМ КОРЕНЕЗБИРАЛЬНИХ МАШИН ..... 44

1.1. Сучасні тенденції функціонування технологічних процесів збирання коренеплодів і робочих органів комбінованих очисних систем 44

1.2. Аналіз алгоритмів розроблення технологічних процесів і оптимізації параметрів робочих органів комбінованих очисних систем вороху коренеплодів ……... 74

1.3. Принципи розроблення наукової концепції математичного моделювання процесу роботи очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин ……..... 97

1.4. Висновки, наукова проблема, мета та завдання дослідження ... 101

РОЗДІЛ 2. КОНЦЕПТУАЛЬНІ АСПЕКТИ РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ І ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ОЧИСНИХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОДУЛІВ КОРЕНЕЗБИРАЛЬНИХ МАШИНИ ..... 107

2.1. Моделювання – метод оптимізації робочих процесів транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин …….. 107

2.2. Алгоритм розроблення механіко-технологічної моделі та проведення досліджень очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин ……... 115

2.3. Технологічні передумови розроблення механіко-математичних моделей робочих процесів комбінованих модулів очищення коренеплодів від домішок ..... 129

2.4. Висновки до розділу ..... 152

РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ РОБОТИ ОЧИСНИХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОДУЛІВ КОРЕНЕЗБИРАЛЬНИХ МАШИН ……..... 154

3.1. Математична модель функціонального процесу поетапного відокремлення домішок робочими органами ОТТМ ……... 154

3.2. Детермінована математична модель переміщення вороху похилим транспортером ……. 180

3.3. Висновки до розділу ……... 206

РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ КОМБІНОВАНОГО РОБОЧОГО ОРГАНУ ОТТМ …… 207

4.1. Математична модель функціонального процесу динамічної взаємодії очисних елементів з налиплим грунтом …….. 207

4.2. Математична модель функціонального процесу відокремлення налиплого грунту з коренеплодів …… 214

4.3. Висновки до розділу ……... 230

РОЗДІЛ 5. МЕТОДОЛОГІЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ОЧИСНИХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОДУЛІВ ……... 231

5.1. Програма проведення експериментальних досліджень, характеристика експериментальних установок …… 231

5.2. Методика проведення експериментальних досліджень з визначення коефіцієнтів сепарації домішок і дальності польоту коренеплодів …… 239

5.3. Методологія реалізації польових експериментальних досліджень очисних транспортно-технологічних модулів …… 246

РОЗДІЛ 6. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ОЧИСНИХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОДУЛІВ …… 255

6.1. Результати експериментальних досліджень коефіцієнтів сепарації домішок похилого транспортера та дальності польоту коренеплодів …… 255
6.2. Результати польових експериментальних досліджень показників якості роботи очисних транспортно-технологічних модулів .. 268
6.3. Польові порівняльні дослідження процесів роботи комбінованих очисних систем вороху ……... 311
6.4. Висновки до розділу ……... 320
РОЗДІЛ 7. УЗАГАЛЬНЕНІ РЕЗУЛЬТАТИ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ …… 322
7.1. Енергетична оцінка очисних транспортно-технологічних модулів ……. 322
7.2. Економічна ефективність застосування очисних транспортно-технологічних модулів у складі коренезбиральних машин …… 332
7.3. Пропозиції та рекомендації застосування очисних транспортно-технологічних модулів на виробництві …….. 338
7.4. Висновки до розділу ……... 341
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ……. 342
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ..... 346
ДОДАТКИ ..... 385

# ВСТУП

**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 грунт, 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 – втрати коренеплодів до 1,5%, забрудненість домішками до 8%, пошкодження коренеплодів до 15%, із них сильнопошкоджених – до 8%.

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

Тому в умовах господарювання багатогалузевих фермерських аграрних підприємств, які вирощують коренеплоди на незначних посівних площах, актуальною техніко-економічною проблемою є окупність реалізації технічно складних і занадто дорогих (від 350 до 750 тис. грн за одиницю) 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 грунтово-кліматичних умовах роботи, які характерні для України в період біологічної стиглості коренеплодів – загальна кількість домішок в 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 грунту на коренеплодах – до 3…5%.

При цьому робочі органи викопувальних модулів подають на очисні системи коренезбиральних машин до 10…15 т з площі 1 гектар грунтових домішок. Але незважаючи на доволі значні габаритні розміри очисників (площа очисних поверхонь сягає до 10…15 м$^2$, або загальна довжина – до 8…10 м), разом з зібраним урожаєм безповоротно вивозиться до 10…15 см орного шару грунту на площі 100 га, що завдає непоправної шкоди родючості грунтів.

Приведення сировини до необхідної кондиції потребує додаткових витрат, як в матеріальному, так і в енергетичному забезпечені. При цьому отримання доброякісної сировини з коренеплодів для її подальшої переробки значно знижує загальні витрати виробництва продукції, або підвищує техніко-економічні показники виробництва продуктів переробки та переробної галузі загалом. Зниження вмісту загальних грунтових 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 грунту 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 якісного вирішення науково-технічної проблеми підвищення агротехнологічних показників якості збирання крупних коренеплодів у складних умовах роботи коренезбиральних машин прийнято наукову гіпотезу, реалізація якої забезпечить підвищення інтенсифікації процесу відокремлення складових структурних компонентів домішок від коренеплодів шляхом розроблення конструктивно-технологічної схеми та оптимізації параметрів робочих органів очисних транспортно-технологічних модулів причіпних коренезбиральних машин.

Вирішення зазначених напрямків є подальшим кроком удосконалення методології, методів розроблення та оптимізації параметрів процесів роботи транспортно-технологічних систем причіпних коренезбиральних машини, як у фундаментальному (розроблення математичних моделей), так і практичному (упровадження у виробництво) плані, що є подальшим кроком у розвитку 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 обгрунтування 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 2015 р. та «Питання Міністерства розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства», яку затверджено 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 – розробка науково-технічної концепції для вирішення актуальної проблеми впровадження новітніх ефективних процесів збирання крупних коренеплодів шляхом математичного моделювання аналітично-емпіричних методів оптимізації параметрів робочих органів очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машини у різних грунтово-кліматичних умовах збирання.

Вирішення даної проблеми зведено до розв’язування 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 і 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 обгрунтувати 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 й 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 проводили на основі математичного та фізичного моделювання технологічного процесу переміщення структурних компонентів домішок і коренеплодів робочими поверхнями очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машини і методів вирішення інтегрально-диференціальних рівнянь із використанням основних положень аналітичної механіки, теорії машин і механізмів, теорії пружності та вищої математики.

Експериментальні дослідження макетних зразків очисних транспортно-технологічних модулів у складі коренезбиральних машин і порівняльні дослідження показників якості базової та удосконалених 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 грунтово-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;

- 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 обгрунтувати параметри раціонального конструктивного розміщення похилого транспортера та очисної гірки;

- набули подальшого розвитку емпіричні моделі, які описують функціональний характер зміни загальних домішок, маси налиплого грунту 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 обгрунтовано удосконалені конструкції очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин, застосування яких у складі коренезбиральних машин у виробничих умовах дозволило підвищити технологічну ефективність або показники якості збирання крупних коренеплодів. При цьому загальні домішки у зібраних коренеплодах зменшилися у середньому 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 коренеплодів цукрових буряків і в 1,2 раза (6,1% проти 6,9% у базової) під час збирання коренеплодів цикорію.

Обґрунтовано та запропоновано технічні рекомендації з вибору раціональних параметрів процесу відокремлення домішок від коренеплодів і робочих органів очисних транспортно-технологічних модулів 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), на полях якої відбувалися порівняльні польові дослідження коренезбиральної машини з очисним транспортно-технологічним модулем і базової машини; компанії ПАП «Агропродсервіс» (Тернопільська обл., с. Настасів) – транспортно-очисна система застосовується в технологічній лінії приготування кормів для тварин; Хмельницькій державній сільськогосподарській дослідній станції інституту кормів та сільського господарства Поділля Національної академії аграрних наук України (Хмельницька обл., с. Самчики).

Часткові результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальну програму під час викладання дисципліни «Сільськогосподарські машини: конструкції та розрахунок»: будова, принцип роботи та теоретичні основи розрахунку основних параметрів робочих органів очисного транспортно-технологічного модуля коренезбиральних машин застосовано під час виконання практичних і лабораторних робіт на кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машини Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя для підготовки 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 грунту 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 грунту 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 Рибака Тимофія 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 рр.); Simpozionului Ştiinţific Internaţional «Realizări şi perspective în ingineria agrară şi transport auto», dedicat aniversării a 85 de ani de la fondarea Universităţii Agrare de Stat din Moldova (Chişinău, 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. Камянець-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. Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (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 автоматики 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 періодичному 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, викладених на 115 сторінках. Основні результати роботи викладено на 345 сторінках, де міститься 132 рисунки та 18 таблиць. Загальний обсяг роботи становить 503 сторінки.

# РОЗДІЛ 1
# АНАЛІЗ МЕТОДОЛОГІЧНИХ І КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСНОВ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ОЧИСНИХ СИСТЕМ КОРЕНЕЗБИРАЛЬНИХ МАШИН

## 1.1. Сучасні тенденції функціонування технологічних процесів збирання коренеплодів і робочих органів комбінованих очисних систем

Механізоване збирання крупних коренеплодів у загальному контексті виробництва різнопланової агропромислової продукції з сировини, яку отримано під час їх переробки, є доволі витратною та трудомісткою операцією.

Згідно з відомими даними, які наведено в наукових працях [1 – 7] на механізоване збирання крупних коренеплодів припадає майже стільки економічних витрат, які необхідні для вирощування коренеплодів (підготовки грунту, посіву насіння, догляду за рослинами, агрохімічний захист посівів), що в середньому складає від 35 до 55% всіх загальних витрат на їх виробництво.

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 зі ступенем очищення викопаного вороху, або технологічним процесом відокремлення домішок від коренеплодів [8 – 12].

Ступінь очищення викопаних коренеплодів від домішок, є наслідком технологічної ефективності функціонування коренезбиральних машин загалом і особливо – робочих органів очисних систем.

При цьому технологічна ефективність процесу збирання коренеплодів залежить від агротехнологічних і кліматичних умов збирання – фізичного стану грунту, забур’яненості посівів, агробіологічних і агрофізичних властивостей й характеристик коренеплодів, конструкції робочих органів очисних систем, технологічних параметрів процесу збирання основного масиву гички, викопування коренеплодів і параметрів робочих органів транспортно-очисних систем тощо [13 – 19].

В екстремальних умовах збирання коренеплодів (зволожений і сухий грунт, значна урожайність) ефективність процесу значно знижується [20, 21].

Сучасні тенденції, які регламентують можливості кардинального підвищення технологічної ефективності збирання крупних коренеплодів або технічних систем коренезбиральних машин, формуються в основному залежно від технологічного рівня запропонованих технологій, способів і окремих основних технологічних етапів збирання у період біологічної стиглості коренеплодів (рис. 1.1 [22]):

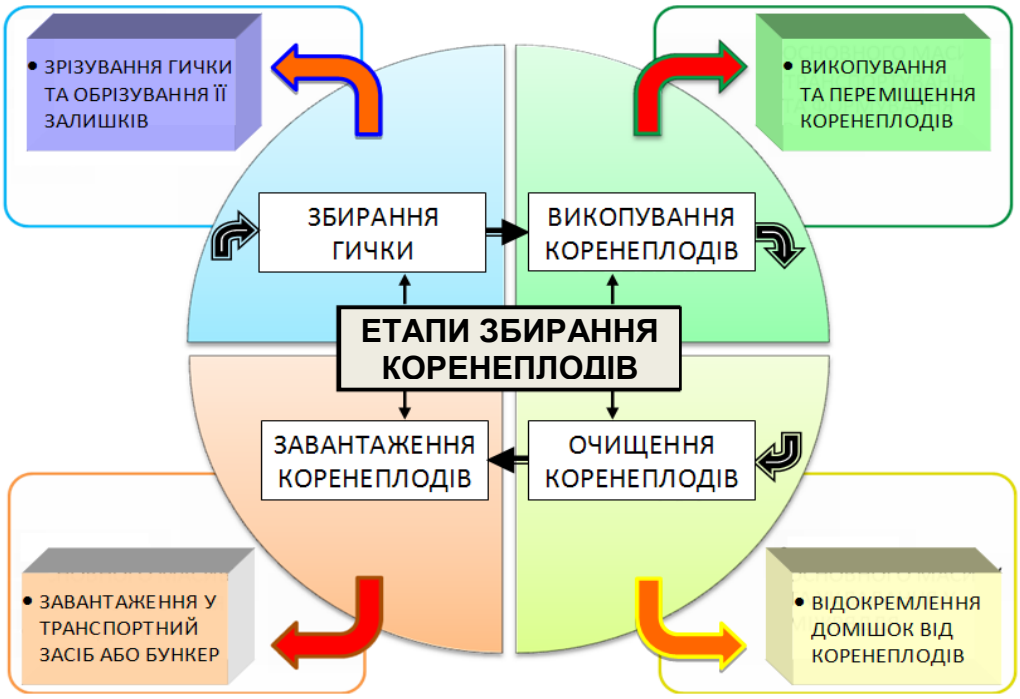



Рисунок 1.1 – Схема основних операцій збирання коренеплодів

- етап збирання гички, який включає у собі зрізування гички з головок коренеплодів, відведення зрізаної гички за межі машини, видалення залишків гички з головок коренеплодів;

- етап викопування коренеплодів, який включає у собі руйнування навколоплідного грунтового середовища, порушення зв’язків коренеплодів з ним, вилучення коренеплодів з навколоплідного грунтового середовища, переміщення коренеплодів на подальші робочі органи збиральної машини;

- етап очищення коренеплодів, який включає у собі процеси відокремлення домішок від коренеплодів за рахунок руйнування, просіювання, видалення домішок із складу викопаного вороху;

- етап завантаження коренеплодів, який включає у собі завантаження коренеплодів у бункер або в технологічний транспорт, вивантаження коренеплодів у валок на зібране поле або вивантаження бункера у бурти.

Класифікацію машин для збирання коренеплодів наведено в додатку А.1.1.

Технологічний процес збирання гички відбувається у дві фази: збирання основного масиву гички; обрізування залишків гички з головок, рис. 1.2 [23].

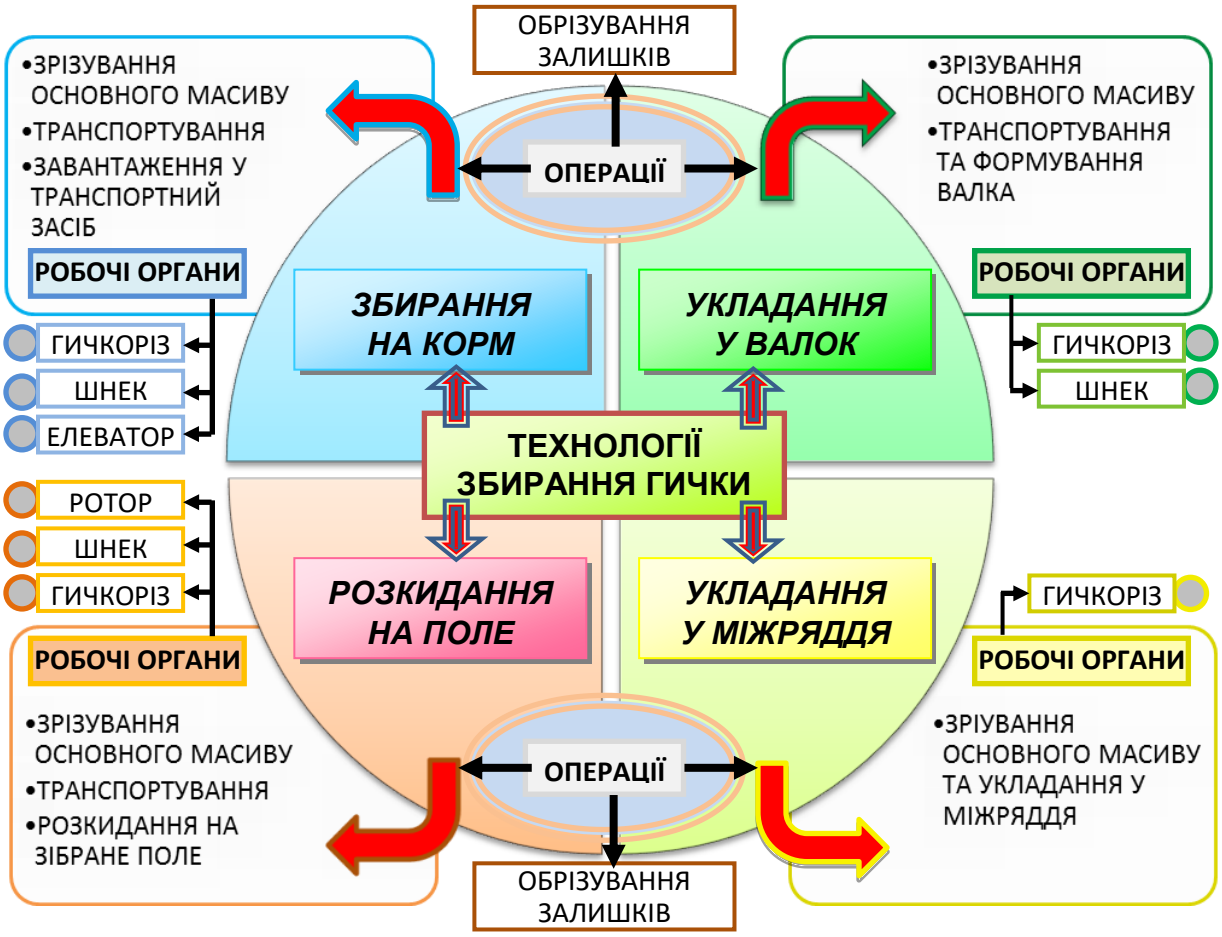



Рисунок 1.2 – Технології та операції збирання гички коренеплодів

Залежно від призначення застосовують такі технології збирання основного масиву гички [24 – 26]:

- збирання гички на корм передбачає виконання таких операцій: зрізування гички, транспортування та завантаження у технологічний транспорт;

- укладання гички на зібране поле у валок передбачає виконання таких операцій: зрізування гички, транспортування гички, вивантаження гички за межі машини у валок на зібране поле;

- розкидання гички на зібране поле передбачає виконання таких операцій: зрізування гички, транспортування гички, розкидання гички на зібране поле;

- укладання гички у міжряддя невикопаних коренеплодів передбачає виконання таких операцій: зрізування гички, транспортування гички, укладання зрізаної гички у міжряддя невикопаних коренеплодів.

Класифікацію машин для збирання гички коренеплодів наведено у додатку А.2.1, а класифікацію реалізації способів збирання – у додатку А.3.1.

Викопування коренеплодів виконується різними типами копачів і передбачає такі основні операції, рис. 1.3 [27 – 29]:

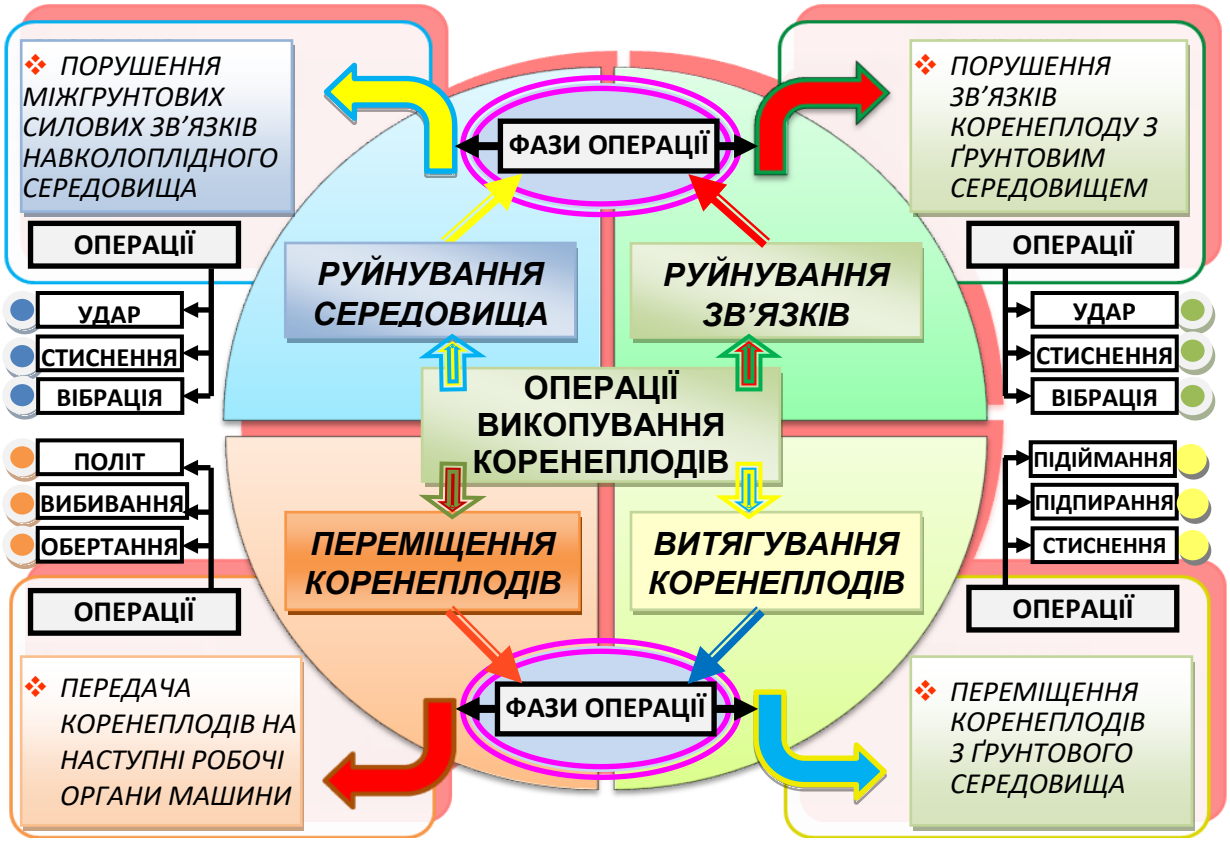



Рисунок 1.3 – Основні етапи та операції викопування коренеплодів

- операцію руйнування середовища, яка передбачає попереднє порушення міжгрунтових силових зв'язків навколоплідного середовища;

- операцію руйнування зв'язків, яка передбачає порушення зв'язків коренеплоду з грунтовим середовищем;

- операцію витягування коренеплодів, яка передбачає переміщення коренеплодів вгору з грунтового середовища;

- операцію переміщення коренеплодів, яка передбачає переміщення очищених крупних коренеплодів на наступні робочі органи коренезбиральної машини.

Класифікацію робочих органів для викопування коренеплодів наведено в додатку А.4.1.

Очищення коренеплодів від домішок відбувається робочими поверхнями транспортно-очисних систем коренезбиральних машин, при цьому основними операціями є такі (рис. 1.4 [30]):

- руйнування домішок (грудок грунту й рослинних решток) методами удару, стиснення, відривання;

- сепарація вільних домішок (сипучого грунту, дрібних грудок грунту та дрібних рослинних решток) методами просіювання, скочування та обертання домішок;

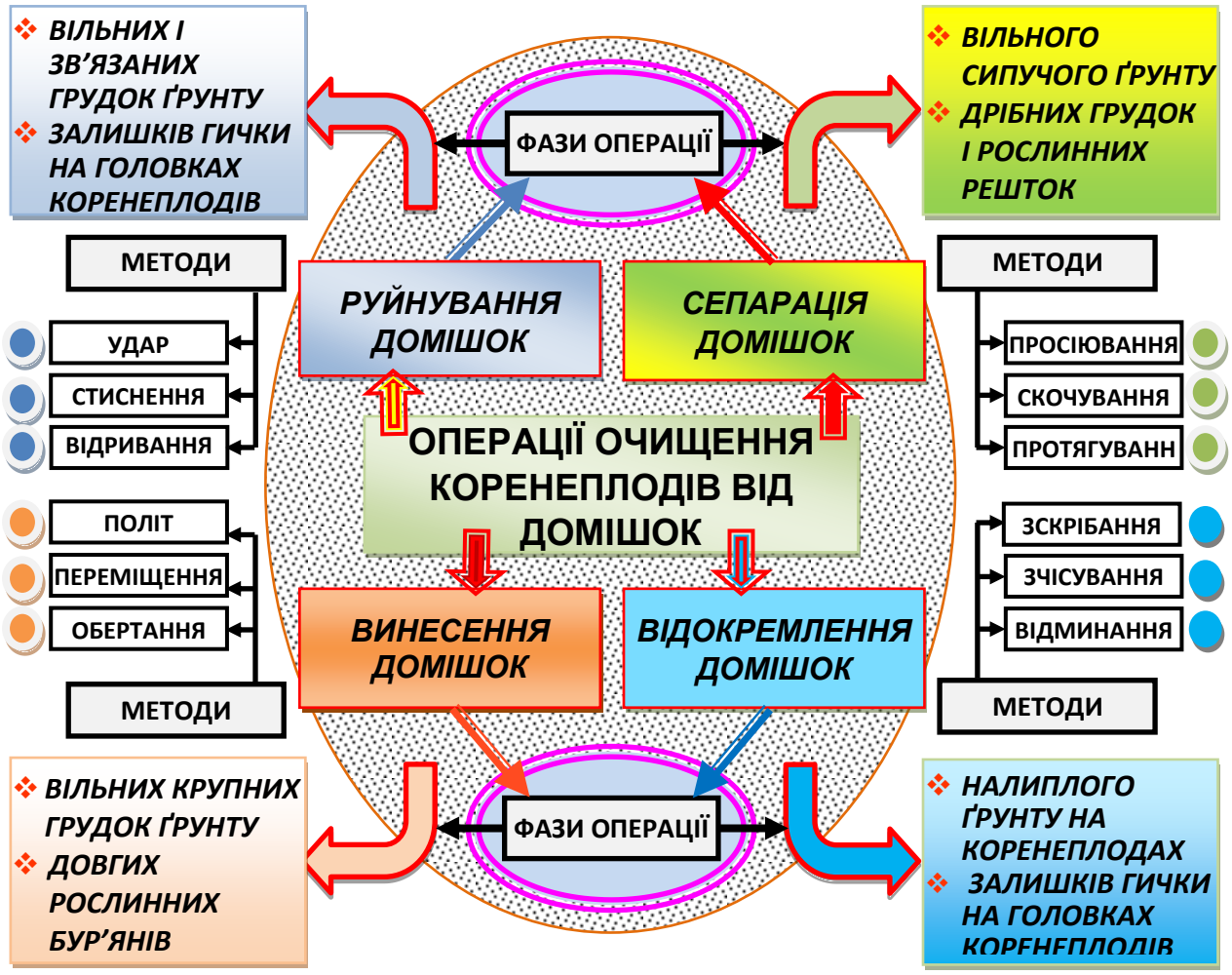



Рисунок 1.4 – Схема операцій очищення коренеплодів від домішок

- відокремлення пов’язаних домішок (налиплого грунту та залишків гички на головках коренеплодів) методами зскрібання, зчісування, відминання;

- винесення домішок (крупних грудок грунту) методом переміщення, обертання або польоту.

У світовому масштабі технології, системи, способи та техніка для збирання крупних коренеплодів відрізняються великою різноманітністю. Основні технології та способи збирання коренеплодів, які застосовуються на сучасному етапі є, відповідно, такими: потокова, перевалочна та потоково-перевалочна технології; одно-, дво- та трифазний спосіб збирання [31, 32].

Потокова технологія реалізується комплексом збиральних машин (рис. 1.5а) і базується на основі доставки викопаних коренеплодів від коренезбиральної машини безпосередньо до місця призначення, або для переробки, або для прямого використання (згодовування) коренеплодів, або для формування кагатів із коренеплодів для їх зберігання.

При цьому гичку, або подрібнюють та розкидають (у кінцевому варіанті) на зібране поле, або відвозять на ферму для згодовування, або закладають на зберігання [33].

а

б

в

г

Рисунок 1.5 – Технології збирання коренеплодів: а – потокова (коренеплоди доставляють за призначенням); б, в – перевалочна (формування кагатів із підібраних валків коренеплодів); а, б, в, г – потоково-перевалочна

Перевалочна технологія передбачає вивантаження викопаних коренеплодів на спеціальні площадки перевалочного пункту, де коренеплоди формують у великі валки або бурти. У подальшому валки або бурти підбирають підбирачами-навантажувачами та доставляють коренеплоди до місця призначення або використання, рис. 1.5б, в [34].

Відмінність потоково-перевалочної технології збирання коренеплодів від потокової характеризується тим, що деяку частину урожаю викопаних коренеплодів доставляють до місця призначення або використання, а другу частину урожаю коренеплодів збирають і реалізують за перевалочною технологією, рис. 1.5г [35].

При однофазному способі (рис. 1.6) збирання коренеплодів бункерним причіпним ГВБ (табл. 1.1 [8, 32, 36]) або самохідним комбайном ГВБ-С за один прохід агрегату зрізується гичка яка, або завантажується в технологічний транспорт (рис. 1.7), або виноситься за межі агрегату шляхом формування валка на поверхні зібраного поля (рис. 1.5, рис. 1.8), або розкидається на поверхню зібраного поля (рис. 1.9) або у міжряддя невикопаних коренеплодів (рис. 1.10), коренеплоди викопуються, очищаються від домішок, завантажуються у транспорт, який рухається поряд з коренезбиральною машиною (рис. 1.5а, г) або в бункер самохідної машини, рис. 1.5.

Перевагами прямого комбайнування є: однократний прохід збирального агрегату по полю, що забезпечує бережне відношення до родючості грунту; використання машин одного типу за їх мінімальної кількості [37].

У наш час на однофазний спосіб збирання приходиться біля 85 % номенклатури всієї світової техніки, яка використовується для збирання коренеплодів комбайнами із рядністю від 1 до 12, причому біля 80 % зібраних площ коренеплодів припадає на самохідні шестирядні збиральні комплекси.

Якщо 1-2-во рядні комбайни у своїй більшості причіпні, то 6-ти, 9-ти та 12-ти рядні є виключно самохідними. Провідне становище у виробництві таких комбайнів у Європі й світі займають країни ФРН, Нідерланди, Франція, Данія, США, Китай, Австралія.

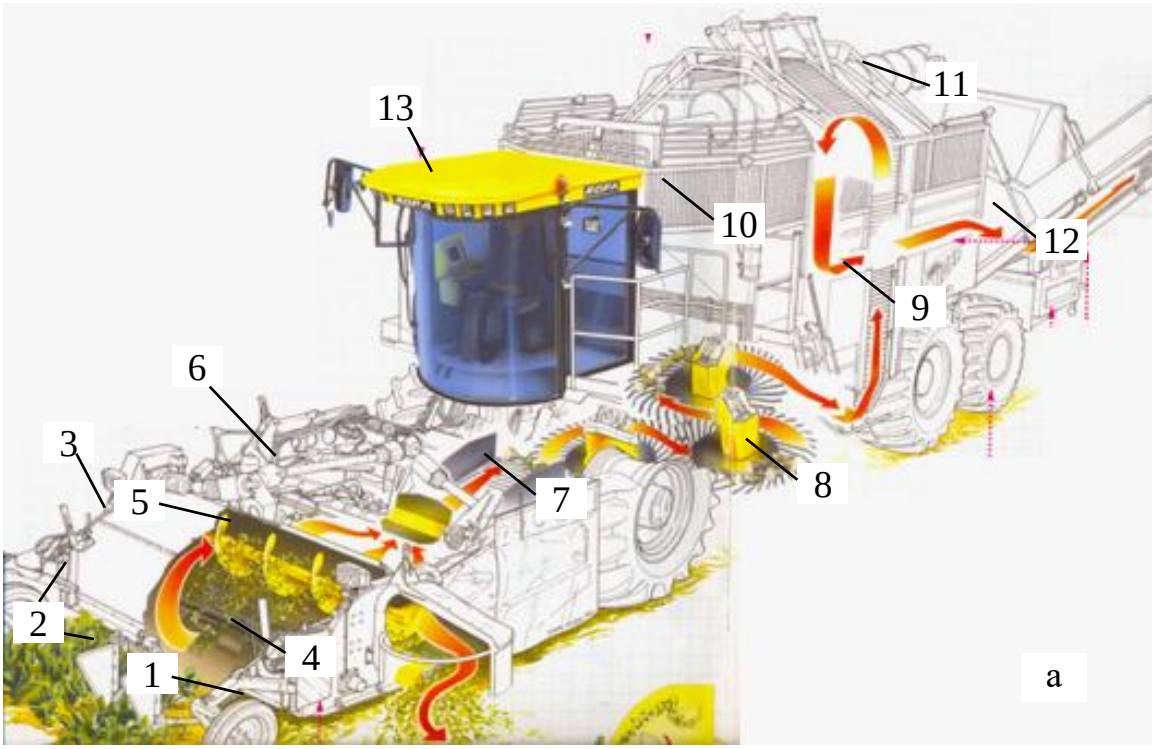
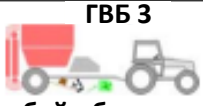
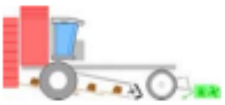



Рисунок 1.6 – Однофазний спосіб збирання коренеплодів: а – загальний вигляд агрегату для однофазного способу збирання коренеплодів самохідним комбайном SF-10 (Німеччина); б – схема технологічного процесу роботи самохідного бункерного комбайна TIM (Данія): 1 – опорне копіювальне колесо; 2 – автомат керування; 3 – модуль збирання гички: 4 – гичкоріз; 5 – конвеєр шнековий; 6 – модуль викопування коренеплодів; 7, 8 – модуль очищення та транспортування очищених коренеплодів; 9 – периферійний завантажувальний елеватор; 10 – бункер; 11 – горизонтальний шнек для розосередження коренеплодів; 12 – вивантажувальний транспортер; 13 – кабіна

Таблиця 1.1 – Способи збирання коренеплодів [8, 32, 36]

| ОДНОФАЗНИЙ СПОСІБ ЗБИРАННЯ КОРЕНЕПЛОДІВ | | | |
|---|---|---|---|
| **СХЕМА АГРЕГАТУ** | **ГВБ 1**<br> <br>**Комбайн бункерний однорядний** | **ГВБ-С 1**<br> <br>**Комбайн самохідний бункерний однорядний** | **ГВБ 2**<br> <br>**Комбайн бункерний дворядний** |
| **МАРКИ МАШИН** | Stoll V 100; Juko 100/XJ100; Mace; Madim 3000H, 3500; Alparslan ALP-03HM; Altinörs D 2000 THO/S, CD2000B, HD1700, C1061; Asbir; Ayhan Dündar AD2200/1500; Barış; Dündar B-HE, YD-HE; Ekerler E5000, EH/E 3000, EH/E2000; Erpul; Köylü KSBH03; Ertuğrullar; Harmak PHM2; Torunoğlu H4200, L3200, S3400; Ölçer; Özen İş KPHM-4/5; Sönmezler PH-01, Collina-S; Yiğit; ITMCO 217R02; Sanei BSR475/475A, 575J/JT | Barigelli B/1-4×4-S; Altinörs A3 KENDİ YÜRÜR 4×4 | Kleine KR 2; Stoll V 202; Juko XJ 200; Thyregod T7; Tim MII SA/TE 120, KRB/S 212; Sanei B-2; ТеК3 КБ-2 |
| **Вміст бункера, т; / м³** | (1-4,5)/(1,5-6,8) | (2,5-3)/(4-4,5) | (3,7-8)/(5,5 -12) |
| **Потужність двигуна, кВт** | - | 60-125 | - |
| **Маса, т** | 1,39-3 | 6-6,6 | 2,1-7,5 |
| **СХЕМА АГРЕГАТУ** | **ГВБ-С 2**<br> <br>**Комбайн самохідний бункерний дворядний** | **ГВБ 3**<br>  <br>**Комбайн бункерний трирядний** | **ГВБ-С 3**<br> <br>**Комбайн самохідний бункерний трирядний** |
| **МАРКИ МАШИН** | Barigelli Europa-4×4; Mazzotti Mb 2200; Majevica M-519 | Stoll V 300; Edenhall 743; Tim MIII SH 1204; Thyregod TT-800, T7, T9 | Stoll V 300 SF; Barigelli B/3-4×4-S; Rimeco Aquila DUE-bifila, Aquila DUE-trifila |
| **Вміст бункера, т; / м³** | (4,5-7)/(7-11) | (8-11)/(12-17) | (7,5-11)/(11,5-17) |
| **Потужність двигуна, кВт** | 154-176 | - | 145-220 |
| **Маса, т** | 9,28-11 | 7,5-8,2 | 10,2-12,9 |
| **СХЕМА АГРЕГАТУ** | **ГВБ 4**<br> <br>**Комбайн бункерний чотирирядний** | **ГВБ-С 6К**<br> <br>**Комбайн самохідний бункерний шестирядний К** | **ГВБ-С 6М**<br> <br>**Комбайн самохідний бункерний шестирядний М** |
| **МАРКИ МАШИН** | Edenhall 734; Edenhall 744; Thyregod T9 | Kleine SF 10, SF 10-2; Franquet TETRA; Herriau Préservasol 800; Agrifac WKM 9000 | Holmer Terra DosT3; Kleine SF 20; Stoll V 600 SF; Matrot M 2011 Plus, Kroma; Moreau Voltra 6-24, Cobra, Xerris; Vervaet 17T, Beet Eater 617; Agrifac WKM 9000S, ZA215 EH; Riecam RBM 400T/S; Barigelli B/6-4×4-S; Tim SR 2500; СКС624 «Полесье» |
| **Вміст бункера, т; / м³** | (9-10)/(14-15) | (8,5-12)/(13-18) | (13-20)/(20-30) |
| **Потужність двигуна, кВт** | - | 221-309 | 235-362 |
| **Маса, т** | 8,2-9 | 15,1-21 | 19-25,7 |

Продовження табл. 1.1

| | | | |
|---|---|---|---|
| **СХЕМА АГРЕГАТУ** | **ГВБ-С 6**<br> <br>**Комбайн бункерний самохідний шестирядний G** | **ГВБ-С 9**<br> <br>**Комбайн бункерний самохідний дев'ятирядний** | **ГВБ-С 12**<br> <br>**Комбайн бункерний самохідний дванадцятирядний** |
| **МАРКИ МАШИН** | Agrifac WKM Big Six; Grimme Maxtron 620, Rexor 620; Vervaet Beet Eater 625; ROPA euro-TIGER V8-3 | ROPA euro-TIGER V8-3; Vervaet Beet Eater 925; Agrifac HEXA 9 | Agrifac HEXA 12 |
| **Вміст бункера, т; / м³** | (22-28)/(33-43) | (25-28)/(38-43) | 33/50 |
| **Потужність двигуна, кВт** | 360-444 | 440-444 | 440 |
| **Маса, т** | 28-32,5 | 35 | 40 |
| **СХЕМА АГРЕГАТУ** | **Г,ВЗ-3, 4, 6**<br> <br>**Гичко- та коренезбиральні машини 3-, 4-, 6-ти рядні** | **ГВЗ-С 6**<br>  <br>**Комбайн самохідний шестирядний** | **ГВЗ-С 8, 9**<br> <br>**Комбайн самохідний 8-, 9-ти рядний** |
| **МАРКИ МАШИН** | Grimme FT 270V+Rootster 604; Moreau EP 12+ARC 6; Franquet Super Saïga+ TE 6; Standen-Pearson Spectrum MK2; Garford Victor 3/4/6 | Moreau GR 4000/4005, Lectra 4005, Lectra V2, Lexxis; Matrot M 41, Magister; Herriau TH 5, Majevica M-520; ДКЗ РКМ 6-07 «Кристалл»; ТеКЗ КСБ-6 «Збруч», КС-6Б-10 | Moreau Suptra 9.12, Lexxis |
| **Вміст бункера, т; / м³** | (0-4)/(0-6) | (0-5,2)/(0-8) | (4-7,8)/(6-12) |
| **Потужність двигуна, кВт** | - | 136-261 | 275-329 |
| **Маса, т** | 3,7-8,25 | 9,7-17 | 16 |
| **ДВОФАЗНИЙ СПОСІБ ЗБИРАННЯ КОРЕНЕПЛОДІВ** | | | |
| **СХЕМА АГРЕГАТУ** | **ГВ 6**<br> <br>**Комбайн-валкоутворювач шестирядний** | **ГВ-С 6**<br> <br>**Комбайн-валкоутворювач самохідний 6-ти рядний** | **Г,В 6**<br> <br>**Гичкозбиральна машина та копач-валкоутворювач 6-ряд.** |
| **МАРКИ МАШИН** | Kleine KR-6II; Barigelli B/6-S, Stacmec RTV6F; КСН-6 «Полесье»; ОКБ «Союз» КВС-6 | Dewulf Orbitt | Moreau EP 11/12+ADS 700/ AS 450, EP 11/12+AS 2500/ AD 2800; Franquet Super Saïga+TE2/TE3; Dutrieux Agri-Service, Fontani DF/6A+ EF/6V; Barigelli B/6-C; Bassi Mb6D+Mb6S; Mazzotti MB6D +MB6S; Stacmec DE6F+ SV6F; Dewulf Beeta 6; Gilles TR14+AD/ASC 49; C.M.G. Beet-Leaf+Beet-Lift |
| **Вміст бункера, т; / м³** | - | - | - |
| **Потужність двигуна, кВт** | - | × | - |
| **Маса, т** | 2,8-3,5 | × | 2,39-3,7 |

Продовження табл. 1.1

| | | | |
|---|---|---|---|
| **СХЕМА АГРЕГАТУ** | **Г,В 8**<br> <br>**Гичкозбиральна машина та копач-валкоутворювач 8-ряд.** | **Г,В 12**<br> <br>**Гичкозбиральна машина та копач-валкоутворювач 12-ряд.** | **ВЗ 12**<br> <br>**Коренезбиральна машина 2-, 3-, 4-х рядна** |
| **МАРКИ МАШИН** | Gilles TR16/TR80+AD/AS80; Gilles TR80+C.M.G. Beet-Lift 8 | JPS 12 Rangs | Agromet-Javor Nornica; Cadusa; ДКЗ МКР-2-3; ТеКЗ МКП-4 |
| **Вміст бункера, т; / м$^3$** | - | - | - |
| **Потужність двигуна, кВт** | - | - | - |
| **Маса, т** | 4,1-5 | × | 2,3-4,7 |
| **СХЕМА АГРЕГАТУ** | **ВЗ-С 6**<br> <br>**Коренезбиральна машина самохідна шестирядна** | **ВЗ 6**<br> <br>**Коренезбиральна машина шестирядна** | **ВЗ 4, 6, 8, 12**<br> <br>**Коренезбиральна машина 4, 6, 8-, 12-ти рядна** |
| **МАРКИ МАШИН** | ТеКЗ КС-6Б/-01/02/03/07; ДКЗ РКС-6, МКК-6-02, РКМ-6-01/05 | Grimme Rootster 604; Moreau ARC 6; Franquet TE 6; Cadusa; БОРЭКС КНБ-6; Нежинский МЗ СУМ-6; ТеКЗ МКП-6; Кочубеевский РЗ СКП-6; Ритм КПС-6; Рязанский КЗ КПС-6 | Amity WIC 2300/2500/2700; ART'S WAY 6812A; Alloway, Parma 2200/2700/2900; Wil-Rich Red River 430/622/630/822 |
| **Вміст бункера, т; / м$^3$** | (0-0,3)/(0-0,5) | (0-4)/(0-6) | (4-8)/(6-12) |
| **Потужність двигуна, кВт** | 59-129 | - | - |
| **Маса, т** | 7,8-9 | 4-7,1 | 6-16,3 |
| **ДВО-ТРИФАЗНИЙ СПОСІБ ЗБИРАННЯ КОРЕНЕПЛОДІВ** | | | |
| **СХЕМА АГРЕГАТУ** | **З**<br> <br>**Підбирач-завантажувач** | **З$З_б$**<br> <br>**Підбирач-перевантажувач** | **З$З_б$-С**<br> <br>**Підбирач-перевантажувач самохідний М** |
| **МАРКИ МАШИН** | Kleine L6; Franquet CDN 2000; Moreau CN 40; Gilles 136T/TS; Fontani CN/90; Herriau Super; Majevica CN-21; ТАКА 2900; Уманьферм-маш А3К-6.03; БОРЭКС ПНБВ-1,6; Нежинский МЗ ПСП-2; ППК-6 «Полесье»; Moldagrotehnica MIS-6; Рязанский КЗ ПКП-0,8; АОМЗ ПС-2 | Bleinroth TLB 30, LB 20, LB 25; Sopema DT 40; Barigelli B/AC-120; Bassi Big Car; Fontani AF140 «Galeone»; Rimeco Falcon 142, Falcon 242; Stacmec AB 16SL, AB 23S/SL; De Puente P, Titan; Fuertes F1, F2; Guerra CTRH-3; Mace RT 307/310/314; Madim M6, M10 | Dewulf R7150; C.M.G. CDR 30, Dutrieux Agri-Service |
| **Вміст бункера, т; / м$^3$** | (0-1)/(0-1,5) | (5-27)/(7-40) | (16-20)/(24-30) |
| **Потужність двигуна, кВт** | - | - | 286-368 |
| **Маса, т** | 1,83-3,34 | 6,75-37,7 | 17-20 |

Продовження табл. 1.1

| | | | |
|---|---|---|---|
| **СХЕМА АГРЕГАТУ** | **ЗБ-С** **Підбирач-перевантажувач самохідний G** | **Г 6** **Гичкозбиральна машина шестирядна** | **Г 6, 8, 12** **Гичкозбиральна машина 6-, 8-, 12-ти рядна** |
| **МАРКИ МАШИН** | JPS Mega Master, Mega Star; CMC DB 4000; Dewulf R9150; Gilles RB 240T/410T-TNT/TS/turboclean; C.M.G. CDR 40 | Kleine K6IIG; Grimme BM 330/300; Herriau; Moreau ET 12; Sopema; Fontani DF/6P; Mace; Madim P6; Majevica M-536; Белдормаш БМ-6В; ДКЗ МГН-6, МБП-6, МБК-2,7; ТеКЗ БМ-6Б, МГШ-6, МБР-6-04, ОГД-6А; Уманьферммаш МГ-6; Moldagrotehnica MF-6; АОМЗ АБ-1; Рязанский КЗ УБС-6А, ОГ[illegible] БУН-4/6; Ритм РБМ-6; Кочубеевский РЗ БС-6 | Amity WIC; ART'S WAY 786/638/1222; Alloway; Parma 144/180/264 |
| **Вміст бункера, т; / м$^3$** | (22-50)/(34-75) | - | - |
| **Потужність двигуна, кВт** | 315-485 | - | - |
| **Маса, т** | 17,5-30 | 1,2-3,3 | 2,3-5,2 |
| **ТРИФАЗНИЙ СПОСІБ ЗБИРАННЯ** | | **ПЕРЕВАЛОЧНА ТЕХНОЛОГІЯ** | |
| **СХЕМА АГРЕГАТУ** | **Г 6** **Копач-валкоутворювач шестирядний** | **З-С** **Завантажувач самохідний** | **БЗ** **Бункер-завантажувач стаціонарний** |
| **МАРКИ МАШИН** | Kleine R 6; Herriau SCORE II; Fontani EF/6V; Cadusa; Mace; Madim A6; Majevica ADS; Нежинский МЗ КСН 2-050; БОРЭКС КВЦБ-1,2; Moldagrotehnica MRS-6, SS-6; Рязанский КЗ ВУН-4/6; АОМЗ АС-1 | Holmer Terra Felis; Gebo SRL 300 WR; Kleine RL 200 SF, RL 350 V; Ropa euro-Maus e-M3; Barigelli B/CS 8000; Амкодор ПС-200; Осколагро СПО-4,2; ДКЗ СПС-4,2А | Gebo RRL 160 WR, RRL 180 KR/S; Holmer RRL; Grimme RH 24-60; Tim-Thyregod TR 7, TR 8; CTM Harpley CTM 500, CTM 9000; Larrington; Niagri; Nicholson; Tailor Made; Terry Johnson Todd Hydro-Inspecta 900/1300, Todd Mark V1 |
| **Вміст бункера, т; / м$^3$** | - | - | (6-14)/(9-22) |
| **Потужність двигуна, кВт** | - | 57-240 | 16-127 |
| **Маса, т** | 1,06-1,68 | 9,17-23,5 | 6,8-10,2 |
| **СХЕМА АГРЕГАТУ** | **Умовні позначення:**<br>**Г – видалення гички;**<br>**В – викопування та очищення коренеплодів;**<br>**З – завантаження та очищення коренеплодів;**<br>**Б – завантаження в бункер;**<br>**С – самохідна машина.**<br>***Приклад:***<br>**ГВБ З – причіпний бункерний комбайн, трирядний;**<br>**ГВБ-С 6- самохідний бункерний комбайн, шестирядний;**<br>**Г,В 8 – агрегат з восьмирядної гичкозбиральної машини та восьмирядного копача-валкоутворювача.** | | **БЗ-С** **Бункер-навантажувач самохідний** |
| **МАРКИ МАШИН** | | | Gebo BM 200, RL 300 WR; Ropa Euro-Bunkermaus e-BM3 |
| **Вміст бункера, т; / м$^3$** | | | (4-8)/(6-12) |
| **Потужність двигуна, кВт** | | | 130-230 |
| **Маса, т** | | | 12,5-23,5 |

Рисунок 1.7 – Завантаження зібраного основного масиву гички коренеплодів у технологічний транспортний засіб

Рисунок 1.8 – Укладання зрізаної гички коренеплодів у валок на поверхню зібраного поля

Рисунок 1.9 – Розкидання зрізаної гички коренеплодів на поверхню зібраного поля

Рисунок 1.10 – Розкидання зрізаної гички у міжряддя невикопаних коренеплодів

Рисунок 1.11 – Завантаження викопаних коренеплодів у бункер самохідної коренезбиральної машини

Більшість самохідних комбайнів мають бункер-накопичувач ємністю від 0,1 до 50 м$^3$, яка забезпечує збирання коренеплодів із всієї довжини гону не менше за 500 м без їх вивантаження або повного заповнення транспортного засобу, який рухається поряд з комбайном [38, 39].

Також однофазний спосіб збирання коренеплодів реалізується шляхом застосування причіпних (начіпних) комплексів машин, які утворюють збиральний агрегат із енергетичним засобом – трактором або самохідним модулем різної потужності [40].

При цьому гичкозбиральна машина начіплюється на передню начіпку трактора фронтально його руху, а коренезбиральна машина агрегатується із трактором завдяки задній начіпній системі.

Двофазний спосіб збирання коренеплодів здійснюється як потоковою, так і перевалковою технологіями, при цьому реалізація способу може відбуватися за двома основними технологіями – традиційною та валковою.

За традиційної технології на першій фазі зрізують основний масив гички гичкозбиральною машиною (Г) (табл. 1.1), гичка формується у валок або розкидається на зібране поле, а в другій фазі – викопують коренеплоди коренезбиральною машиною (ВЗ), або (ВЗ-С).

Валкову технологію реалізують комплексом збиральних машин у два основні етапи.

На першому етапі збирають гичку за принципом традиційної технології, викопують коренеплоди та укладають їх у валок на зібране поле. Для цього можуть застосовувати причіпний комбайн валкоутворювач (ГВ), самохідний комбайн-валкоутворювач (ГВ-С) або агрегат (Г, В), який утворений на базі енергетичного засобу наприклад, трактора й начеплених на його передню начіпку гичкозбиральну машину (Г), а на задню – копач-валкоутворювач (В).

На другому етапі коренеплоди підбирають із валка підбирачем-завантажувачем (З), який очищує коренеплоди від домішок і завантажує їх в технологічний транспорт.

За погіршених ґрунтово-кліматичних умов збирання застосовують трифазний спосіб збирання коренеплодів.

У першій фазі викопують коренеплоди та формують валок викопаних коренеплодів. У другій фазі, утворений валок коренеплодів підбирають бункерним причіпним ($ЗЗ_б$) або самохідним ($ЗЗ_б$-С) підбирачем-перевантажувачем, очищують коренеплоди від домішок, завантажують їх в бункер, а потім вивантажують на зібране поле у великі бурти. У третій фазі самохідним завантажувачем (З-С) підбирають коренеплоди із бурта, очищують їх від домішок і завантажують у технологічний транспорт.

При цьому способі збирання коренеплодів використовують найбільшу кількість тракторів і збиральних машин різного типу та як наслідок, втрати праці або економічні витрати, є найбільшими порівняно із іншими способами збирання коренеплодів [41].

Використання причіпних машин для дво- та трифазних способів збирання коренеплодів раціональне в умовах підвищеної вологості ґрунту й на площах до 200 га. Завдяки просушуванню утвореного валка зменшується загальна кількість грунту в коренеплодах і кількість родючого шару ґрунту вивезеного з поля. Але довготривале (понад 3…5 год.) просушування валка коренеплодів призводить до втрат цукристості, сухих речовин, споживчих якостей тощо [42].

Однофазний спосіб збирання коренеплодів на основі застосування самохідних бункерних комбайнів, є найбільш раціональним при збиранні урожайності коренеплодів 250 ц/га та більше, що дозволяє мінімізувати час заповнення бункера або енергетичні витрати й показника сезонного наробітку більше 200…250 га [43].

Сучасні тенденції, які реалізують конструктивно-компонувальну схему більшості самохідних бункерних комбайнів, реалізовано схемою, яку наведено на рис. 1.12а, а самохідних підбирачів-навантажувачів коренеплодів зі великих кагатів при роздільному способі збирання – на рис. 1.12б, (додаток А.5.1).

Загальні принципи їх структури – це послідовність розташування блочно-модульних систем, що реалізують робочий процес збирання коренеплодів.

Вибір способу та технології збирання коренеплодів із застосуванням самохідної або причіпної техніки, а також її продуктивності (ширини захвату) повинно бути обґрунтованим у кожному конкретному випадку із урахуванням ґрунтово-кліматичних й агро-ландшафтних особливостей, обсягу виробництва, розмірів полів, наявного машинно-технічного парку, економічної доцільності, господарсько-економічного устрою підприємства та інших факторів.

При цьому необхідно враховувати наступні переваги самохідної техніки: велика маневреність, підвищена прохідність за несприятливих ґрунтових умов, зручність обслуговування, кращі умови роботи механізаторів. Однак причіпна техніка у порівнянні із самохідною коштує значно менше й дешевше в обслуговуванні, має меншу масу та менше ущільнює ґрунт.

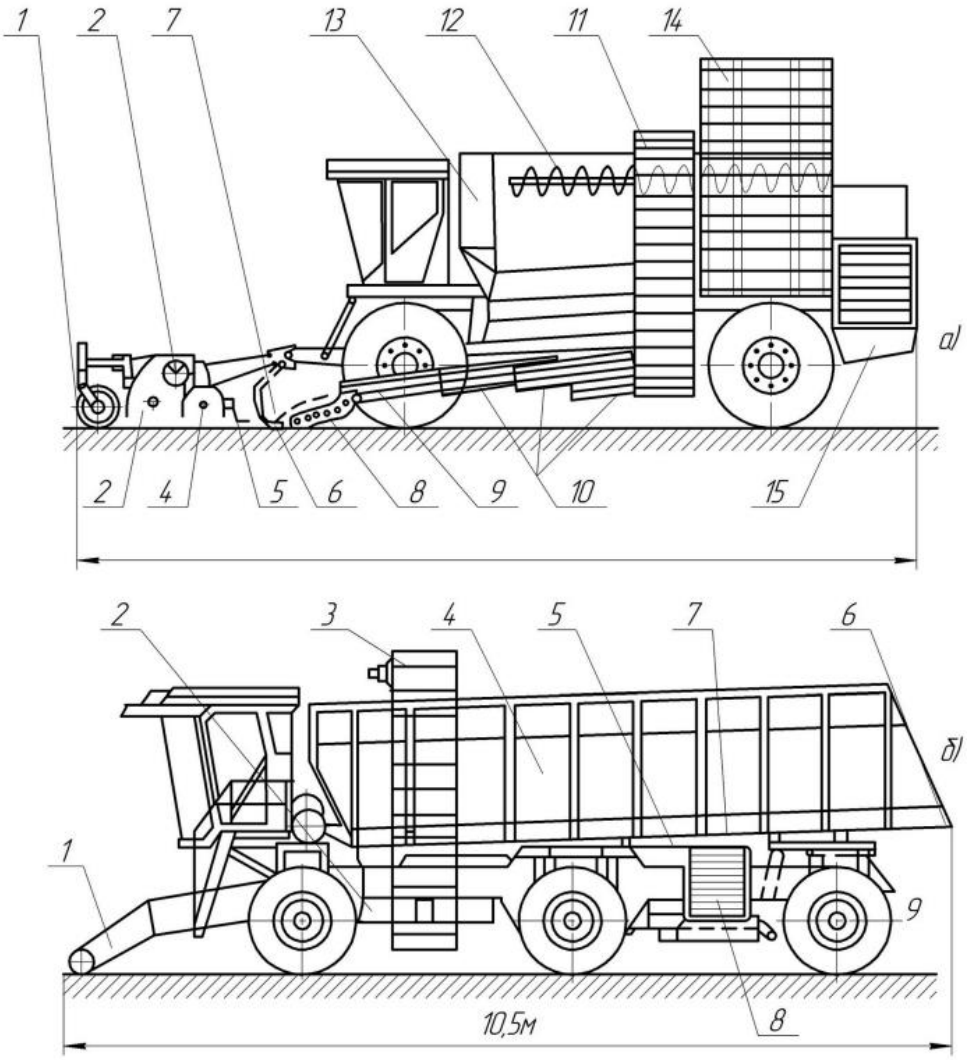



Рисунок 1.12 – Конструктивно-компонувальна схема сучасного: а – самохідного бункерного комбайна: 1 – опорне колесо модуля для збирання гички; 2 – горизонтальний гичкозрізувальний ротор; 3 – шнек для транспортування зрізаної гички; 4 – горизонтальний очисник залишків гички з головок коренеплодів; 5 – обрізник головок коренеплодів; 6 – пристрій керування копачів по рядках коренеплодів; 7 – робочі органи для викопування коренеплодів; 8, 9, 10 – модуль очищення коренеплодів від домішок; 11 – завантажувальний транспортер коренеплодів в бункер; 12 – шнек-розрівнювач; 13 – бункер-накопичувач; 14 – вивантажувальний елеватор; 15 – силовий агрегат; б – самохідного підбирача-навантажувача: 1 – підбирач коренеплодів х валка; 2 – модуль очищення коренеплодів від домішок; 3 – навантажувальний транспортер коренеплодів в бункер; 4 – бункер-накопичувач; 5 – шасі; 6 – задня відкидна стінка бункера; 7 – рухоме дно бункера; 8 – двигун 9 – система підйому і примусового розвантаження бункера

Основними конструктивно-технологічними критеріями, які характеризують технологічну (економічну) ефективність застосування типажів коренезбиральних машин і конструкцій їх транспортно-технологічних систем очищення вороху коренеплодів від домішок, є показники якості очищення.

Ці показники, або адекватні показники відокремлення домішок від коренеплодів, у загальних аспектах функціонально залежать від характеристик складових компонентів домішок, які регламентуються фізичним станом грунту, властивостями коренеплодів, станом забур'яненості посівів, конструктивними особливостями очисників, їх технологічними та конструктивно-кінематичними параметрами тощо [44 – 48].

Класифікацію очисних робочих органів, які формалізовано утворюють транспортно-технологічні системи очищення коренеплодів від домішок наведено на рис. 1.13 [6, 49].

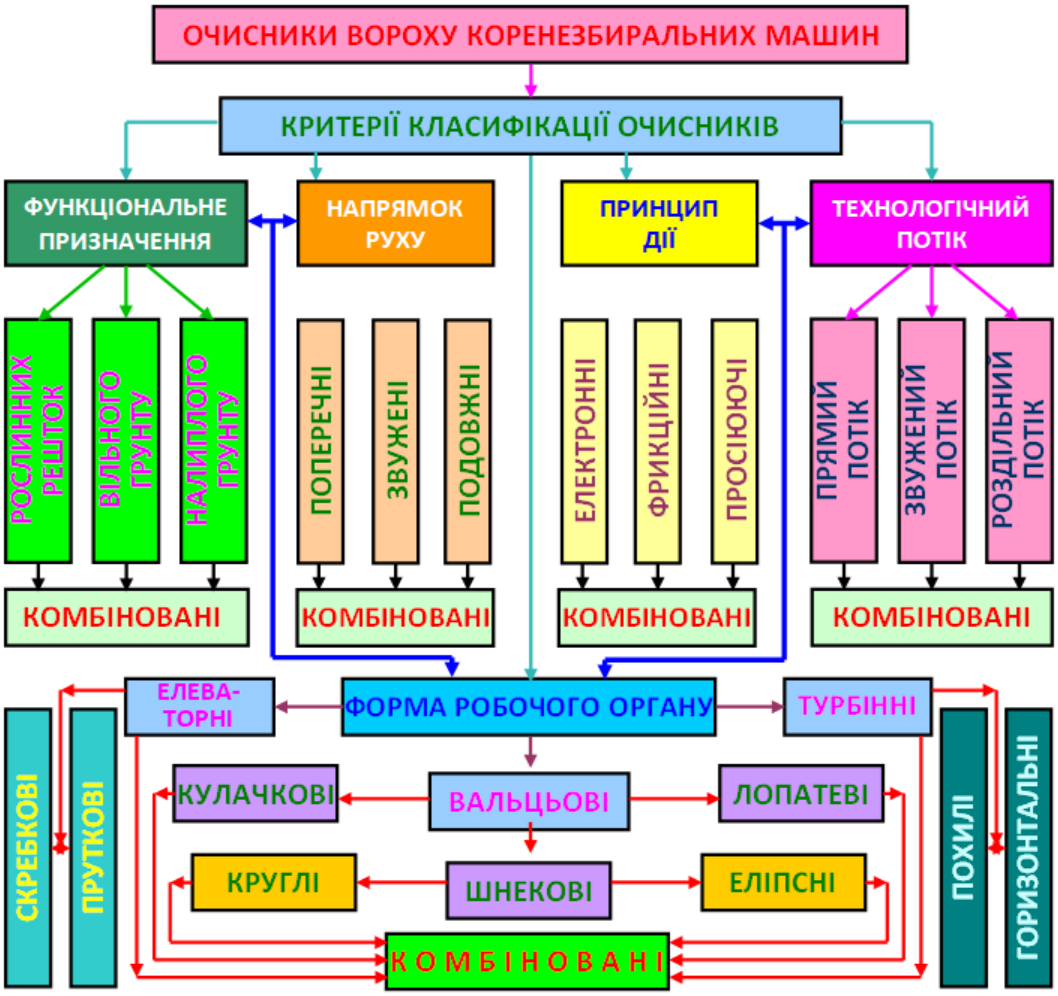



Рисунок 1.13 – Класифікація робочих органів транспортно-технологічних систем для очищення вороху коренеплодів

Загальні вигляди та конструктивно-компонувальні схеми очисних робочих органів у розрізі класифікації рисунка 1.12 наведено відповідно, у додатку А.6.1 та додатку А.7.1 [6].

Аналіз конструктивних особливостей і технологічних процесів роботи окремих робочих органів для відокремлення домішок від коренеплодів наприклад, транспортерних, кулачкових, турбінних, вальцьових тощо розглянуто й наведено у багатьох наукових працях [1 – 3, 5, 6, 15, 20, 50 – 64].

У них (у загальному) розглянуто питання переваг окремих робочих органів (наприклад, простота конструкції та виготовлення, відносна простота налагодження та обслуговування тощо) і основних недоліків, які визначають незадовільну роботу в складних умовах збирання коренеплодів, що призводить до значних втрат і пошкодження коренеплодів, значної кількості домішок у зібраних коренеплодах, значення яких перевищують встановлені показники згідно зі агротехнічними вимогами до коренезбиральних машин [65, 66].

Тому ми обмежимося тільки аналізом конструкцій і принципом роботи транспортно-очисних систем вороху коренеплодів, які утворюють транспортно-технологічні очисні модулі сучасних коренезбиральних машин і побудовані на основі різноструктурованих комбінацій окремих робочих органів для відокремлення домішок від коренеплодів.

Основними робочими органами очисників вороху коренеплодів, які застосовуються як базові структурні елементи для побудови транспортно-очисних систем або транспортно-технологічних очисних модулів сучасних коренезбиральних машин за конструктивним виконанням, є транспортерні, роторні та шнекові робочі органи [2, 15, 30, 50, 67, 68].

За своєю агробіологічною будовою викопані копачами коренезбиральної машини складові компоненти вороху коренеплодів мають різні фізико-механічні і агробіологічні властивості й характеристики, які утворюють і формують багатогранне, або складне робоче реологічне середовище «очисник-домішки-коренеплід».

При цьому ці наявні особливості структури даного середовища мають істотний і суттєвий вплив на основні показники технологічного процесу відокремлення домішок від коренеплодів робочими органами очисників [69].

Значна наявність різних за своєю структурою компонувальних схем і робочих органів очисників вороху коренеплодів й створених на їх базі комбінованих очисних систем, які відрізняються один від одного не тільки конструктивними особливостями, але й принципом дії або способом відокремлення домішок, регламентується наявністю різноскладових компонентів домішок викопаного вороху коренеплодів, які різноманітні за своїм фракційним складом і фізичним станом.

Транспортерні, турбінні та шнекові очисники розташовують безпосередньо за викопувальними робочими органами або в середній частині технологічної схеми коренезбиральної машини. Вони, як правило, здійснюють «агресивне» очищення коренеплодів від домішок, коли від коренеплодів відділяється основна маса ґрунту. Комбіновані очисні системи розташовують у кінці технологічного процесу очищення вороху коренеплодів, тобто вже безпосередньо перед фазою завантаження коренеплодів у бункер машини або в технологічний транспорт. Їх функціональне призначення – кінцеве доочищення вороху коренеплодів і до них висуваються особливі умови, а саме – максимальне відокремлення залишкових домішок при мінімізації пошкоджень і втрат коренеплодів [54, 70 – 72].

Різноманітність конструктивних схем очисних робочих органів коренезбиральних машин у прямій залежності пов’язана як із технологічними процесами збирання, так і з конструктивно-технологічними вимогами до якості відокремлення домішок від коренеплодів. Процес сепарації складових компонентів домішок із складу викопаного вороху повинен забезпечити якомога повніше відділення вільного та налиплого на коренеплодах грунту, вільних рослинних домішок і залишків гички на їх головках при допустимих невимушених пошкодженнях і втратах коренеплодів, що висуває особливі вимоги до очисних робочих органів [54, 73].

Відокремлення грунтових і рослинних домішок від коренеплодів залежить від багатьох об’єктивних і суб’єктивних факторів: від механічного складу ґрунту, його вологості та щільності; від конструкції та геометричних і кінематичних параметрів робочих органів очисників; наявності бур’янів, урожайності коренеплодів і т.п.

Відомо багато варіантів очисників вороху коренеплодів, які відрізняються один від одного не тільки конструктивним оформленням, але й технологічним принципом роботи. Це пов'язано як із закономірним розвитком конструкцій, так і з різноманітністю ґрунтово-кліматичних умов роботи збиральних машин, конкуренцією виробників продукції тощо.

Відокремлення вільних компонентів викопаного вороху, або вільного грунту, гички, яку втрачено під час збирання основного масиву, бур'янів у вигляді рослинних залишків у фрикційних очисних робочих органах відбувається за принципом різниці коефіцієнтів тертя й вагових показників коренеплодів і домішок.

Фрикційні очисні робочі органи утворені різними комбінаціями полотняних транспортерів, або різним розташуванням гірок відносно одна від одної. Вони бувають як поздовжні, так і поперечні, при цьому відповідно, напрямок руху робочої гілки гірки, є або одностороннім, або зустрічним відносно напрямку руху коренеплодів.

Відокремлення вільних компонентів викопаного вороху, або вільного грунту, гички, яку втрачено під час збирання основного масиву, бур'янів у вигляді рослинних залишків у роторних очисниках (рис. 1.14) є наслідком просіювання або сепарації вільних домішок через зазори робочої решітчастої поверхні дисків роторної турбіни 1 (рис. 1.14), їх обертання із кутовою швидкістю $\omega$ та взаємодії компонентів домішок і коренеплодів із боковою поверхнею направляючих решіток 2 [74, 75].

Турбінні очисники знайшли переважне застосування у схемах самохідних машин для збирання коренеплодів всіх провідних європейських фірм: Tim, (Данія); Kleine, Ropa Tiger 6 (Німеччина); Moreau, Herriau (Франція) тощо (додаток А.8.1).

Основною перевагою турбінних очисників або очисників роторного типу, є їх відносна конструктивна простота у виготовлені, доволі мала металомісткість конструкції та незначна складність обслуговування й налагодження [76].

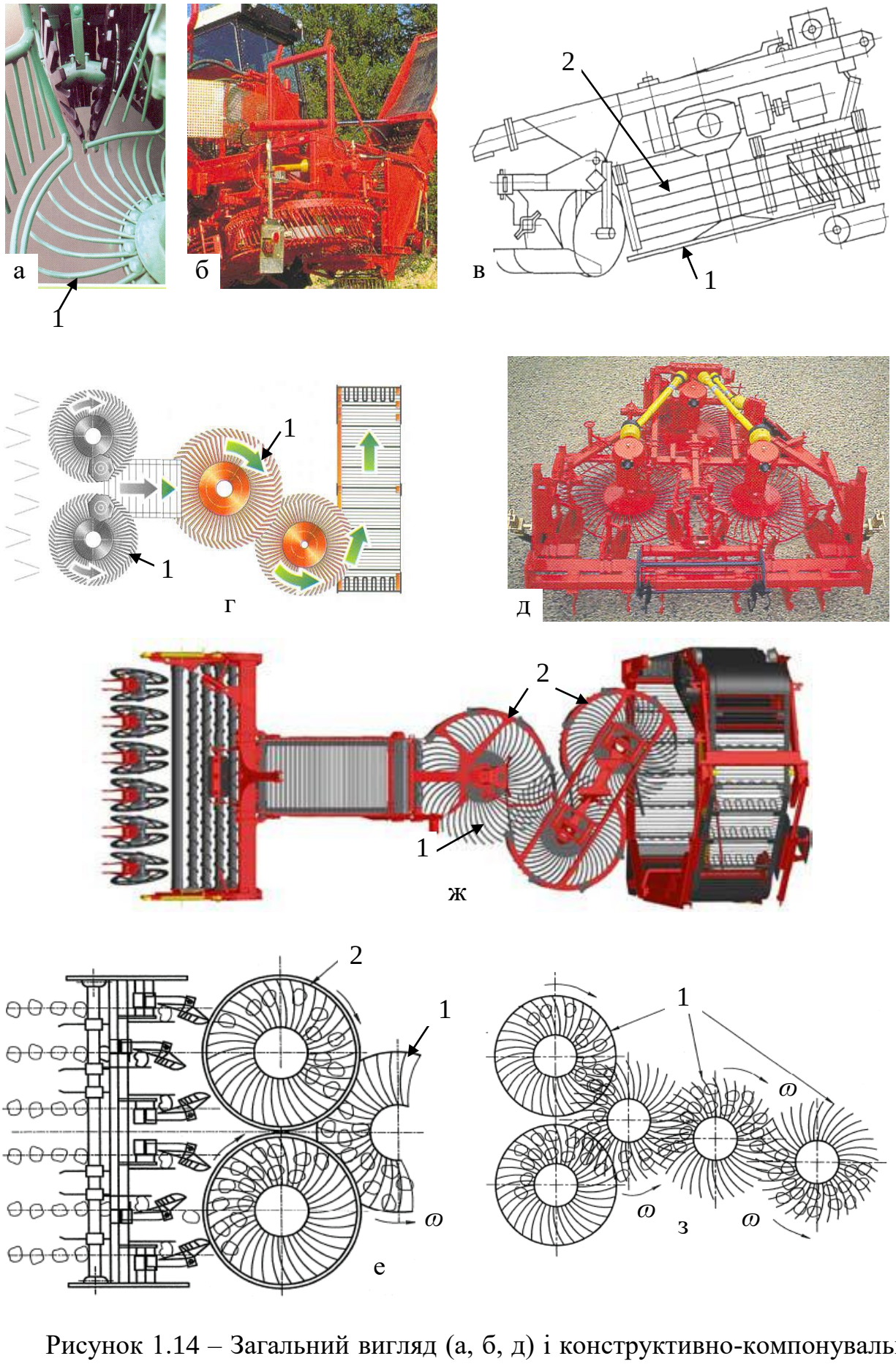



Рисунок 1.14 – Загальний вигляд (а, б, д) і конструктивно-компонувальні схеми розташування турбінних очисників (г, ж, е, з)

Проте на важких ґрунтах і в умовах перезволоженого грунту якість їх роботи значно погіршується – відсоток просіяних компонентів вільних домішок зменшується в середньому на 20-30 % при збирання цукрових буряків і на 25-35% при збирання кормових буряків за вологості грунту в межах 25-28 % [76].

Крім того в турбінних очисниках, які мають дві або більше роторних турбін відбуваються втрати коренеплодів під час їх переміщення від однієї турбіни до іншої за рахунок конструктивного зазору між дисками в зоні переходу – коренеплоди вминаються в розпушений грунт. При цьому також відбувається накопичення (здруження) маси вороху, який надходить одночасно з двох дисків роторних турбін на наступний диск й травмування коренеплодів у вигляді недопустимого зламу хвостової частини [76, 77].

Ефективність роботи турбінних очисників значною мірою залежить від кута нахилу роторної турбіни до горизонту та центрального кута обтікання ротора – кут нахилу не менше $30\text{-}35^0$, а кут обтікання – не менше $150^0$ [78], що у деяких випадках не дозволяє їх раціональне компонування у схемі машини.Найбільшого поширення у конструкціях транспортно-технологічних модулях сучасних коренезбиральних машин набули шнекові очисники вороху коренеплодів завдяки їх універсальності та простоті в обслуговування й регулювання конструктивно-кінематичних параметрів їх роботи, рис. 1.15. Із варіантів конструкцій шнекових очисників можна виділити два основних: очисники з подовжнім (рис. 1.16а, в, г) і поперечним (рис. 1.16б) рухом складових компонентів викопаного вороху коренеплодів [79].

Поперечні шнекові очисники застосовуються у багаторядних машинах для збирання коренеплодів. Їх особливістю є те, що очисні шнекові вали 1 (рис. 16.а, б, в, г, д) обертаються в одному напрямку, а спіралі 2 шнеків виготовляються з різним напрямком навивання.

Повздовжні шнекові очисники забезпечують очищення та транспортування коренеплодів у напрямку осі обертання шнеків 1 (рис. 161.е, є, ж) і характеризуються протилежним напрямком навивання та обертання спіралей 2, але мають невеликий очисний ефект.

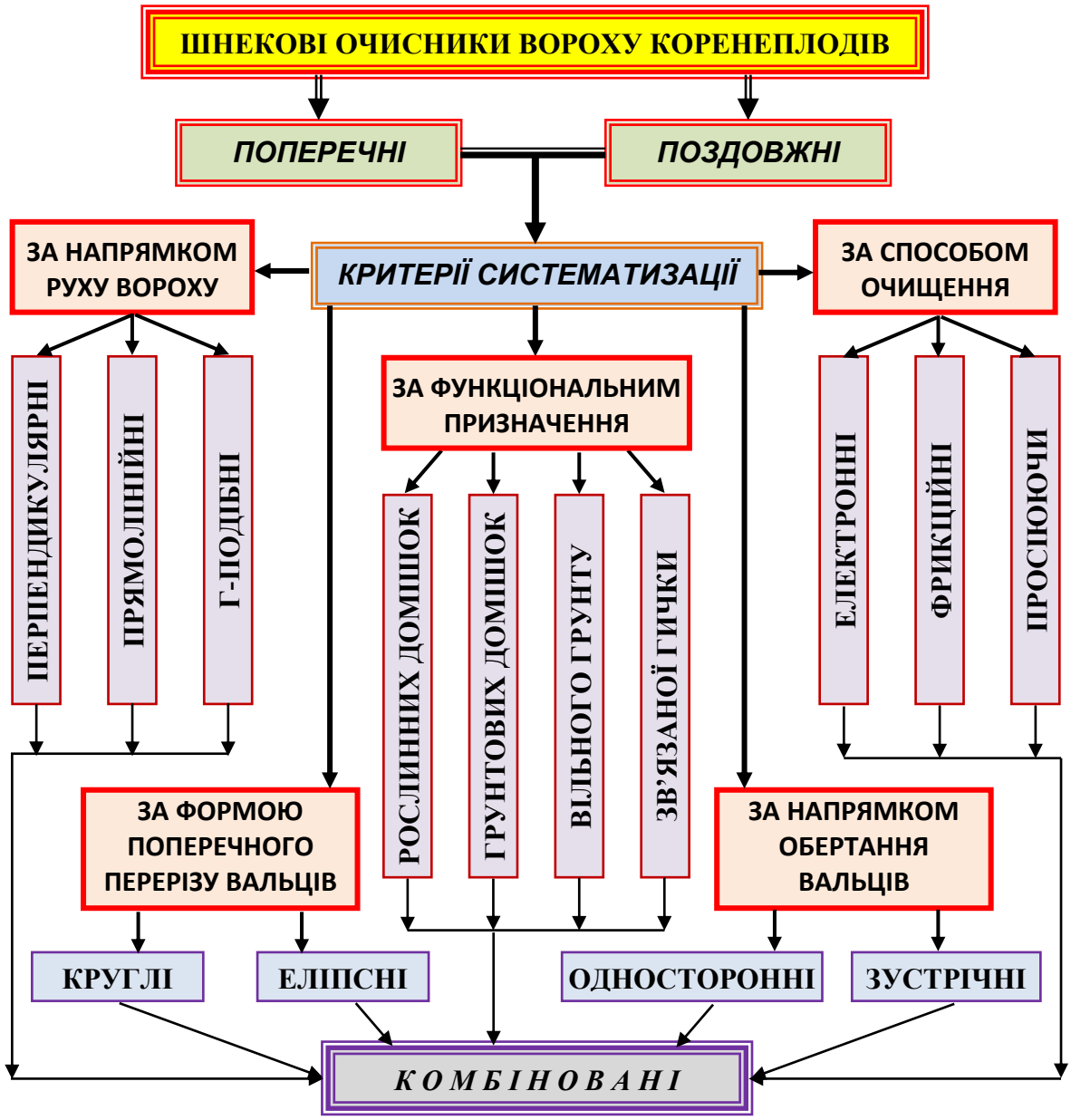
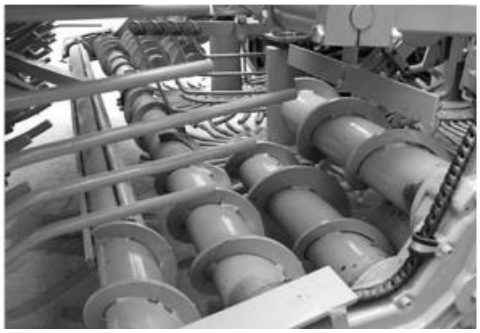



Рисунок 1.15 – Класифікація шнекових очисників вороху коренеплодів

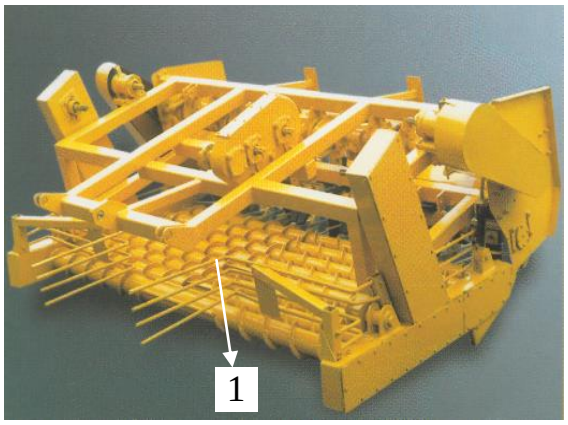
Шнекові очисники коренезбиральних машин працюють за принципом розділення складових компонентів домішок і коренеплодів “розмір”. Вони можуть встановлюватися як безпосередньо за робочими органами копачів, так і в середині її технологічної схеми залежно від їх призначення.

Шнеки, які розташовані за викопувальними робочими органами (рис. 1.16в, г), забезпечують розведення викопаного вороху до периферії валів, а задній блок шнеків зводить потік коренеплодів у зону вивантаження. При цьому шнекові робочі органи очищають і транспортують коренеплоди в напрямку осі обертання шнеків або перпендикулярно до неї.

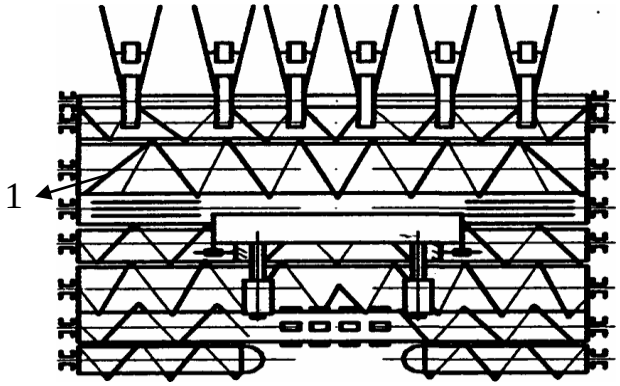


а

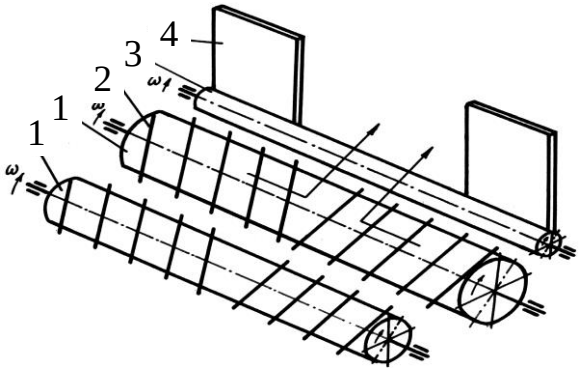
б



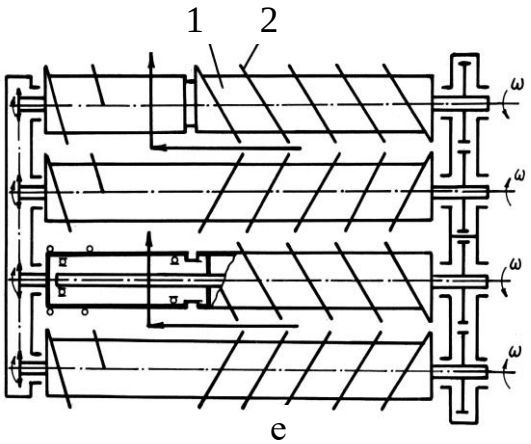

в



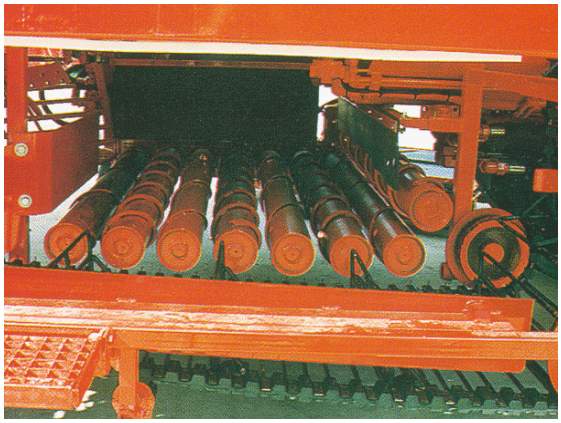

г




д




е



є

ж

Рисунок 1.16 – Загальний вигляд (а, б, в, є, ж) і конструктивна схема (г, д, е) шнекових очисників: а, б, в, г, д – поперечний; е, є, ж – поздовжній

Шнекові очисники, що мають Г-подібний вихід у середній частині шнеків забезпечують звуження потоку в процесі його передачі на наступні робочі органи (рис. 1.16д).

Повздовжні шнекові очисники (рис. 1.16е, є, ж), які характеризуються протилежним напрямком навивання та зустрічним напрямком обертання спіральних витків шнека, виконують одночасно дві технологічні операції – відокремлення домішок зі складу вороху та транспортування (переміщення) коренеплодів у напрямку осі обертання валів шнеків.

Робочі органи такого типу в основному виконують транспортувальні функції із невеликим очисним ефектом і, як правило, застосовуються замість стрічкових елеваторів або пруткових транспортерів. Конструктивна складність розташування підшипникових опор таких робочих органів і, як наслідок, виникнення “мертвих зон” на шляху транспортування вороху обмежило широке застосування повздовжніх шнекових очисників у коренезбиральних машинах.

За формою вала шнека розрізняють очисники круглого та еліпсного перерізу. Очищення вороху відбувається за рахунок підкидання коренеплодів і домішок, зскрібання частинок ґрунту витками шнеків і відокремлення зв’язаної гички та просіювання вільних домішок у зазор між валами шнеків. З метою забезпечення кращої сепарації сипучого грунту та вільних рослинних домішок вали шнеків обертаються із різними кутовими швидкостями.

Основна маса сипкого ґрунту та вільних рослинних домішок під час обробки вороху на шнекових очисниках просіюється в зазори між валами шнеків у їх передній частині, а далі за рахунок взаємодії з спіральними витками із поверхні тіла коренеплодів частково зшкрібається налиплий грунт, який також просіюється.

До переваг шнекових очисних робочих органів, які відокремлюють складові компоненти вільних і частково зв’язаних домішок від коренеплодів можна віднести простоту конструкції та відносно невеликі витрат на їх виготовлення, можливість суміщення в одному робочому органі функцій очищення й транспортування коренеплодів.

Основними недоліками шнекових очисників, є залипання шнеків грунтом у вологих ґрунтово-кліматичних умовах їх роботи, що значно знижує показники якості процесу відокремлення домішок від коренеплоді, а також значні пошкодження коренеплодів під час безпосередньої взаємодії з витком шнека, ймовірність чого збільшується у процесі збирання коренеплодів на твердих ґрунтах із вологістю грунту 15 % і менше. Із підвищенням вологості грунту до 28% очисники втрачають працездатність [79].

Головним загальним недоліком роботи очисних робочих органів у важких умовах збирання коренеплодів є те, що очищення коренеплодів від домішок відбувається в одному технологічного потоці, коли коренеплоди і домішки пересуваються по поверхні очисних робочих органів у одному повздовжньому напрямку, що значно утруднює їх сепарацію [78, 80].

Для регулювання ступеня агресивної дії очисних поверхонь на коренеплоди та інтенсифікації процесу відокремлення складових компонентів домішок запропоновано застосовувати комбіновані очисні системи, які представляють собою поєднані комбінації елеваторних і шнекових очисних робочих органів та застосовуються залежно від конкретних функцій очисних пристроїв, умов роботи тощо [80].

Підвищення технологічної ефективності роботи очисних систем вороху коренеплодів шляхом збільшення активності їх робочих поверхонь було досягнуто за рахунок розмежування одного суцільного потоку коренеплодів і домішок на два взаємно перпендикулярні потоки, яке реалізовано на основі застосування комбінованих очисників вороху [13, 15, 19, 50, 81, 82].

Базовими елементами комбінованих очисників вороху коренеплодів, є прутковий транспортер 1 (рис. 1.17), який встановлено горизонтально й розміщений у вихідній зоні транспортера відвідний шнековий конвеєр 2, який встановлено із зазором відносно прутка 3 робочої гілки транспортера [82 – 100].

При цьому шнековий конвеєр встановлено перпендикулярно напрямку швидкості руху $\upsilon_{mp}$ робочої гілки транспортера та виконано (як базовий варіант) у вигляді трубі 4, на якій по гвинтовий лінії закріплено витки 5.

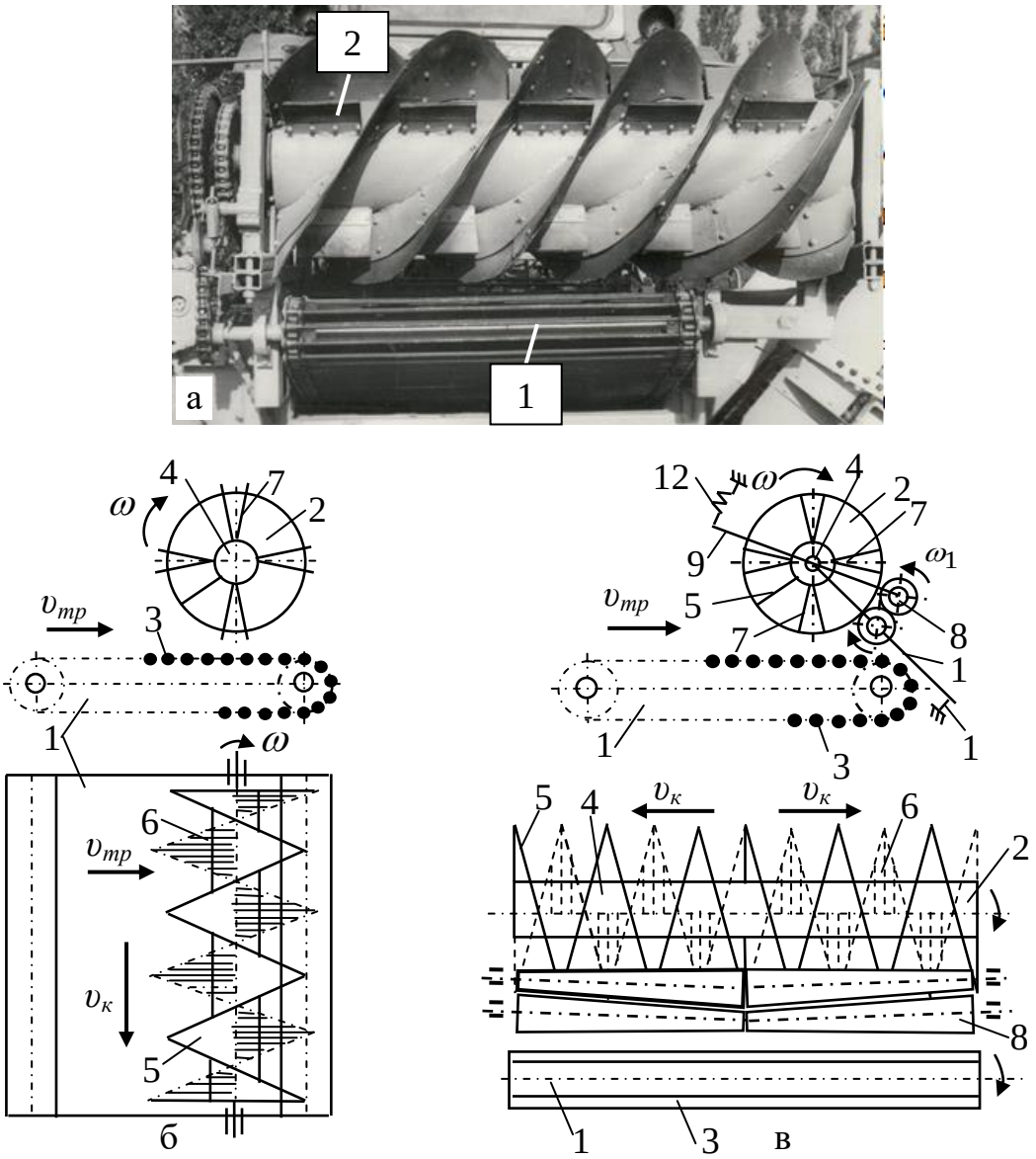



Рисунок 1.17 – Загальний вигляд (а) і конструктивна схема (б, в) комбінованої очисної системи

Ворох по робочій гілці транспортера 1 подається до шнека 2, при цьому частина вільних рослинних домішок просіюється у зазор між прутками 3. Спіральні витки 5 шнека 2 відводять коренеплоди вздовж осі їх обертання у сторону вивантажувальної зони, а домішки проходять у зазор між прутками 3 транспортера та торцями спіральних витків і виносяться транспортером за межі очисної системи.

Крім того, відбуваються випадки співудару грудок грунту із спіральними витками шнека. Грудки грунту руйнуються, а вся сипуча земля та дрібні рослинні домішки або просіюються в зазор між прутками транспортера, або сходять з нього через зазор між гвинтом і прутками транспортера.

Для усунення можливих втрат коренеплодів через зазор між шнеком і робочою гілкою транспортера, різновидності конструктивного виконання такої комбінованої очисної системи доповнюються встановленими за шнеком одного, або двох приводних відминальних вальців 8, які можуть мати циліндричну або конічну форму. Пройдені за шнек коренеплоди за рахунок контакту з вальцем повертаються у зону дії спіральних витків. Крім того, приводні відминальні вальці, які обертаються зустрічно, у процесі роботи видаляють залишки гички на головках коренеплодів за рахунок їх відминання шляхом затягування зв'язаної гички між робочі поверхні вальців.

Для усунення заклинювання коренеплодів або інших інородніх тіл у зазорі, вальці встановлюють шарнірно шляхом закріплення на верхньому 9 та нижньому 10 важелях. При цьому поворот нижнього важеля обмежений встановленими упорами 11, а верхній відминальний валець за рахунок пружини 12 виконаний підпружиненим відносно нижнього відминального вальця. При попаданні тіла між прутком і вальцем відбувається переміщення вальця вгору, зазор між прутком і вальцем збільшується до розміру висоти тіла, тіло проходить у зазор і виноситься транспортером за межі очисника.

Для підвищення інтенсифікації відокремлення зв'язаних грунтових і рослинних домішок шнек доповнюється пружними очисними елементами 6, які набрані із пучків ворсу 7 та змонтовані на барабані шнека між спіральними виткам, а напрямок навивання гвинтової лінії спіральних витків і очисних пружних елементів зустрічний. Пружні очисні елементи взаємодіють з тілом коренеплодів, при цьому тіло коренеплодів очищається від налиплого грунту.

Для підвищення очисного ефекту шляхом збільшення шляху переміщення коренеплодів вздовж осі обертання спіральних витків, шнек встановлюють під кутом до напрямку руху транспортера, додаток А.9.1. [101].

Для узгодження ступеня очищення налиплого грунту на коренеплодах і ступеня допустимих пошкоджень шляхом ступеневого регулювання необхідної кутової швидкості очисних елементів, яка була б відмінною від кутової швидкості шнека за рахунок виконання шнека у вигляді пустотілого гвинтового циліндра 5 (додаток А.10.1), у просторі пустотілого гвинтового циліндра

розташований приводний вал 12 з очисними двозаходними пружними елементами 17 та виконання незалежних приводів шнека і вала [30, 102, 103].

Для підвищення очисного ефекту шляхом збільшення кількості відокремлення зв'язаних і відносно великих рослинних домішок, за прутковим транспортером 1 (додаток А.11.1) встановлюють декілька пар приводних відминальних вальців 3, які охоплюють шнек 2, формуючи при цьому очисний кожух [104].

Для інтенсифікації процесу відокремлення домішок від коренеплодів очисною системою з бокової вихідної вивантажувальної зони шнека 3 (додаток А.12.1) під кутом до горизонту встановлено очисну пальчикову гірку 9, за нижнім сходом якої й під завантажувальним транспортером 1 розташовані послідовно поперечний 10 та вивантажувальний 11 транспортери [19, 105].

Основна складність очищення вороху коренеплодів, який викопується копачами коренезбиральної машини з навколоплідного грунтового середовища, функціонально пов'язана із необхідністю відокремлення різних за своїми фізико-механічними станами та властивостями грунтових і рослинних домішок, які перебувають відносно коренеплодів у вільному та пов'язаному станах [1, 6, 7, 50, 52, 106].

Значне погіршення показників якості роботи коренезбиральних машин відбувається в умовах сухого та вологого ґрунту, значної забур'яненості посівів коренеплодів, значного варіювання нерівності поверхні поля та розташування коренеплодів у рядку та їх головок над грунтом тощо. При збільшенні вологості ґрунту до 22-28 % якість роботи збиральних машин погіршується в 2-6 рази, а на сухих твердих ґрунтах спостерігається значне (до 20-40 %) забруднення вороху коренеплодів грудками землі [1, 50, 107 – 109].

Таким чином, інтенсифікація технологічного процесу очищення коренеплодів від домішок, особливо відокремлення налиплого грунту та рослинних домішок на поверхні тіла коренеплодів, досягається шляхом динамічної дії пружних очисних елементів приводного вала на компоненти домішок вороху за рахунок знакоперемінного напрямку прикладання зусиль контакту пружних очисних елементів до тіла коренеплодів.

## 1.2. Аналіз алгоритмів розроблення технологічних процесів і оптимізації параметрів робочих органів комбінованих очисних систем вороху коренеплодів

Наукові дослідження, які регламентують розробку наукових концепцій та алгоритмів побудови, функціонування й сфери застосування основних транспортно-технологічних систем сільськогосподарських машин, частково ґрунтуються на методах і принципах, які викладено у багатьох наукових працях [3, 5, 14, 52, 53, 110 – 131] та інших.

За основу розроблення техніко-математичних моделей технологічних об’єктів використанно загальні положення, які описують сутність базисних статично-кінематичних і динамічних елементів розроблення у вигляді функціональних залежностей, що характеризують технологічні процеси агропромислового комплексу: обробіток грунту, посів культур, догляд за посівами, захист культури, збирання врожаю, транспортування матеріалу, переробку сировини тощо.

У галузі загальних аспектів виробництва коренеплодів ці питання на відповідному рівні розглянуто в наукових працях [132 – 155] та інших, де наведено та викладено методи та основи розроблення аналітично-емпіричних математичних моделей, які описують:

- методи і методологію розроблення алгоритмів конструктивно-технологічної структури коренезбиральних машин загалом і базових ТТС КМ (Адамчук В. [132-135], Барановський В. [136, 137], Василенко А. [138], Василенко П. [139, 140], Мартинов В. [141, 142], Підгурський М. [143], Теслюк В. [144]);

- методи та методологію функціонування ТТС і КМ загалом (Булгаков В. [145], Волоха М. [146], Войтюк Д. [147], Гевко Р. [148], Погорілий Л. [149], Полупанов В. [150], Хелемендик М. [151]) та іншими вченими.

Складовою та однією з пріоритетних частин загальних аспектів функціонування коренезбиральних машин є методологія та методи розроблення наукових концепцій і гіпотез математичного моделювання транспортно-технологічних очисних систем коренезбиральних машин і оптимізація параметрів процесу відокремлення домішок від крупних коренеплодів.

Найбільш повно ці процеси розглянуто вченими Барановським В., Гевком Р., Головачем І., Козаченком О., Мартиновим В., Погорілим Л., Рогатинським Р., Татьянком М., Шабельником П. та ін. зарубіжними вченими, які викладено в наукових працях [156 – 174].

Наукові праці академіка НААН України Адамчука В. [51, 132-135, 175,] присвячені розробленню базисних засад і методологічних аспектів формування агротехнічних вимог і конструктивних рішень аграрної техніки сучасного рівня, в тому числі сучасних самохідних бункерних комбайнів для збирання коренеплодів. Ним визначені пріоритетні напрямки ефективного застосування та раціонального використання сучасних агропромислових машин.

У наукових працях Барановського В., Підгурського М. [2, 6, 38, 50, 61, 80, 143, 156, 157, 178] та Теслюка В. [13, 79, 108, 144] запропоновано та викладено методологію та методи розроблення алгоритму (рис. 1.18) та побудови структурної моделі (рис. 1.19) адаптованих коренезбиральних машин, які призначені для збирання коренеплодів цукрових, кормових, столових буряків і моркви.

Методологія та методи розроблення сформульовано на основі застосування в конструктивно-технологічній схемі коренезбиральних машин адаптованих транспортно-технологічних моноблочних базових систем викопування коренеплодів (АВТОКРО), очищення викопаного вороху від домішок (АТОКРО) і завантаження коренеплодів.

Ними запропоновано, що передумовами прогнозування ефективного розроблення та побудови коренезбиральних машин повинно бути [6, 13, 50, 61, 80]:

- системний підхід до визначення класифікаційних ознак конструктивно-функціональних критеріїв поділу коренезбиральних машин, їх викопувальних і очисних робочих органів;

- механіко-технологічні основи розроблення процесів адаптованого застосування машин для збирання коренеплодів на основі загальних принципів використання машинно-тракторних агрегатів і оптимізації параметрів робочих органів транспортно-технологічних систем;

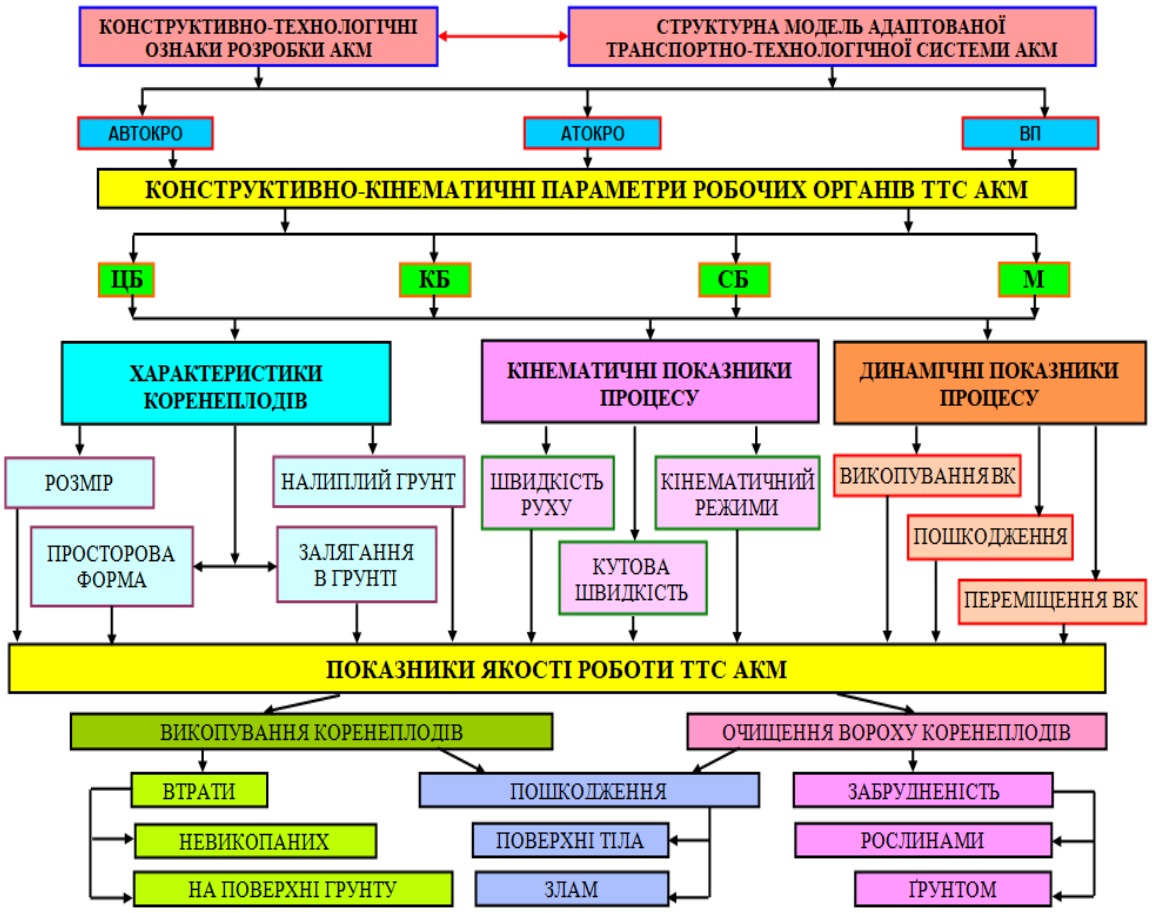



Рисунок 1.18 – Алгоритм розроблення адаптованих коренезбиральних машин

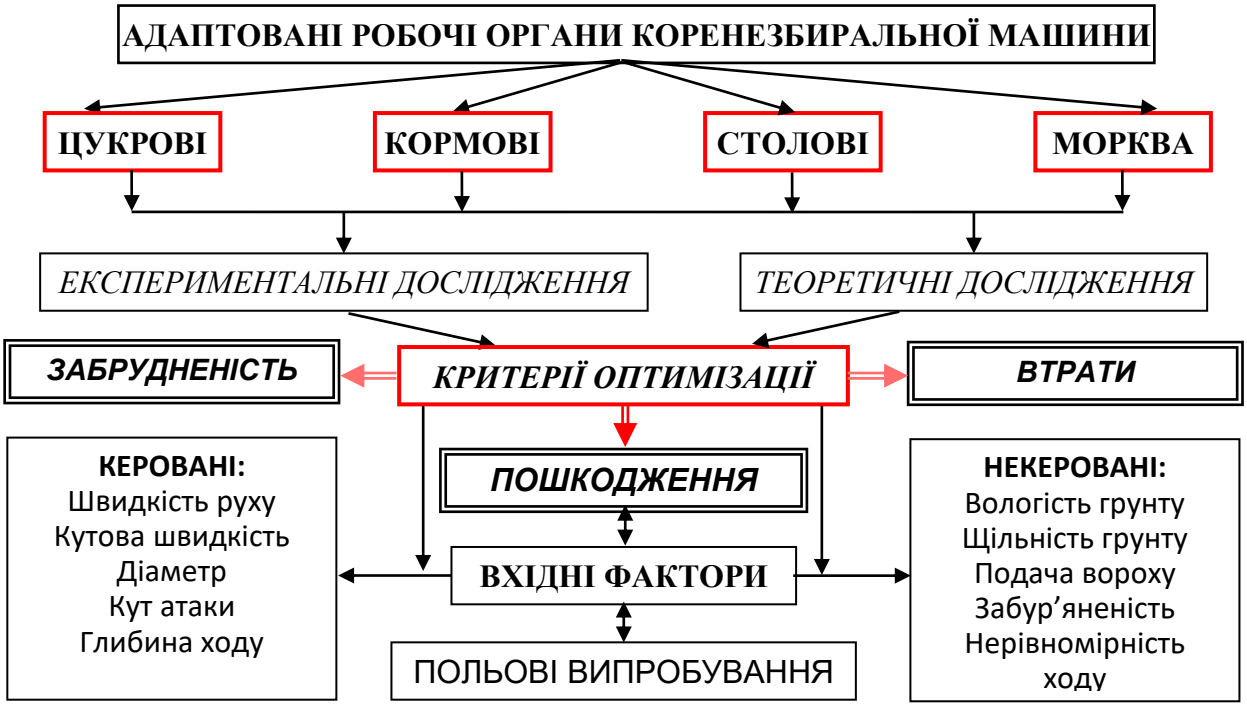



Рисунок 1.19 – Структурна модель алгоритму розроблення адаптованих робочих органів

- розроблення методологічних принципів побудови моноблочних схем коренезбиральних машин із використанням мобільного енергетичного транспортного засобу;

- розроблення компонувальних схем розташування адаптованих робочих органів у технологічному процесі роботи коренезбиральних машин на основі їх раціонального функціонування й забезпечення показників якості роботи.

Запропонована ними ідентифікація процесу розроблення конструктивно-компонувальної схеми базових модулів коренезбиральної машини АВТОКРО та АТОКРО, яка базується на основі універсалізації робочих органів наведена у додатку А.13.2.

На основі аналізу часової зміни потоку технологічної маси коренеплодів домішок із запізненням (рис. 1.19), або рівнянь матеріального балансу [13, 144], Барановським В. [6] розроблено диференціальні рівняння функціонального процесу інтенсифікації відокремлення структурних компонентів домішок залежно від параметрів робочих органів транспортно-технологічних систем машини, характеристик коренеплодів і умов роботи коренезбиральної машини:

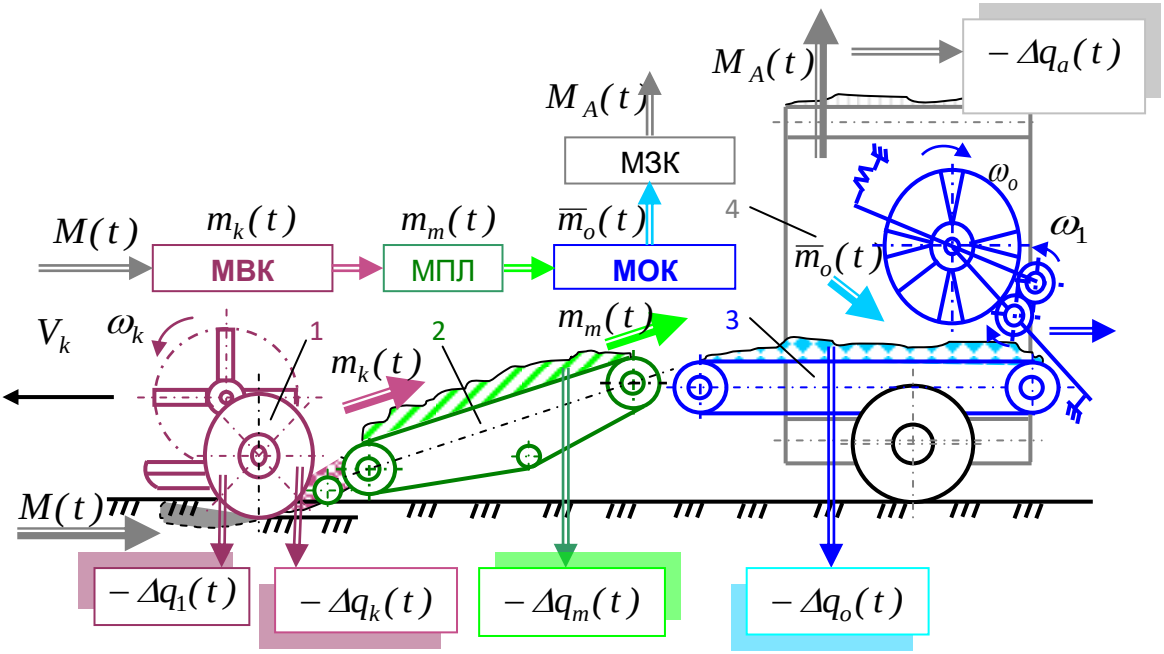



Рисунок 1.20 – Структурно-функціональна схема машини для збирання коренеплодів: 1 – модуль викопування коренеплодів (МВК); 2 – модуль проміжної ланки (МПЛ); 3 – модуль очищення коренеплодів (МОК); 4 – модуль завантаження коренеплодів (МЗК)

$$a_1^{(k)}\frac{d[\Delta q_1(t)]}{dt}+a_0^{(k)}\frac{d[\Delta q_k(t)]}{dt}+a_0^{(m)}\frac{d[\Delta q_m(t)]}{dt}+a_0^{(o)}\frac{d[\Delta q_o(t)]}{dt}+a_0^{(a)}\frac{d[\Delta q_a(t)]}{dt}=$$
$$=b_0M(t-\tau_k)-c_0^{(k)}m_k(t)+b_0^{(k)}m_k(t-\tau_m)-c_0^{(m)}m_m(t)+ \quad , \ (1.1)$$
$$+b_0^{(m)}m_m(t-\tau_o)-c_0^{(o)}m_o(t)+b_0^{(o)}m_o(t-\tau_a)-c_0^{(a)}M_A(t)$$

де $a_1^{(k)}$, $a_0^{(c)}$, $a_0^{(k)}$, $a_0^{(m)}$, $a_0^{(o)}$, $a_0^{(a)}$, $b_0$, $b_0^{(k)}$, $b_0^{(m)}$, $b_0^{(o)}$, $c_0^{(k)}$, $c_0^{(m)}$, $c_0^{(o)}$, $c_0^{(a)}$ – змінні коефіцієнти в функції параметрів робочих органів, характеристик грунту, урожайності коренеплодів тощо, які визначаються експериментальним шляхом;

$\Delta q_1(t)$ – кількість втраченого потоку коренеплодів і домішок робочими органами МВК;

$\Delta q_k(t)$ – кількість відокремленого потоку домішок;

$m_k(t)$, $m_m(t)$, $m_o(t)$, $M(t)$ – вхідна маса потоку вороху, яка зв'язана з часом $t$ і шириною захвату МВК, кг;

$M_a(t)$ – вихідна кількість потоку компонентів вороху з МВК, МПЛ, МОК, МЗК;

$\Delta q_k(t)$, $\Delta q_m(t)$, $\Delta q_o(t)$, $\Delta q_a(t)$ – відокремлена кількість потоку домішок вороху робочими органами МВК, МПЛ, МОК, МЗК;

$t$, $\tau_k$, $\tau_m$, $\tau_o$, $\tau_a$ – час руху потоку на робочому органі та час запізнення руху потоку коренеплодів і домішок у процесі роботи.

Застосувавши до розробленої на основі рівняння матеріального балансу та поняття «вхід-вихід» системи математичної моделі Погорілого Л., Татьянка М. [1] перетворення Лапласа й представивши складну технічну систему або транспортно-технологічні системи коренезбиральної машини (рис. 1.20) у вигляді з'єднаних між собою структурних операторних ланок (рис. 1.21, додаток А. 14.2), отримав детерміновані математичні моделі динамічного процесу відокремлення домішок від коренеплодів із транспортним запізненням у класичній (часовій) і операторній формі:

- для транспортної ланки МВК

$$W_k(s)=\frac{m_k(s)}{M(s)}=\frac{K_k}{T_ks+1}e^{-s\tau_k}=m_k(s)\left[\frac{P_k}{m_1(t)+m_2(t)}s+1\right]=M(s)\cdot\left[1-\frac{\Delta q_1(t)-\Delta q_k(t)}{M(t)}\right]e^{-s\tau_k}; \ (1.2)$$

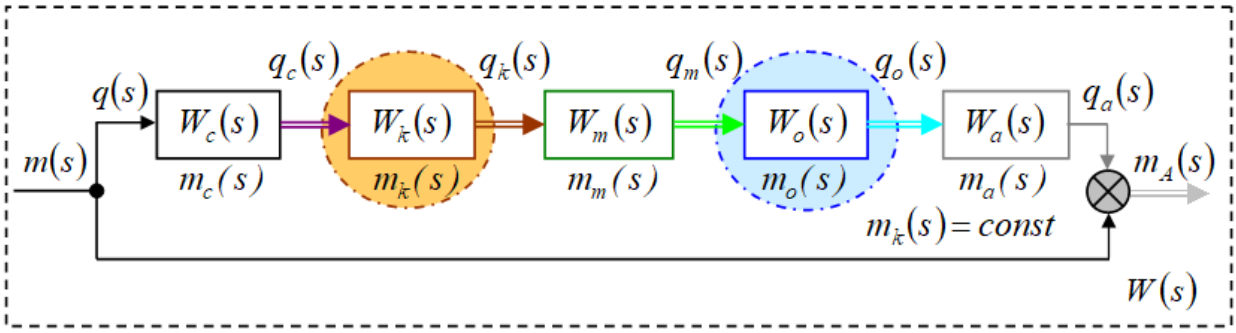



Рисунок 1.21 – Структурно-функціональна модель з'єднання ланок транспортно-технологічних систем коренезбиральної машини

- для транспортної ланки МПЛ

$$W_m(s)=\frac{K_m}{T_m s+1}e^{-s\tau_m}=m_m(s)\left[\frac{P_m}{m_1(t)+m_2(t)-\Delta q_1(t)-\Delta q_k(t)}s+1\right]=m_k(s)\cdot\left[1-\frac{\Delta q_m(t)}{m_k(t)}\right]e^{-s\tau_m};\ (1.3)$$

- для транспортної ланки МОК

$$W_o(s)=\frac{K_o}{T_o s+1}e^{-s\tau_o}=m_o(s)\left[\frac{P_o}{m_1(t)+m_2(t)-\Delta q_1(t)-\Delta q_k(t)-\Delta q_m(t)}s+1\right]=$$
$$=\bar{m}_m(s)\cdot\left[1-\frac{-\Delta q_o(t)}{m_m(t)}\right]e^{-s\tau_o};\quad (1.4)$$

- для транспортної ланки МЗК

$$W_a(s)=\frac{K_a}{T_a s+1}e^{-s\tau_a}=M_A(s)\left[\frac{P_a}{m_1(t)+m_2(t)-\Delta q_1(t)-\Delta q_k(t)-\Delta q_m(t)-\Delta q_o(t)}s+1\right]=$$
$$=m_o(s)\cdot\left[1-\frac{-\Delta q_a(t)}{m_o(t)}\right]e^{-s\tau_a}.\ (1.5)$$

Розроблені моделі за подальшого накладення початкових умов (обмежень) і визначення експериментальних коефіцієнтів диференціального рівняння (1.1) дозволяють проводити оптимізацію параметрів процесу відокремлення домішок від коренеплодів кожною транспортно-технологічною системою і коренезбиральною машиною загалом.

Войтюк Д. і Булгаков В. розглянули загальні питання кінематично-динамічних процесів переміщення машини по нерівностях поля, викопування коренеплодів вібраційними копачами та очищення коренеплодів вальцьовими очисниками на основі розроблення математичних моделей [145, 147, 176].

Василенком А. [138] запропоновано загальні схеми структурних елементів одних із перших українських коренезбиральних машин і конструктивних особливостей робочих органів для зрізування гички, викопування та очищення коренеплодів. Запропонована конструктивна схема дворядного українського комбайна КС-4 (1930 р, додаток А.15.2.) була прототипом і основою для подальшої розроблення сучасних начіпних комплексів і самохідних коренезбиральних машин для однофазного способу збирання коренеплодів.

Видатним вченим, засновником основ теорії технічної механіки, яка моделює процеси аграрної інженерії, професором Василенком П. [139, 140, 177] було розроблено першоджерельні алгоритми та аспекти функціонування робочих органів як для викопування коренеплодів, так і для відокремлення домішок від коренеплодів.

Професором Василенком П. розроблено першоджерельні алгоритми та методи побудови механіко-математичних моделей, які дозволяють проводити розрахунок і оптимізацію параметрів робочих органів під час взаємодії компонентів викопаного вороху з робочими поверхнями коренезбиральних машин.

Волоха М. [9, 31, 146, ] констатує, що методологічним питанням аналізу технічних систем, які призначено для збирання коренеплодів, є першочергове визначення впливу факторів на вихідні параметри стохастичних об’єктів дослідження. Для їх дослідження запропоновано застосовувати: статистичне дворівневе моделювання (рис. 1.22), при цьому багатофакторний аналіз є складовою багатомірного статистичного аналізу, який реалізується на основі розробленої схеми проведення багатофакторного аналізу, рис. 1.23; агентне моделювання складних технічних систем (рис. 1.23, додаток А.16.2),

Ним акцентовано, що кожному конкретному значенню вхідних впливів $x = f(x_1,...,x_n)$, або параметрам процесу необхідно задавати відповідні вектори технологічних оцінок $f(x) = \left( f(x_1),..., f(x_q) \right)$, або векторів критеріїв, а задачу прийняття рішень сформульовано (формалізовано) у вигляді

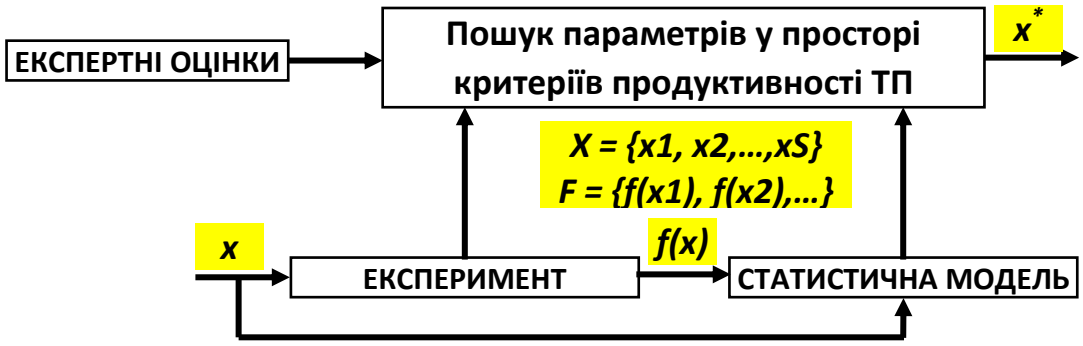



Рисунок 1.22 – Структура постановки задачі дворівневого моделювання

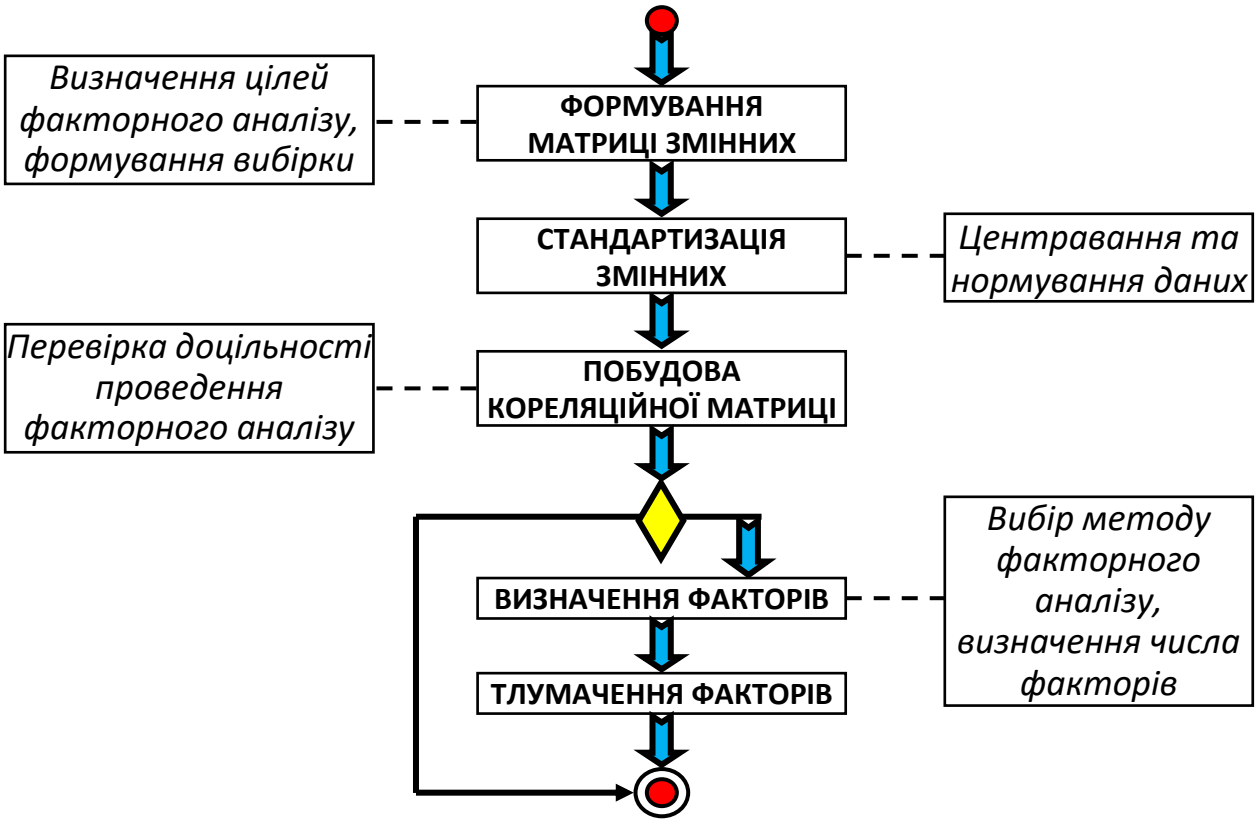



Рисунок 1.23 – Узагальнена схема проведення факторного аналізу

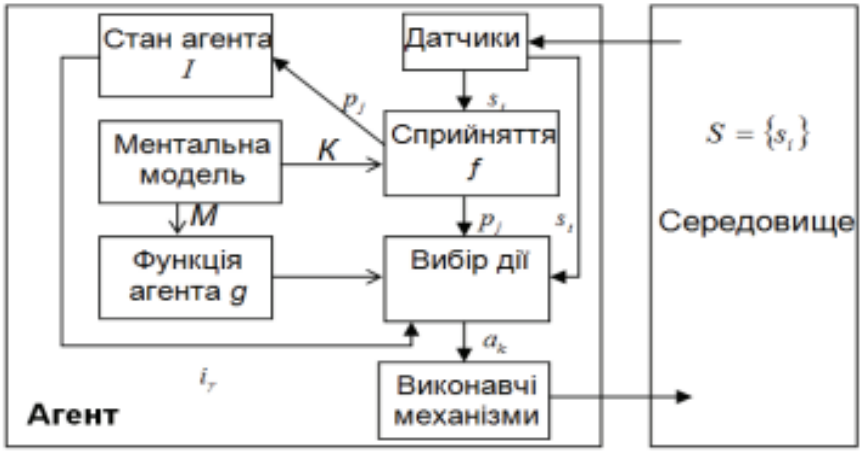



Рисунок 1.24 – Формалізована архітектура агента

$$\max_{x\in X} f_i(x),\ i=1,...,q;\ X=\left\{x: x\in\Omega, g_i(x)\geq b_j, j=1,...,L\right\}, \qquad (1.6)$$

де $f_i(x)$ – локальні критерії, які отримані за результатами обчислення розроблених моделей, або за результатами експериментального вимірювання; $g_i(x)\geq b_j, j=1,...,L$ – функції обмежень допустимих показників *X* процесу; $\Omega$ – множина вхідних параметрів (контактів) процесу.

При цьому прогнозований результат моделювання буде знаходитися в об'ємному просторі векторів встановлених критеріїв показників якості технологічного процесу.

Розроблена агентна модель (рис. 1.24) об'єднує одночасно три типи агентів, які утворюють технічну систему «робочий орган-грунт-матеріал», при цьому агенти моделюють робочі органи машини, які впливають на внутрішнє середовище обробки для досягнення необхідних показників якості роботи, а зовнішнє середовище може бути представлене двома способам, при цьому всю сукупність (множина) контактів входу та виходу записано у вигляді:

- у вигляді обраного дослідником одного окремого елемента входу та виходу об'єкту дослідження

$$\left[X_i^j\right]_N=\bigcup_{j\in 0,N}\left[X_i^j\right]_1^{n_i};\ \left[Y_i^j\right]_N=\bigcup_{j\in 0,N}\left[Y_i^j\right]_1^{r_i}; \qquad (1.7)$$

- у вигляді множини елементів входу та виходу об'єкту дослідження, яка формує джерела сигналів і приймачі сигналів, які є взаємопов'язаними та взаємозалежними один від одного

$$\left[X_i^j\right]_N=\left\{\bigcup_{j\in 1,N}\left[X_i^j\right]_1^{n_i}\right\}\bigcup\left\{\bigcup_{j\in 1,j^*}\left[X_i^{0j}\right]_1^{n_i}\right\};\ \left[Y_i^j\right]_N=\left\{\bigcup_{j\in 1,N}\left[U_i^j\right]_1^{r_j}\right\}\bigcup\left\{\bigcup_{j\in 1,k^*}\left[X_l^{0k}\right]_1^{r_i}\right\}. \qquad (1.8)$$

Взаємодія між входом і виходом сигналів, або множини $\left[X_i^j\right]_N$ та $\left[Y_i^j\right]_N$ регулюється оператором $R$, що відтворює зображення $R:\left[X_i^j\right]_N\rightarrow\bigcup_{j\in 0,N}\left[Y_i^j\right]_N$, $Y_l^k=R/X_i^j$, тобто при цьому задіяні елементи входу та виходу взаємопов'язані елементарним каналом.

Вагомий внесок в методи моделювання та принципи розроблення механіко-математичних моделей процесів роботи коренезбиральних машин і окремих робочих органів транспортно-технологічних систем було внесено вченими Гевком Б., Гевком Р., Рогатинським Р. і Пилипцем М. [53, 117, 169, 51, 57 – 59, 131, 148, 158, 178]. Вони запропонували нові конструктивні ознаки та технічні моделі рішення питань розроблення й застосування шнекових робочих органів і пруткових (скребкових) транспортерів у системах доочищення коренеплодів від домішок на основі узагальнюючої ідентифікації та синтезу очисних пристроїв. У контексті розроблених математичних моделей оптимізовано параметри процесу взаємодії коренеплодів із робочими поверхнями очисників.

Гевком Б., Рогатинським Р. і Пилипцем М. [117, 169, 178, 179], на основі аналізу процесів руху коренеплодів і домішок поверхнями еліпсних шнекових очисників, обґрунтовано специфіку зміни характеру переміщення коренеплодів у технологічному руслі еліпсних шнеків, встановлено межі зміни коефіцієнта динамічності очищення залежно від співвідношення параметрів еліпсних валів.

При цьому раціональні параметри процесу відокремлення грунтових домішок від коренеплодів знаходяться в межах: кутова швидкість еліпсних шнеків від 15 до 30 рад/с; осьова швидкість руху вороху відносно поздовжньої осі обертання еліпсних шнеків від 0,5 до 1,0 м/с; коефіцієнт динамічності очищення від 0,5 до 0,8.

Розроблені ними математичні моделі, дозволяють описати та оцінити ступінь пошкодження коренеплодів $W$ при центральному пружному ударі, які є наслідком виникаючих максимальних напружень $\sigma_{\max}$:

$$\sigma_{\max} = 0,364 K_{ij}^{1,07} m^{0,2} V_0^{0,4} \left( K_1 + K_2 \right)^{0,467}; \tag{1.9}$$

$$W = 100 \left( K_Д^б / \left( K_Д^м + C \right) \right) n, \tag{1.10}$$

де $K_{ij}$ – параметр моделі; $V_0$ – початкова швидкість контакту коренеплоду; $K_1$, $K_2$ – відповідно мінімальна кривина поверхні контакту та коренеплоду; $K_Д^б$, $K_Д^м$ – відповідно коефіцієнти динамічності очищення; $C$, $n$ – коефіцієнти геометричної форми робочого органу.

Гевком Р. [158] на основі висунутої гіпотези, що коренеплід із налиплим грунтом пересувається поверхнями очисних робочих органів як одне ціле тіло, запропоновано модель інтенсивності $\lambda$ відокремлення домішок від коренеплодів у вигляді функції безрозмірних параметрів у множині значень $\pi_i \in \left\{ \omega\sqrt{r/g};\ \ a/g; r\varepsilon/g;\ \ rda/\left(gv_н/dt\right);\ \ r^2 d\varepsilon/\left(gv_н/dt\right) \right\}$ із відповідними дольовими коефіцієнтами

$$\lambda = -\frac{d\left(\Delta m_t\right)}{\Delta m_t dt} = \lambda_1\omega + \lambda_2 a + \lambda_3\varepsilon + \lambda_4\frac{da}{dt} + \lambda_5\frac{d\varepsilon}{dt}, \qquad (1.11)$$

де $\omega$, $a$, $\varepsilon$ – відповідно, кутова швидкість, лінійне та кутове прискорення коренеплоду; $r$ – радіус коренеплоду; $v_н$ – швидкість поширення зсувних напружень у грунті.

При цьому втрати домішок на поверхні шнекових очисників моделюються функцією $C_\tau\left(t\right)$

$$C_\tau = e^{\psi t}\left[1 + a\sin\left(\frac{V_n}{d_n}t + \varphi_n\right)\right], \qquad (1.12)$$

де $\psi$, $a$ – коефіцієнти параметрів, які визначаються експериментальним шляхом; $V_n$, $d_n$ – приведені поздовжня швидкість переміщення вороху і діаметр шнеків; $\varphi_н$ – початковий фазовий кут обертання коренеплоду.

Також ним акцентовано, що інтенсивність сепарації грунтових домішок і налиплого грунту на поверхні тіла коренеплоду в значній мірі залежить від меж зміни кутової швидкості його обертання у процесі його переміщення поверхнями робочого органу, а кількість відокремленого грунту із поверхні тіла коренеплоду $\Delta m$ визначати за експоненціальною залежністю

$$\Delta m(t) = \Delta m_o e^{\lambda(t,t_o)}, \qquad (1.13)$$

де $\Delta m_o$ – маса ґрунту у початковий момент переміщення коренеплодів по робочих органах очисника, кг; $\lambda$ – стаціонарна випадкова функція інтенсивності очищення.

Важливим кроком подальшого удосконалення методології оптимізації параметрів очисних робочих органів, є запропонована Гевком Р. і Рогатинським М. [54] методика попереднього прогнозування ступеня пошкодження імітатора коренеплодів (рис. 1.25, додаток А. 17.2) у процесі його контактної взаємодії з поверхнями робочих органів.

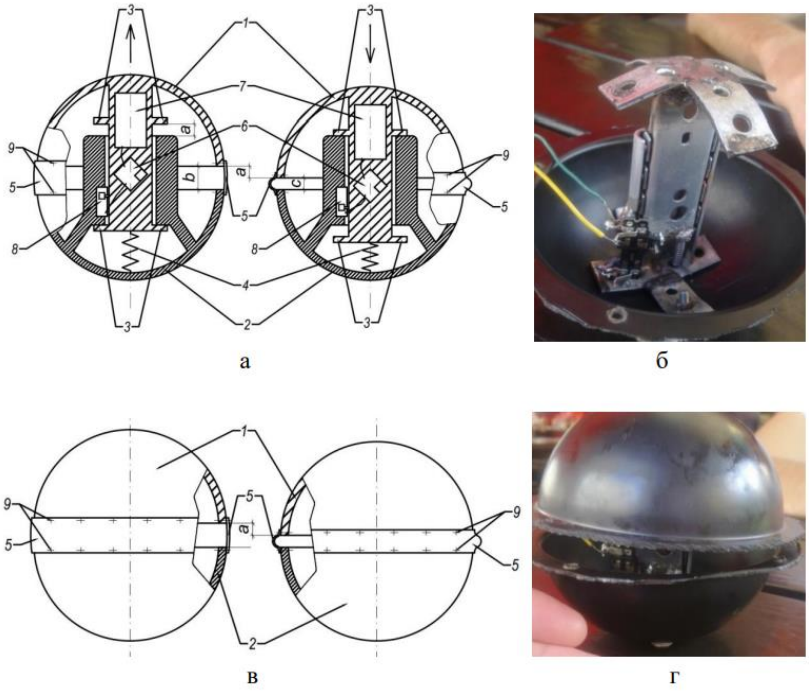



Рисунок 1.25 – Будови та загальний вигляд імітатора моделі коренеплоду: 1, 2 – корпус верхньої та нижньої півкулі; 3 – обмежувальні виступи; 4 – пружинний механізм; 5 – гнучкий обід; 6 – мікросхема; 7 – блок автономного живлення; 9 – роз’ємні з’єднання; 8 – потенціометр

При цьому зусилля, які характеризують контактну взаємодію або силу демпфування та силу удару імітатора (відносний ступінь пошкодження коренеплоду з поверхнею робочого органу), визначають за залежностями:

$$P_{демп.} = \left[ (15/2)(1-a)E \right]^{3/5} k^{2/5}; \tag{1.14}$$

$$P_{уд.} = (0{,}55...0{,}75) k^{2/5} \left( (5/4) m V_0^2 \right)^{3/5}, \tag{1.15}$$

де $a$ – частка енергії демпфування імітатора; $E$ – кінетична енергія удару; $k$ – параметр, що залежить від пружних властивостей тіл і геометрії площі контакту.

У працях Головача І. [51, 55, 160-162] викладено наукові положення, які розкривають сутність порядку розроблення математичних моделей та проведення оптимізації процесів сепарації домішок робочими органами очисників вороху коренеплодів на основі застосування принципів і методів розділення й властивостей складових компонентів домішок із урахуванням наявних процесів викопування коренеплодів вібраційними робочими органами.

Ним розглянуто процес коливання циліндричної спіралі очисника вороху коренеклубнеплодів, робочий орган якого формалізовано у вигляді пружного стержня [180].

При цьому вигинальні коливання спіралі, або пружного стержня описуються частковою похідною у вигляді

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2}\left( EI_R \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) + \rho F \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = \overline{q}\left( z,t \right), \tag{1.16}$$

де $E$ – модуль Юнга; $I_R$ – приведений осьовий момент інерції перерізу спіралі; $W$ – прогин поздовжньої осі спіралі; $\overline{q}\left( z,t \right)$ – розподілене навантаження очисної спіралі; $\rho$ – питома маса матеріалу спіралі; $F$ – площа поперечного перерізу прутка спіралі.

Аналіз і загальне розв'язування рівняння (1.16), є наслідком розробленої математичної моделі прогину поздовжньої осі спіралі сепаратора

$$\begin{aligned} W = &\left[ AS\left( \lambda,z \right) + BT\left( \lambda,z \right) + CU\left( \lambda,z \right) + DV\left( \lambda,z \right) \right] \times \\ &\times \cos\left( \omega,k,t \right) + qL^2 \left( \frac{z^4}{L^2} - \frac{z^3}{L} + 6z^2 \right) / \, 24EI_R \end{aligned}, \tag{1.17}$$

де $S\left( \lambda,z \right)$, $T\left( \lambda,z \right)$, $U\left( \lambda,z \right)$, $V\left( \lambda,z \right)$ – спеціальні функції Крилова; $A$, $B$, $C$, $D$ – сталі граничних обмежень (умов); $\lambda$ – власна частота коливань; $k$ – кратність коливань; $L$ – довжина спіралі.

Застосування моделі (1.17) дозволяє обгрунтовувати основні параметри процесу сепарації домішок вороху коренеплодів і робочого органу спірального сепаратора вороху.

Козаченко О. у наукових працях [119, 163-165] описав основні аспекти застосування, обслуговування та ремонту (технічного сервісу) машинних агрегатів агропромислового комплексу, у тому числі й розробку математичних моделей функціонування транспортно-технологічних систем коренезбиральної техніки. Ним розроблено алгоритми та методологію сучасного наукового підходу раціонального використання технічних засобів на виконанні сільськогосподарських робіт.

У працях Мартинова В. [32, 141, 142] запропоновано структурну схему розроблення технічних засобів для збирання коренеплодів (рис. 1.26) та алгоритм трансформації робочих органів коренезбиральних машин (рис. 1.27).

В основу розроблення алгоритму покладено концептуальні принципи наявності певної послідовності евристичних прийомів нижчих рівнів.

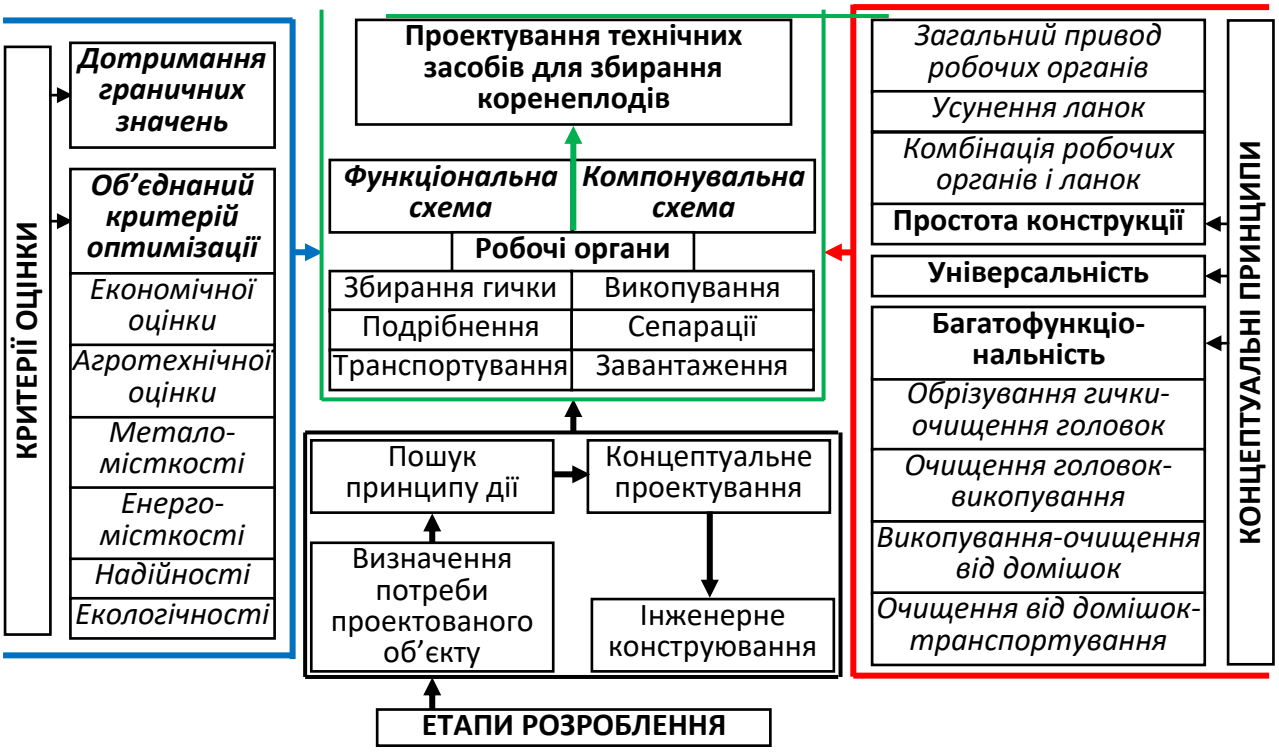



Рисунок 1.26 – Структурна схема розроблення технічних засобів для збирання коренеплодів

Поєднання двох суміжних технологічних операцій та процес проектування робочих органів, які виконують ці технологічні операції базується на основні урахування концептуальних принципів, рис. 1.25.

При цьому параметри машини та її робочих органів транспортно-технологічних систем оптимізовано із урахуванням критеріїв оцінок, а також на кожному етапі проектування, як основний критерій оцінки виступає в загальному випадку узагальнений критерій оптимізації.

Сутність алгоритму трансформації двох робочих органів $P'$ і $P''$ (рис. 1.27), що виконують у прототипі дві суміжні технологічні операції, полягає у виявленні для ланок $З'$ і $З''$, із яких складаються ці робочі органи, характерних властивостей $C$ і $C''$, позитивних $ПЕ'$ і $ПЕ''$ і небажаних $НЕ'$ і $НЕ''$ ефектів.

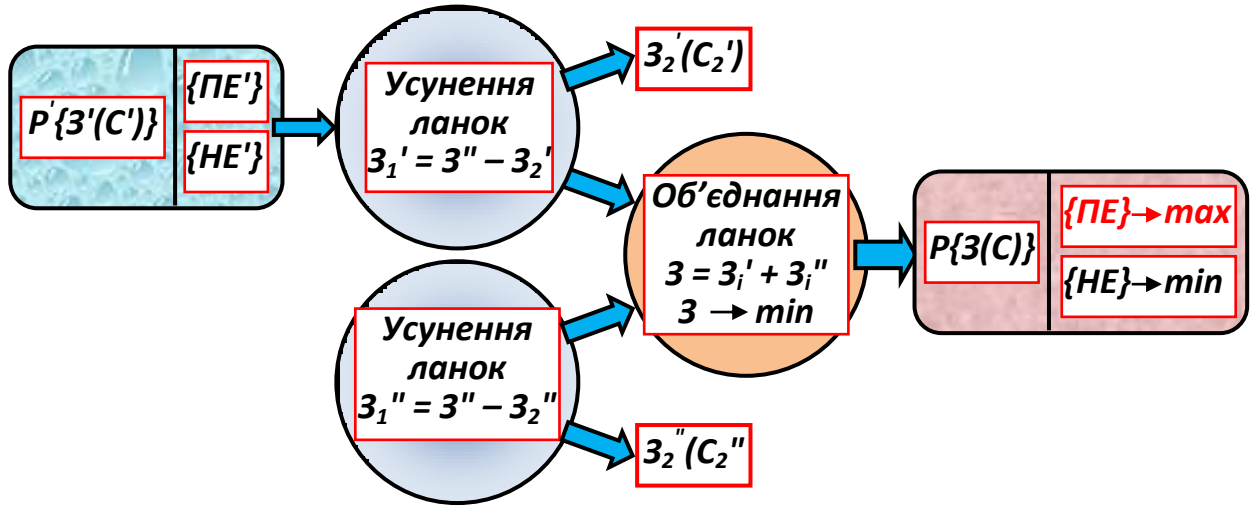



Рисунок 1.27 – Алгоритм розроблення багатофункціональних робочих органів і їх трансформації

Послідовним усуненням ланок $З'_2$ і $З''_2$ та об'єднанням ланок, які залишилися $З'_1$ і $З''_1$, створюють новий комбінований робочий орган $P$, який складається з мінімального числа $З$ ланок і елементів із властивостями $C$ та із новими багатофункціональними властивостями (ефектами).

За критерій, яким оцінюється багатофункціональність дії робочого органу на етапах пошуку принципу реалізації та концептуального проектування, пропонується застосовувати узагальнений параметр, або критерій

$$K_{бф} = fR / r, \qquad (1.18)$$

де $f$ – кількість операцій, які виконує робочий орган; $R$, $r$ – кількість рядків, які збираються одночасно та кількість задіяних робочих органів.

При цьому ідеальність робочого органу досягається за максимуму позитивних і мінімуму небажаних ефектів. Позитивні ефекти нового робочого органу реалізують його основні корисні функції, а всі оцінки, які не увійшли в цей критерій являють собою особливі умови-обмеження. За своєю сутністю ці умови-обмеження регламентують граничні або допустимі параметри об'єкту дослідження, межі яких встановлюють за доцільністю та надійністю функціонування кінематичних і динамічних процесів, а також наявних обмежень агротехнічних вимог до роботи коренезбиральних машин.

У якості багатофункціональної системи запропоновано комбінований очисник коренеплодів від домішок (рис. 1.28), який є поєднання гвинтового конвеєра та розміщених під ним дугоподібних полос. При цьому математичну модель, яка функціонально характеризує закон руху коренеплоду в гвинтовому конвеєрі записано у вигляді

$$\frac{d^2\varepsilon}{dt^2}=\frac{\cos\alpha}{r}\left\{\begin{array}{l}\left[g\cos\gamma+f_2\left(g\sin\gamma\cos\varepsilon+r\dot{\varepsilon}^2\right)\dfrac{a_в\left(\omega_0-\dot{\varepsilon}\right)}{\sqrt{R^2\dot{\varepsilon}^2+a_в^2\left(\omega_0-\dot{\varepsilon}\right)^2}}\right]\times\\ \times\left(\sin\alpha+f_1\cos\alpha\right)-\left(\cos\alpha+f_1\sin\alpha\right)\times\\ \times\left[g\sin\gamma\sin\varepsilon+f_2\left(g\sin\gamma\cos\varepsilon+r\dot{\varepsilon}^2\right)\dfrac{R\dot{\varepsilon}}{\sqrt{R^2\dot{\varepsilon}^2+a_в^2\left(\omega_0-\dot{\varepsilon}\right)^2}}\right]\end{array}\right\},\quad (1.19)$$

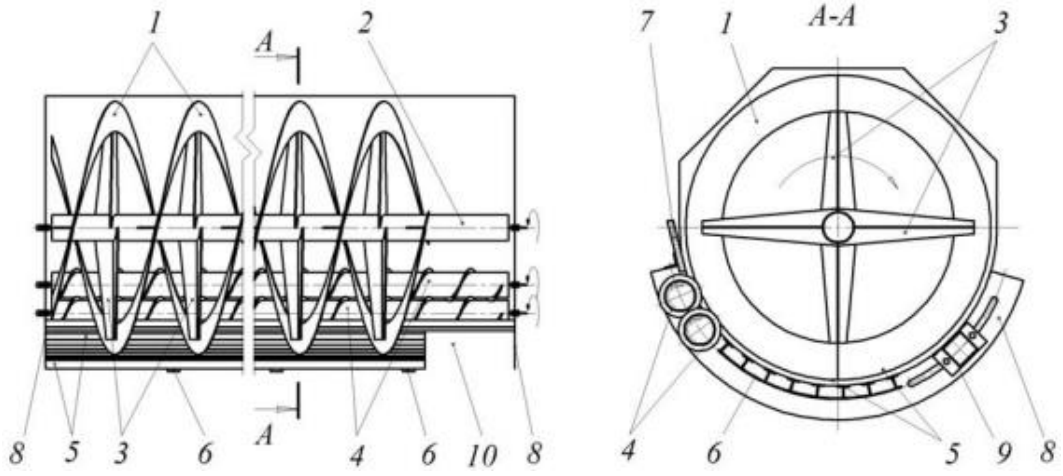



Рисунок 1.28 – Схема комбінованого шнекового очисника коренеплодів від домішок: 1 – виток шнека; 2 – вал; 3 – кронштейн; 4 – валець; 5 – планка; 6 – кожух; 7 – дошка; 8 – сектор; 9 – рама; 10 – вихідне вікно

де $\varepsilon$, $\gamma$ – кут відхилення коренеплоду та встановлення конвеєра відносно вертикальної осі; $r$, $R$ – радіус коренеплоду та спірального шнека; $\alpha$ – кут підйому гвинтової лінії шнека; $f_1$, $f_2$ – коефіцієнт тертя ковзання коренеплоду по поверхні спіралі шнека та кожуха; $\omega_0$ – кутова швидкість шнека.

На основі розв'язування (1.19) та аналізу графічних побудов (рис. 1.29) було визначено числові значення кута відхилення коренеплоду $\varepsilon_{ж}$ від вертикальної осі за умови сталого переміщення коренеплоду в гвинтовому конвеєрі, або $\varepsilon_{ж} = 75{,}7^0$.

При цьому констатовано, що кут відхилення коренеплоду $\varepsilon_{ж}$ від вертикальної осі в процесі його переміщення вздовж осьової лінії шнека значною мірою не залежить від кутової швидкості шнека, рис. 1.29б.

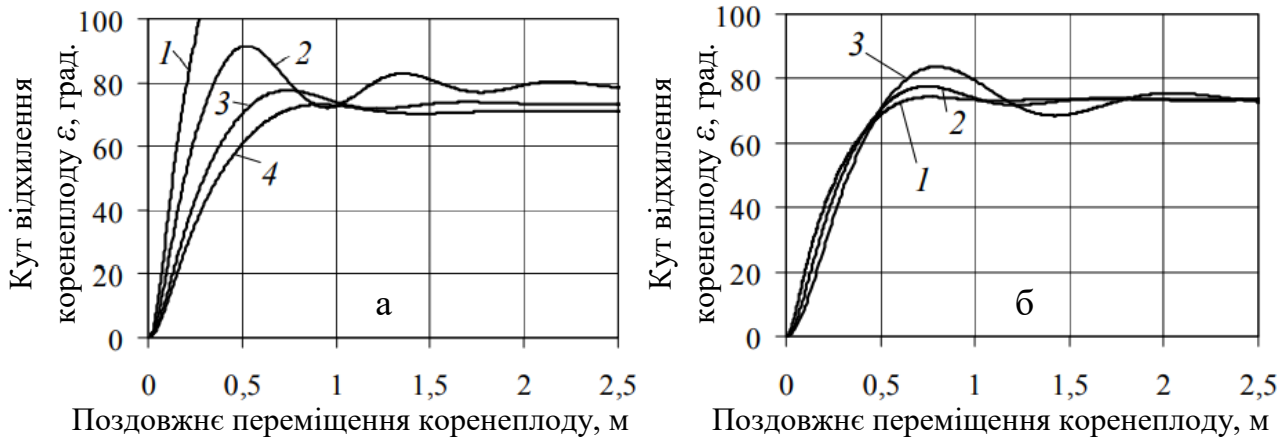



Рисунок 1.29 – Залежність зміни кута відхилення коренеплоду від вертикальної осі: а – 1, 2, 3, 4 – $R$ = 32, 40, 52, 60 см; б – 1, 2, 3 – $\omega_0$ = 4,3; 6,3; 8,3 рад/с

Підгурським М. [38] для розрахунку та оптимізації параметрів конструктивних несучих систем коренезбиральних машин запропоновано метод багаторівневого механіко-технічного моделювання на основі розроблення блок-схеми та алгоритму його побудови, яку наведено на рис. 1.30

Сутність і особливість запропонованого багаторівневого моделювання та алгоритму розроблення механіко-математичних моделей полягає в тому, що для схематизації рішень, які забезпечать конструктивну міцність несучих систем мобільних коренезбиральних машин початковими даними вибрано:

Рисунок 1.30 – Блок-схема алгоритму (розроблення) конструювання несучої системи коренезбиральної машини

- структурно-функціональний аналіз машини (аналіз процесів і конструктивно-кінематичних особливостей);

- формування початкового банку даних для розрахунку (навантаження, режими та умови експлуатації та силових впливів).

Розрахунок і обгрунтування конструкторських й технологічних рішень рекомендовано проводити шляхом застосування натурних і модельних випробувань.

Академік Погорілий Л. [1, 149, 166, 167, 181] розробив комплекс наукових положень, які характеризують механіко-технологічні основи удосконалення механізованих процесів збирання коренеплодів і запропонував методи всебічного наукового обгрунтування випробувань техніки, які забезпечують безперервність і єдність інформаційного процесу створення та удосконалення техніки й технологій для сільськогосподарського виробництва, у тому числі й транспортно-технологічних систем очищення коренеплодів від домішок і коренезбиральних машин загалом.

На відміну від Мартинова М., академік Погорілий Л. висунув гіпотезу, що у загальному випадку якість об'єкту дослідження визначається сукупністю взаємозв'язаних показників, що є близькою відповідністю загальним аспектам роботи очисних систем сучасних коренезбиральних машин.

Сутність гіпотези полягає в тому, що показники якості $П_1$, $П_2$ ,… , $П_i$ (рис. 1.31а) визначаються простором якості об'єкту дослідження, наприклад $P$. При цьому множина показників якості утворює в просторі $P$ область допустимих меж граничних значень станів об'єкту $Ω_0$, або метод багатостадійної оптимізації складних технічних систем сільськогосподарських машин, у тому числі і технічних засобів для збирання коренеплодів.

Ці граничні значення, або межа значень утворюють граничну поверхню $Г$, при цьому критерій оптимізації, який задовольняє умову згідно з агротехнічними вимогами записано у вигляді П є $Ω_0$, тобто параметр якості знаходиться у встановлених межах, а пересічення траєкторією $П$ граничної поверхні $Г$ у напрямку зовнішньої нормалі є станом, коли об'єкт виходить за межі допустимої якості.

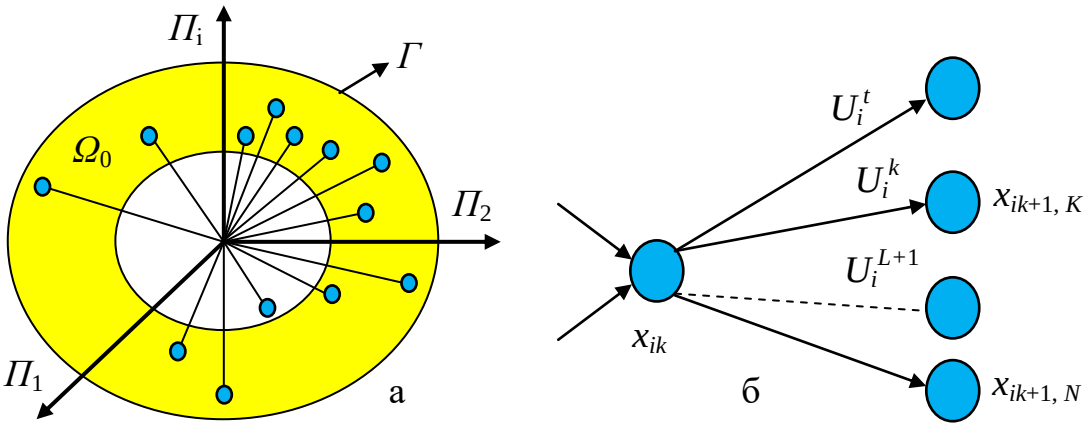



Рисунок 1.31 – Графічна інтерпретація сукупності взаємозв'язаних показників: а – визначення простору якості; б – схема розроблення математичної моделі багатостадійної оптимізації

Вірогідність забезпечення якості функціонування ($P_П$) визначається як доповнення до одиниці вірогідності виходу параметра за межі області $\Omega_0$, або в зону області $Г$.

Вірогідність забезпечення якості функціонування ($P_П$) записано в загальному випадку у вигляді

$$P_П = P\left(\vec{П} \in \Omega_0\right), \tag{1.20}$$

а відносний показник придатності (забезпечення якості показника) має вигляд

$$\gamma_{23} = \frac{P\left(\vec{П} \in \Omega_0\right)}{P_{ПН}} \geq 1. \tag{1.21}$$

Методологія розроблення математичної моделі багатостадійної оптимізації є наступною: у кожній стадії $i$, $i + 1$, …, $n$ (рис. 1.31б), де може бути $N$ станів складеної технічної системи, вибір одного із можливих регулювань системи визначається станом $K$ стадії $(i + 1)$ $(x_i + 1, K)$, де система переходить із стадії $i$ стану $K(x_{ik})$, при цьому граф має зв'язок згідно з моделлю, яку записано у вигляді

$$\wp = \sum_{i=0}^{n} P_0\left(i, x_i, U_i\right) \to \min(\max). \tag{1.22}$$

При цьому повинні бути накладені умови, що $x_{v(i+1)} = f_v(i, x_i, U_i)$; $i = 0$, $n-1$; $v = 1, m$; $x \in \Omega_{x_i}$; $U_i \in \Omega_i$; $i = 0, n$, де $\wp$ – узагальнений показник якості, який є функцією від регулюючих (вільних) параметрів $x_1$, $x_2$ ,…, $x_n$, які належать множині $\Omega_x$, або $\wp(x_1, x_2, ..., x_n)$.

Приклад реалізації багатостадійної оптимізації зміни показників якості роботи технічних систем, яку запропоновано академіком Погорілим Л. проілюстровано наведеними схемами, рис. 1.32, 1.33.

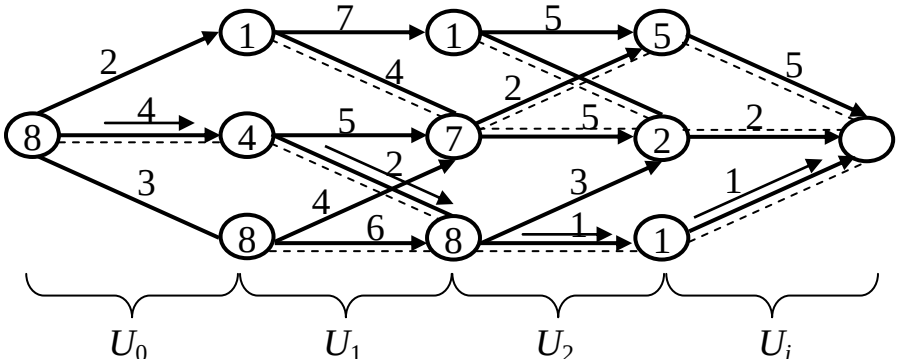



Рисунок 1.32 – Схема прикладу багатостадійної оптимізації

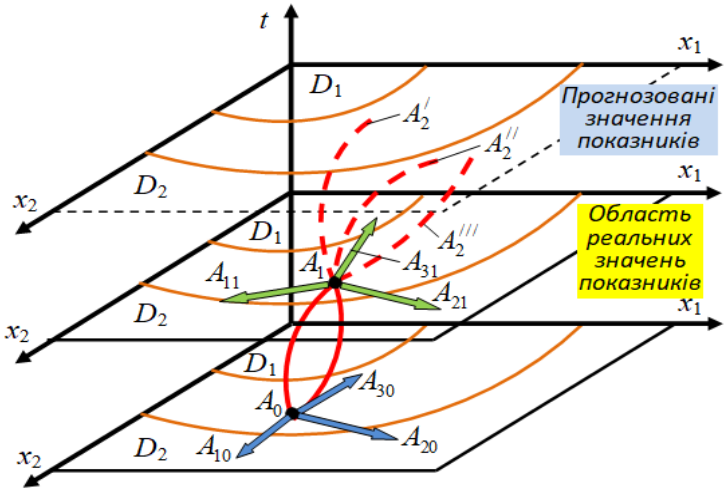



Рисунок 1.33 – Схема, яка ілюструє зміну параметрів оптимізації в просторі ознак і в часі: $D_1$, $D_2$ – стан об’єкту дослідження (задовільний; незадовільний); $A_{ij}$ – структурні параметри

Почергова стадійність або сутність такої оптимізації реалізується за принципом Беллмана Р., або принципом оптимальності [167] на основі функції та рівняння Беллмана, яке являє собою рекурентне відношення, що зв’язує стани системи, наприклад, $\varphi_i$ та $\varphi_{i+1}$ при заданій граничній умові $\varphi_{n+1}(x_{n+1}) = 0$.

При цьому функція Беллмана $\varphi_i(x_i)$ дорівнює тому граничному значенню критерію оптимальності із початкового стану системи $x_i$ та описується рівнянням Беллмана

$$\varphi_i(x_i) = \min_{U_i}\left[P_0(i, x_i, U_i) + \varphi_{i+1}(x_i + 1)\right], \quad (1.23)$$

а оптимальне рішення повинно мати такі властивості, за яких будь-який стан (показник) $x_{i.k}$, що досягнутий після стадії $(i-1)$, є свого роду прологом до подальшого досягнення оптимального значення $x_{i.оптим.}$ відносно досягнутого значення $x_{i.k}$.

У праці [1] Погорілим Л. і Татьянком М. наведено загальні положення, які характеризують технологічні процеси очищення вороху від домішок, які формалізовано у вигляді математичних моделей матеріального балансу технічної системи «вхід-вихід» (передавальних функцій), розроблених із застосуванням перетворення Лапласа.

Прийнявши за основу гіпотезу, що вхідна кількість $g_{вх}^{(+)}$ викопаного вороху лінійно пов'язана із швидкістю руху машини та її шириною захвату, а вихідна кількість $g_{вих}^{(+)}$ для кожного *i*-го очисника в середньому задовольняє умови балансу із урахуванням відокремленої частини домішок $g_{від}^{(j)}$, отримано рівняння:

- які описують процес відокремлення домішок для *i*-го сталого режиму роботи очисника:

$$\bar{g}_{вих}^{(j)}(t) = \bar{g}_{вх}(t) - \bar{g}_{від}^{(j)}(t); \;\; a_0^{(j)} \frac{dq_м^{(j)}(t)}{dt} = b_0^{(j)} q_{вх}\left(t - \tau^{(j)}\right) - c_0^{(j)} q_{вих}^{(j)}(t), \quad (1.24)$$

де $q_м^{(j)}(t)$ – завантаження очисника ворохом; $a_0^{(j)}$, $b_0^{(j)}$, $c_0^{(j)}$ – змінні коефіцієнти в функції параметрів робочих органів і умов роботи; $\tau^{(j)}$ – час запізнення руху коренеплодів і домішок;

- які описують сумарну (загальну) ступінь сепарації домішок залежно від довжини робочого органу очисника *L*

$$\hat{\varepsilon} = \frac{\bar{q}_{вх}}{\bar{q}_{вих}} = 1 - \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_1 = 1 - Ae^{kL}, \qquad (1.25)$$

де $A$, $k$ – експериментальні коефіцієнти, які залежать від умов роботи очисника;

- інтенсивність відокремлення налиплого грунту на коренеплодах, яка в першому наближенні описується стаціонарною випадковою функцією $\lambda$ [182]

$$\Delta m(t) = \Delta m_0 e^{-\lambda(t-t_0)}, \qquad (1.26)$$

де $\bar{\lambda} = const$; $\Delta m_0$ – маса налиплого грунту в момент часу $t_0$.

Хелемендик М. у працях [151, 183] запропонував методологію розроблення механіко-технологічних моделей, у основі яких покладено методи та принципи раціонального зменшення сукупних енергетичних витрат під час виробництва коренеплодів і особливо трудомісткого процесу очищення коренеплодів від домішок у загальному структурному процесі роботи коренезбиральної машини.

Праці Шабельника П. [55, 141, 170, 171, 184] присвячені розробленню математичних моделей, які функціонально описують взаємозв'язок показників якості роботи кулачкових конвеєрів-очисників залежно від їх режимів роботи та параметрів робочих органів.

Ним розроблено аналітичний вираз, який описує умову безвідривного переміщення структурних компонентів домішок вороху поверхнями кулачкових очисників, яка технологічно та конструктивно пов'язана із кутовою швидкість кулачка $\omega$

$$\omega \le \frac{1}{a+h}\left[\sqrt{V_M^2 \cos^2(\varphi_0 + \tau) - g(a+h)\cos\varphi_0}\right] + V_M \cos(\varphi_0 + \tau), \qquad (1.27)$$

де $a$ – ексцентриситет кулачка; $h$ – висота завантаженої маси вороху; $V_M$ – початкова швидкість руху компонентів вороху по очисній поверхні; $\tau$ – початковий кут знаходження компонентів вороху відносно горизонту; $\varphi_0$ – кут лопатки кулачка в початковий момент його обертання.

Було встановлено, що виконання умови (1.27) забезпечує мінімальні пошкодження коренеплодів під час їх взаємодії з кулачками, які не перевищують 5 % за кутової швидкості кулачків $\omega \le$ 15 рад/с.

## 1.3. Принципи розроблення наукової концепції математичного моделювання процесу роботи очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин

Проектування та розробка робочих органів машин для збирання крупних коренеплодів у різних ґрунтово-кліматичних умовах, є досить технічно та технологічно складною науковою проблемою, а й відповідно – конструкторською та технологічною розробкою [2, 19, 111, 185, 186].

Для успішного вирішення цієї проблеми очисні робочі органи коренезбиральної машини повинні характеризуватися адаптаційною здатністю, яка передбачає можливість пристосовування до зміни мінливих структурованих природно-кліматичних умов збирання коренеплодів, їх біологічних і агрофізичних особливостей.

Для цього необхідно передбачити необхідні адаптивні налаштування та зміну конструктивних і кінематичних параметрів робочих органів для конкретних умов збирання коренеплодів [2, 10, 20, 50, 111].

Як правило це призводить до ускладнення конструкції, збільшення металоємності та вартості машини. Тому робочі органи коренезбиральних машин повинні бути не тільки універсальними, а й простими в конструктивному виконанні та доступними в компонувальному просторовому розміщенні [1]. Розробка та оптимізація параметрів нових робочих органів і машин загалом вимагає поетапного аналізу та узагальнення існуючих технологій, способів збирання коренеплодів, конструктивних особливостей сучасних технічних засобів і робочих органів, виявлення їх переваг та недоліків, створення теорії технологічного процесу, вироблення критеріїв оптимізації параметрів, пошуку нових інженерних методів розрахунку [20, 187].

Математичні моделі, як наслідковий об’єкт «чорної скрині» або об’єкт невивченого технологічного процесу інтенсифікації відокремлення домішок від коренеплодів залежно від вхідних факторів і вихідних параметрів процесу класифіковано за принципами, які наведено на рис. 1.34.

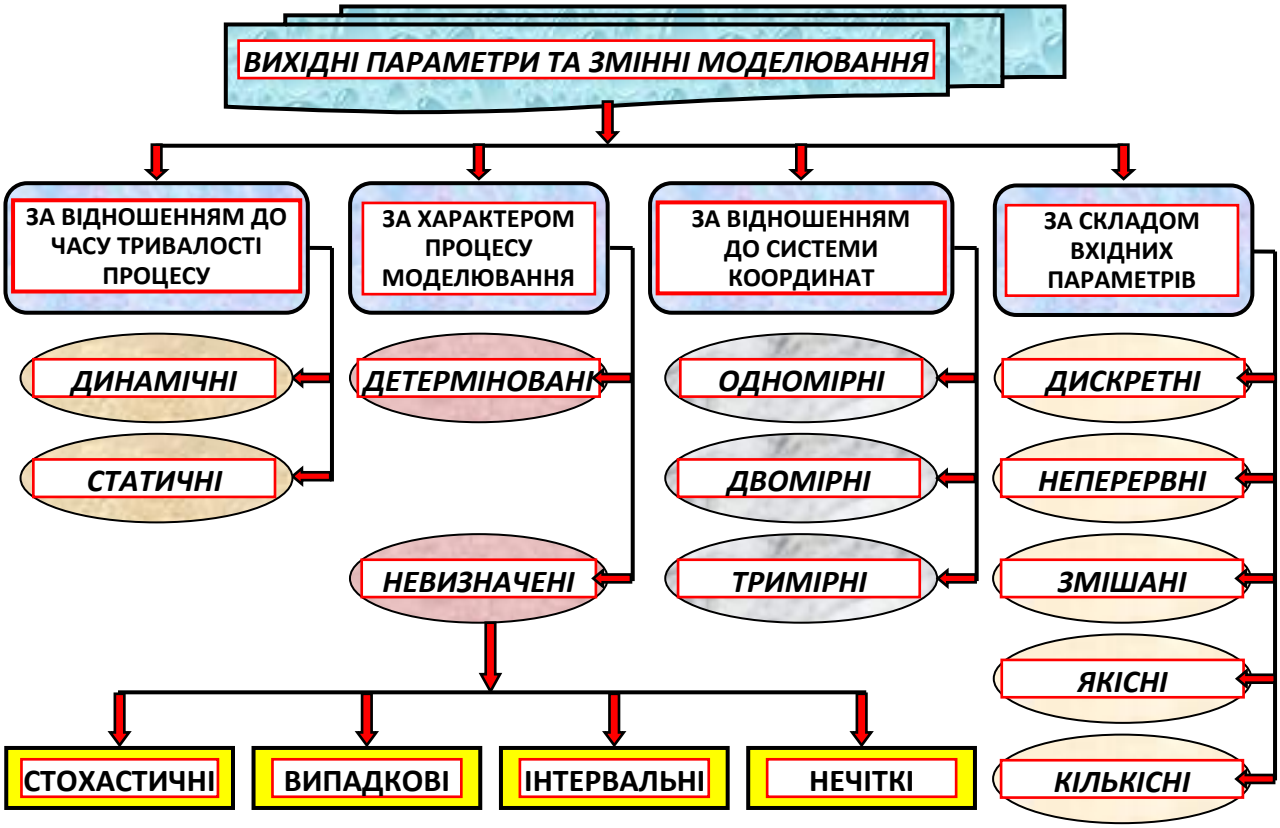



Рисунок 1.34 – Принципи класифікації математичних моделей залежно від вхідних факторів і вихідних параметрів

За характером технологічного процесу інтенсифікації процесу відокремлення домішок від коренеплодів, або процесу роботи транспортно-очисних систем вороху коренеплодів, математичні моделі можуть бути такими та мати такі властивості: детерміновані, які відповідають детермінованим процесам, що мають чіткий і явно виражений однозначний зв’язок між фізичними величинами, які характеризують стан технічної системи у будь-який час; невизначені, які формуються з того, що зміна визначальних величин відбувається випадковим чином і значення вихідних величин знаходяться в імовірнісній відповідності до вхідних величин і не визначаються однозначно.

Серед етапів процесу побудови математичних моделей можна виділити такі, які наведено на рис. 1.35 [188]. Для опису процесів функціонування технічних систем, як правило у більшості випадків застосовують методи розроблення та одночасного поєднання емпіричних і аналітичних математичних моделей, або методи емпіричного та аналітичного моделювання [51, 189].

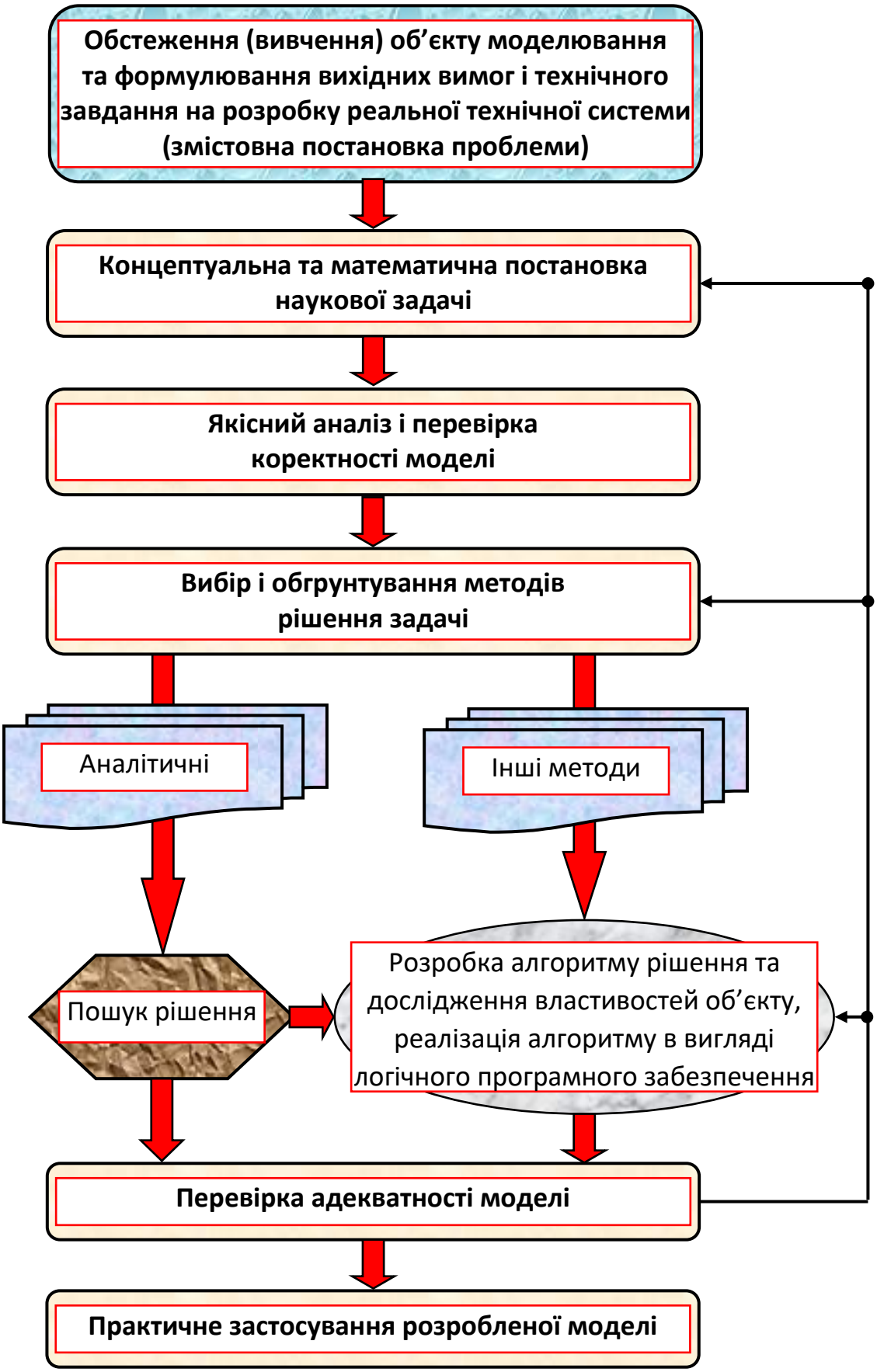



Рисунок 1.35 – Основні практичні етапи побудови математичної моделі технічних систем

Застосування експериментальних досліджень та емпіричного моделювання дозволяє зменшити витрати при дослідженні технічних систем, а також досягнути необхідну точність моделей [190, 191]. У результаті обробки експериментальних даних отримують залежність, яка математично пов'язує функцію відгуку із вхідними факторами, що і є емпіричною моделлю системи [192, 193]. Визначення числових значень коефіцієнтів моделі проводиться за результатами експериментальних досліджень та обробки експериментальних даних [194–197].

Теоретичні моделі базуються на представленнях про описувані явища, які належать механізмам технічних систем [198]. Теоретичне моделювання відноситься до фундаментальних досліджень. Теоретичні дослідження базуються на основі прийняття деяких припущень протікання технологічних процесів, які присутні під час функціонування технічних систем.

Ці спрощення враховують шляхом введення поправочних коефіцієнтів, які на теоретичному рівні визначити майже не можливо. Для їх визначення доводиться, або збирати емпіричну інформацію і обробляти її методами математичної статистики, або проводити конкретизовані експериментальні дослідження [199–201].

Етапи конструювання та побудови або розробки будь-якої моделі за Моррісом наведено на рис. 1.36.

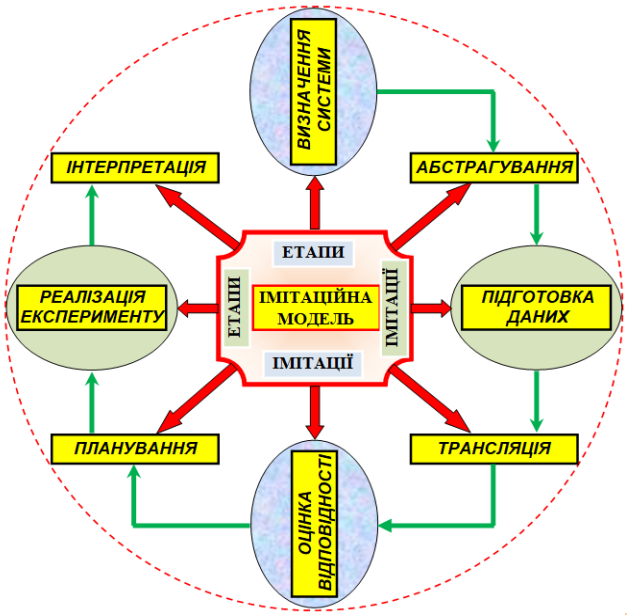



Рисунок 1.36 – Етапи розроблення імітаційної моделі

## 1.4. Висновки, наукова проблема, мета та завдання дослідження

Враховуючи специфічні особливості, які притаманні функціональним процесам збирання крупних коренеплодів необхідно зазначити основні наслідкові причини, які не дозволяють у повному обсязі та із достатньою достовірністю кінцевого результату використати відомі методики для розроблення та оптимізації параметрів робочих органів очисних транспортно-технологічних систем причіпних коренезбиральних машин, які повинні забезпечити цілісне урахування множини характерних ознак і особливостей протікання технологічних процесів збирання коренеплодів й отримання необхідних показників якості роботи згідно з агротехнічними вимогами. При цьому:

1. У загальному наведені схематичні методики розроблення та запропоновані математичні моделі для оптимізації параметрів робочих органів коренезбиральних машин не дозволяють ґрунтовно врахувати більшість особливостей сутності проектування технічних засобів для збирання коренеплодів, а характеризує і систематизує процес проектування як пошук оптимального рішення.

2. Крім того за багатьма критеріями або показниками якості роботи провести оптимізацію режимів роботи та конструктивних і кінематичних параметрів робочих органів і технічних засобів для збирання коренеплодів доволі складно та відразу неможливо.

3. 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 на поверхні одного робочого органу очисної системи загалом.

Це значно звужує математичний опис процесу сепарації домішок і не достатньо описує реальну візуалізацію об’єкта дослідження, або процес відокремлення структурних компонентів домішок від коренеподів.

Адже відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів відбувається на кожному послідовному відрізку шляху сепарації матеріалу, або на кожному умовному етапі протікання процесу очищення протягом всього часу переміщення вороху всією довжиною сепарувальної поверхні робочого органу очисної системи, що накладає певні обмеження, як у ефективності відокремлення, так і в кількості відокремлених домішок, або в загальному – визначення на теоретичному рівні числових значень показників якості роботи очисних систем коренезбиральних машин.

При цьому оцінку ефективності роботи очисників можна проводити тільки окремо по кожному показнику якості відокремлення складового компонента домішок.

4. Запропонована архітектура агента агентної моделі має один суттєвий недолік, а саме – агент, що задається у такий спосіб не отримує інформацію про здійснені ним необхідної дії, що обмежує його можливості у накопиченні досвіду та аналізу потенційних наслідків його дій.

Одним із можливих способів подолання цього недоліку, є представлення інформації про дії агента як частину інформації про зовнішнє середовище, проте такий підхід не є наочним та інтуїтивно зрозумілим.

4. Запропонований метод оптимізації (пошук значень оптимуму функції $(\max(\min)\wp)$ може вирішуватися шляхом необхідного розроблення відповідного програмного забезпечення для персонального комп’ютера, що в деяких випадках є економічно не ефективним і не раціональним рішенням, а аналітичним методом запропоновані теоретичні задачі вирішити практично неможливо за рахунок наявності значної кількості варійованих вхідних і вихідних параметрів технологічного процесу роботи технічної системи.

Таким чином, зважаючи на викладений аналіз стану загальної проблеми збирання крупних коренеплодів можна із достовірною вірогідністю констатувати наступне.

1. Провідні фірми світу спеціалізуються майже практично на виробництві багаторядної техніки із шириною захвату в шість і більше рядків.

Виробництво такої техніки в Україні на даному етапі майже повністю припинилося, або відсутнє.

2. Способи збирання коренеплодів, компонувальні схеми та конструкції транспортно-технологічних систем машин за останні десятиліття не зазнали значних змін, а вдосконалення машин і робочих органів супроводжується ускладненням конструкції та їх значним подорожчанням.

3. Як правило, основне призначення багаторядної коренезбиральної техніки – це збирання цукрових буряків.

При цьому провідні фірми світу повністю відмовилися від виробництва спеціалізованих машин для збирання іншого спектру крупних коренеплодів, наприклад, кормових буряків, цикорію, деяких сортів кормової моркви та турнепсу. В Україні частково розробляються змінні робочі органи для викопування спектру коренеплодів.

4. Для збирання коренеплодів з невеликих посівних площ (фермерські господарства) застосовують наявні машини, при цьому отримані показники якості роботи цих машин залежать від того, наскільки нівельовані біологічні особливості коренеплодів і умови роботи машин, що забезпечується прийомами агротехніки вирощування коренеплодів, наприклад, обробітку грунту, формуванням густини насадження, виведенням нових сортів та гібридів, ґрунтово-кліматичних умов на період збирання тощо.

5. Для отримання необхідних показників якості збирання спектру крупних коренеплодів, які задовольняють агротехнічні вимоги необхідно застосовувати змінні робочі органи транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин, які б були пристосовані до мінливих змін агробіологічних характеристик коренеплодів, типу ґрунтів і погодних умов роботи збиральної техніки.

6. Існуючі методологічні основи проектування та розроблення робочих органів транспортно-технологічних систем, у тому числі і очисних систем коренезбиральних машин не достатньо враховують специфічні особливості їх функціонування, а розроблені математичні моделі не в достатній якості описують процеси відокремлення у часі різно-структурованих компонентів домішок від крупних коренеплодів.

7. Невідповідність кінцевого результату роботи причіпних коренезбиральних машин, або підвищені показники якості процесу очищення коренеплодів від домішок значно знижують технологічну та економічну ефективність всього процесу виробництва крупнних коренеплодів і, відповідно, потрібної продукції їх переробки – продуктів харчування населення та згодовування сільськогосподарським тваринам, засобів лікування, відновлювальних джерел енергії, органічних добрив тощо.

Зважаючи на викладене, наукова проблема, яка потребує застосування кардинальних шляхів для її вирішення сформульована таким чином:

- існуючі робочі органи транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин в оптимальних діапазонах збирання крупних коренеплодів, які регламентовані технічними умовами забезпечують задовільні показники якості роботи, які не перевищують встановлені допустимі межі зміни показників згідно з агротехнічними вимогами;

- стислий сезонний термін збирання коренеплодів, який притаманний мінливим змінам природно-кліматичних умов в Україні передбачає безперервну реалізацію процесу збирання урожаю у зв’язку із частими опадами та наставанням швидких морозів, за яких збирання коренеплодів практично неможливе;

- у важких умовах збирання коренеплодів, які є наслідком значної зміни ґрунтово-кліматичних умов роботи коренезбиральних машин, технологічні показники коренезбиральних машин знижуються в 1,5-2 рази, а показники якості роботи транспортно-технологічних систем і коренезбиральних машин загалом знижуються в середньому в 1,5 раза за рахунок недосконалості та непристосованості робочих органів до цих змін;

- при цьому, загальна кількість домішок у зібраних коренеплодах зростає на 20-40%, у тому числі показник загальних грунтових домішок збільшується в 1,3-1,5 раза, а показник налиплого грунту на поверхні тіла коренеплодів – в 1,6-2,2 раза;

- подальше застосування зібраних коренеплодів для переробки на відповідні кінцеві споживчі продукти потребує додаткових витрат на доробку сировини (відокремлення домішок від коренеплодів) на стаціонарних пунктах, що збільшує загальні витрати виробництва кінцевого продукту на 20-30%.

Отже, підвищення показників якості збирання крупних 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 самостійною 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 очисних транспортно-технологічних модулів (ОТТМ) коренезбиральних машин.

Об’єкт дослідження: технологічний процес, 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.

Мета дослідження – підвищення технологічної ефективності збирання коренеплодів шляхом розроблення та оптимізації параметрів процесу роботи очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин.

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

Вирішення даної проблеми зведено до розв’язування 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 і 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 обгрунтувати 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 й визначити економічну ефективність її застосування у виробничих умовах.

Основні положення розділу опубліковано в наукових працях [7, 15, 19, 24–29, 47, 49, 50, 61, 71, 72, 75, 79, 82–84, 86–100, 102, 103, 108, 109, 120, 137, 143, 153, 154].

# РОЗДІЛ 2
# КОНЦЕПТУАЛЬНІ АСПЕКТИ РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ І ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ОЧИСНИХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОДУЛІВ КОРЕНЕЗБИРАЛЬНИХ МАШИН

## 2.1. Моделювання – метод оптимізації робочих процесів транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин

Наукові дослідження складних технічно-технологічних машинних систем реалізуються на основі застосування сучасних методів пізнання, серед яких одним із найбільш ефективним є метод моделювання, використання якого дозволяє всебічне вивчення об’єктів, процесів, явищ тощо шляхом створення відповідного аналога або моделі [1, 50, 202].

Друга половина XX століття характерна появою та значним поширенням нової методології дослідження складних об’єктів і технічних систем – методу математичного моделювання та реалізовані на його основі обчислювальні експерименти.

Запроваджені поняття («алгоритм» – Аль Хорезмі) та відкриті наукові пізнання точних наук (Ньютон І., Коперник Н., Ейлер Л. Леонардо да Вінчі, Левер’є У. та ін.) надали значний поштовх до розвитку методологічних засад, які регламентували нові дослідження світового простору та появу перших структурних елементів моделювання в технічних системах і пристроях (Жуковський М., Тесла В., Ціолковський К. та ін.). Воно дозволяло вже тоді аналізувати недоступні або нереальні об’єкти та процеси. Наприклад, Левер’є відкрив планету Уран за аналізом збурення орбіт трьох планет, а Ціолковський довів, що для подолання земного тяжіння потрібна перша космічна швидкість, а не швидкість світла [203].

Проте вважалося, що методи математичного моделювання не придатні для дослідження складних технічних систем, при цьому в галузі техніки відсутність об’єктивних математичних моделей призвело, як до розроблення

багато чисельних часткових методик інженерного розрахунку, які мали рецептурний характер, так і пріоритетного застосування натурних експериментів, що за відсутності інших варіантів дослідження призводило до суб'єктивних рішень [203].

Розвиток обчислювальної техніки, розробка перших ЕОМ (Глушков В.) дозволили надати дослідникам новий ефективний засіб моделювання технологічних процесів складних динамічних систем. Розробка та побудова аналога-моделі динамічних машинних систем здійснюється на основі застосування теорії ймовірності та теорії випадкових функцій, математичної статистики та комп'ютерного математичного програмування тощо, при цьому кінцевим продуктом дослідження є розробка та аналіз диференціальних і інтегральних рівнянь, які функціонально описують взаємозв'язки та явища безпосередньо самого об'єкту дослідження або технологічної системи [2, 13, 51, 202, 204, 205].

Методи моделювання та характеристики моделей, які застосовуються під час дослідження складних технічних систем наведено на рис. 2.1 [206].

При цьому вимоги до моделі залежать від поставлених задач, проблем, які необхідно вирішити за допомогою засобів, що є в наявності дослідника.

Є ряд основних загальних вимог до моделей або властивостей, якими повинна бути модель (рис. 2.2).

В англійській мові для поняття «моделювання» існує два терміни: «modeling» і «simulation». Перший означає моделювання, засноване головним чином на теоретичних положеннях, а другий означає відтворення, імітацію реального або приближеного стану системи на основі аналізу її поведінки (імітаційне моделювання) [203 – 205].

При аналізі поведінки об'єкта-оригіналу формується його уявний образ або ідеальна модель, яка називається когнітивною, рис. 2.3 [206].

Залежно від мети моделі класифікуються на описові, пояснювальні та прогностичні [187]. Формальна класифікація моделей ґрунтується на класифікації математичних засобів або апарату, який застосовується.

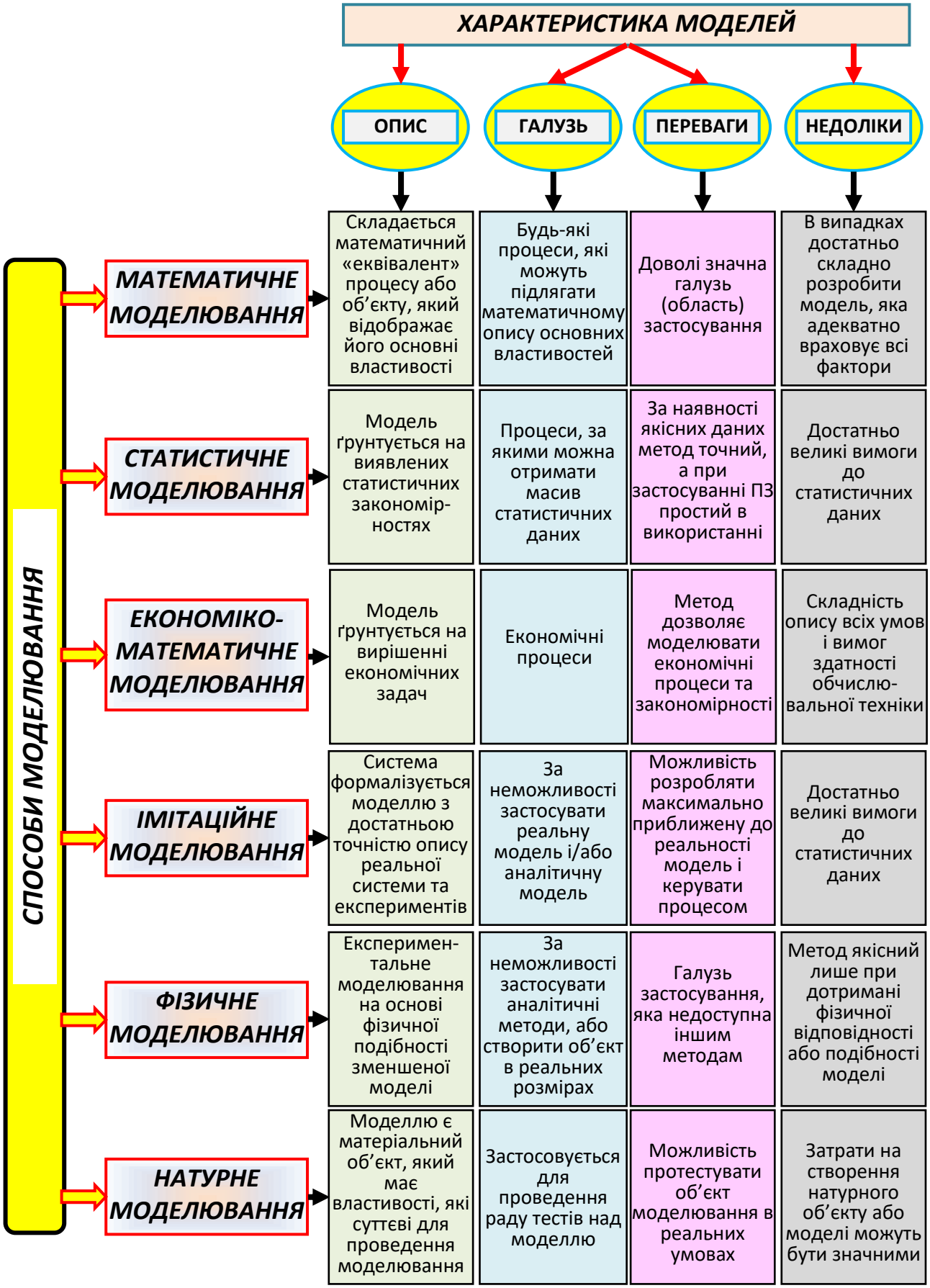



Рисунок 2.1 – Методи моделювання складних технічних систем та їх характеристики

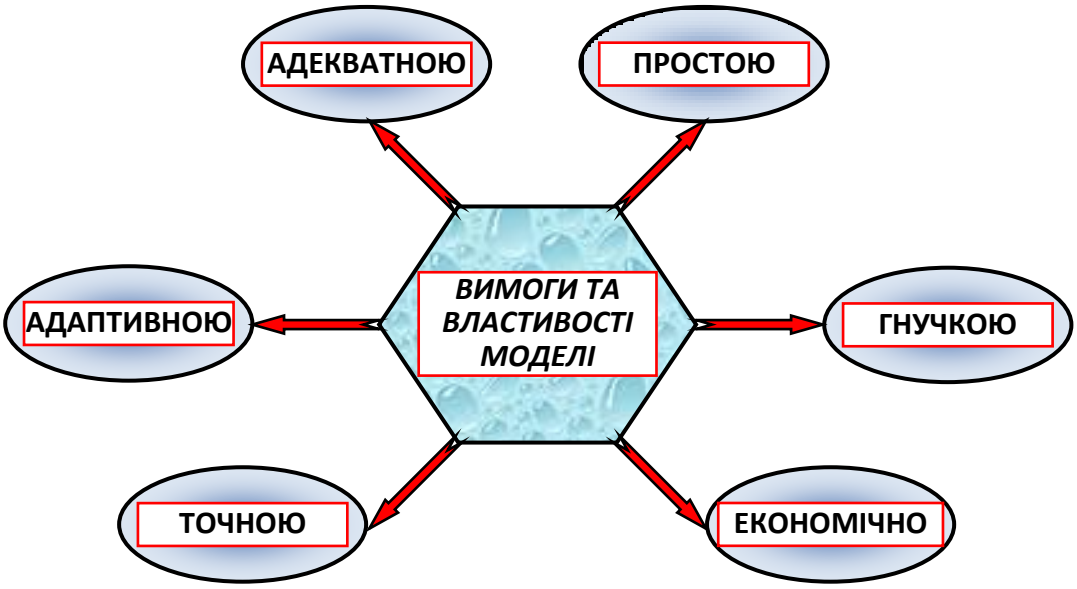



Рисунок 2.2 – Вимоги та властивості моделі

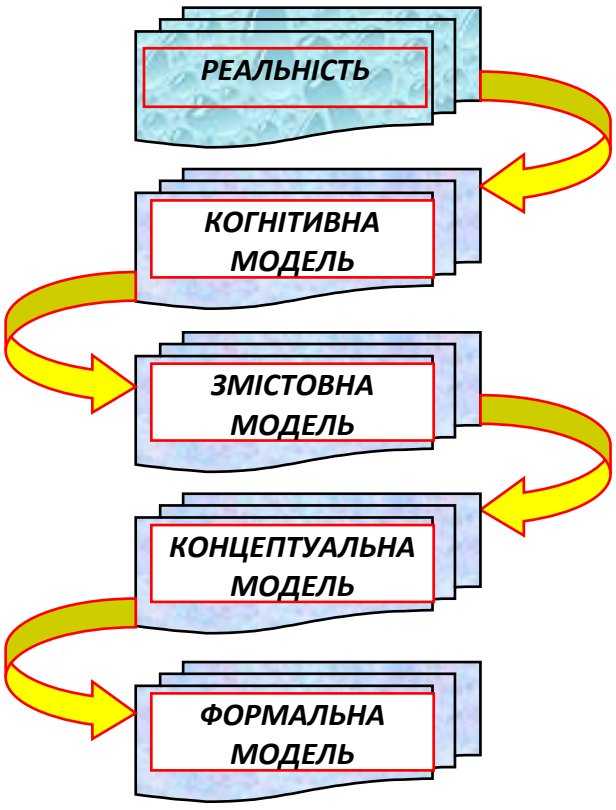



Рисунок 2.3 – Взаємовплив рівнів моделювання технічних систем

Для вивчення складних динамічних технічних систем найбільш часто застосовують метод математичного моделювання [187, 206].

Методи математичного моделювання та характеристики математичних моделей, які застосовуються під час дослідження складних технічних систем наведено на рис.2.4 [187].

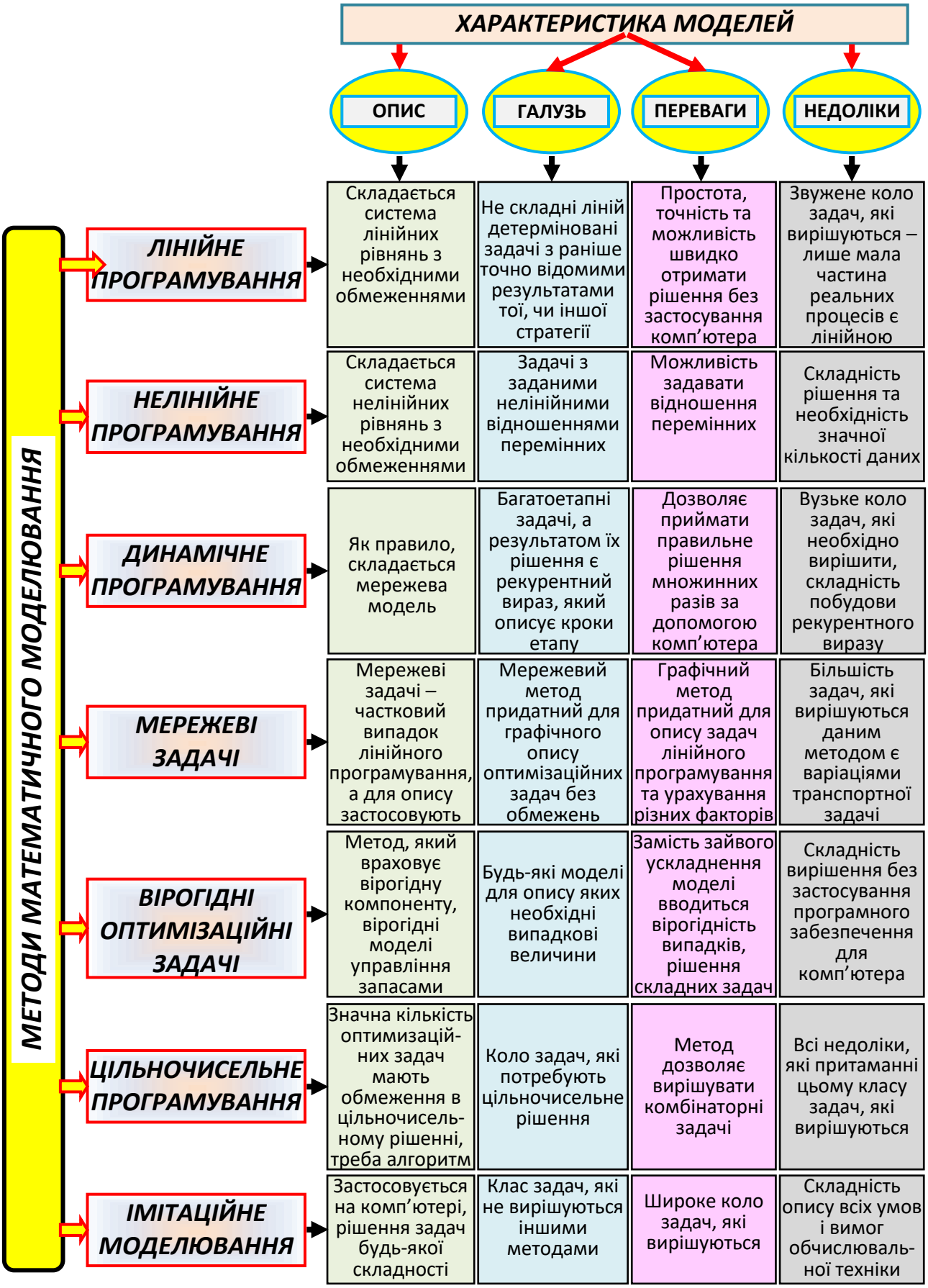



Рисунок 2.4 – Способи математичного моделювання складних технічних систем та їх характеристики

Окремо в методології математичного моделювання можна виділити механіко-математичні моделі, які описують складні технологічні процеси роботи базових вузлів і технічних систем сільськогосподарських машин, у тому числі і коренезбиральних машин, які призначені для механізованого збирання крупних коренеплодів цукрових і кормових буряків, а також коренеплодів цикорію [207].

Окремою важливою ланкою дослідження процесів роботи машин для збирання коренеплодів, є розробка та оптимізація параметрів і режимів роботи робочих органів транспортно-очисних систем вороху [80, 207].

Ці моделі, як правило, описують складні процеси передачі механічної енергії по зв’язкам між елементами робочих органів, продукту обробки та навколишнього середовища. При їх розроблені висуваються робочі гіпотези, які в загальному контексті можна сформулювати таким чином: механіко-технологічні моделі кожної технологічної операції, які підлягають синтезу, повинні описувати енергетичний стан матеріалу, який обробляється в робочому просторі коренезбиральної машини [80, 207].

Тобто такі моделі повинні мати в собі реологічну модель матеріалу обробки або середовища з яким відбувається взаємодія матеріалу. У нашому випадку це реологічні моделі коренеплодів і домішок – грунтового середовища та гички, або формалізований варіант процесу, в якому присутність інородних тіл у викопаному воросі коренеплодів ігнорується.

Такі системи відносяться до динамічних систем, ознакою яких є залежність від часу [187, 206]. Зміни в складній технічній системі від часу відображаються в стані самої системи, який характеризується величиною, яка називається внутрішньою характеристикою системи. Ця характеристика визначає поточне (миттєве) значення вихідних величин, або параметрів ефекту технічної системи [207, 208].

Тому, така структура математичної моделі дозволяє розглядати та аналізувати взаємодію робочих органів з матеріалом обробки, при цьому не накладаючи обмеження на зміну внутрішньої характеристики системи в часі.

На рис. 2.5 [207] наведено структуру механіко-математичної моделі технологічного об’єкту дослідження, яка складається з системи математичних моделей, які необхідні для проведення векторної оптимізації та на достатньому рівні зв’язаних з базою даних цієї моделі.

Основою бази даних, є множина технологічних параметрів $T$ (рис. 2.5), які в даному випадку є керованими або регульованими.

Множина технологічних параметрів $T$ формується з агротехнологічних вимог до процесу роботи технічної системи та керує внутрішніми величинами технологічно-математичної моделі, які поділені на чотири блоки або множини параметрів: множина властивостей і характеристик матеріалу обробки (матеріалу взаємодії) $W$; множина кінематичних параметрів процесу $K$; множина структурних параметрів технологічного об’єкту $C$; множина геометричних параметрів простору взаємодії $G$.

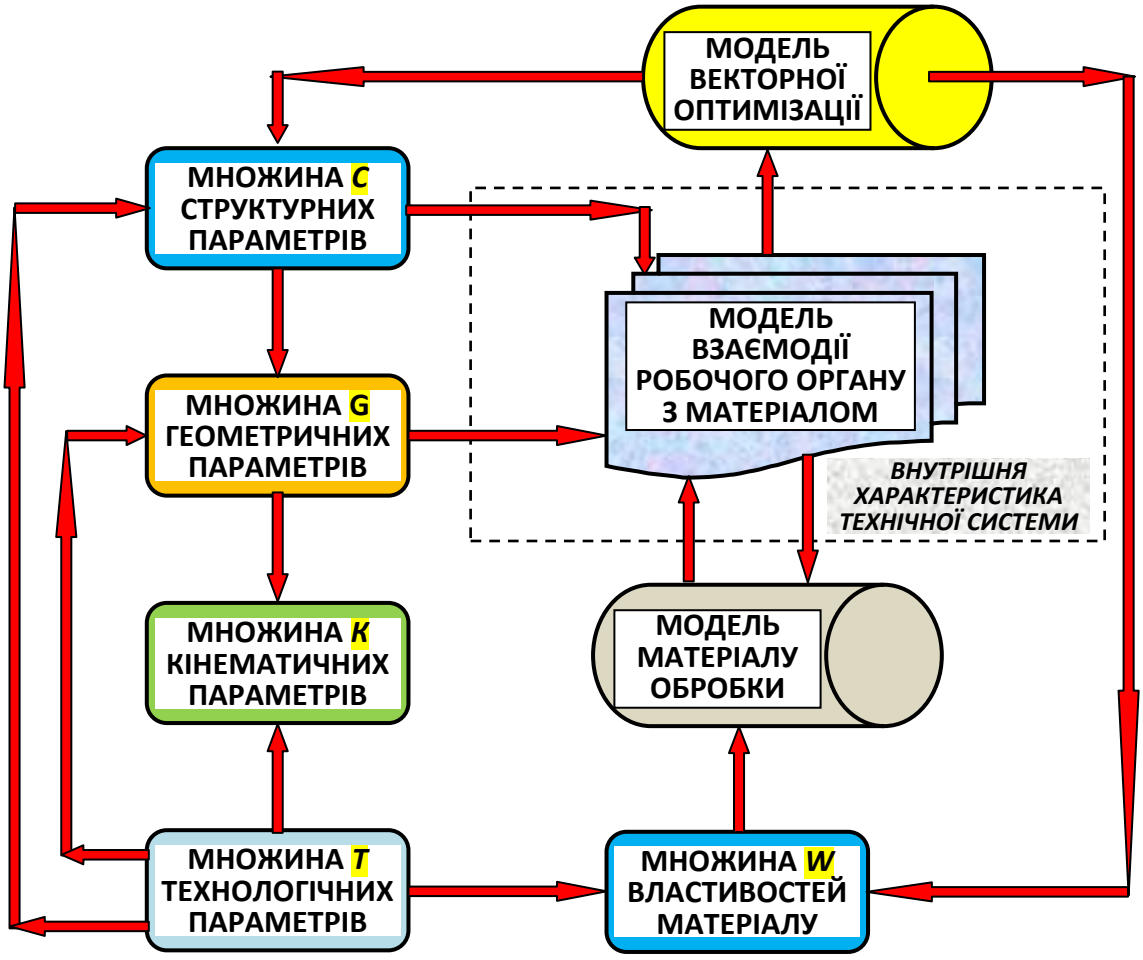



Рисунок 2.5 – Структура механіко-математичної моделі технологічного об’єкту дослідження

Таким чином системі математичних моделей у якості вхідних даних передаються такі вектори: вектор параметрів властивостей $\vec{m}$ матеріалу обробки з множини допустимих альтернатив *M*; вектор кінематичних параметрів процесу $\vec{k}$ з множини допустимих альтернатив *K*; вектор структурних параметрів $\vec{c}$ з множини допустимих альтернатив *C*; вектор геометричних параметрів простору взаємодії $\vec{g}$ з множини допустимих альтернатив *G*.

Тому викладений підхід дозволяє здійснювати науково-методологічне проведення оптимізації робочих процесів і обгрунтовувати раціональні параметри та режими роботи робочих органів технологічно-транспортних систем коренезбиральних машин залежно від прийнятих обмежень згідно з цільовою функцією або існуючими агротехнічними вимогами вимогами, чи технічними умовами [3, 4, 208 – 212, 187].

У галузі аграрної інженерії фундаментальну наукову методологію механіко-математичного моделювання складних динамічних технічних систем було започатковано вченими Артоболевським І., Василенком П., Горячкіним В., Лурє А., Желіговським В., яка розвинена на сучасному рівні вченими Адамчуком В., Бабієм А., Войтюком Д., Гуковим Я., Дубровіним В., Ковбасою В., Кравчуком В., Кушнарьовим А., Ляшуком О., Мироненком В., Нагірним М., Панченком А., Рибаком Т., Рогатинським Р., Хайлісом Г. та іншими зарубіжними вченими та інженерами [14, 5, 52, 110 – 118, 175 – 177, 213 – 218].

Вагомий внесок в подальший розвиток методів математичного моделювання при розроблені та досліджені транспортно-технологічних систем коренезбиральної техніки для галузі буряківництва було внесено вченими Барановським В., Гевком Б., Гевком Р., Головачем І., Гурченком О., Завгороднім А., Козаченком О., Підгурським М., Погорілим Л., Рогатинським Р., Хелемендиком М., Шабельником П. та іншими зарубіжними вченими та інженерами [6, 38, 53 – 55, 69, 70, 119, 151, 170, 181, 219, 220 – 223].

У наукових працях авторами запропоновано наукові гіпотези підвищення технологічної ефективності коренезбиральних машин та викладено алгоритми розроблення конструктивно-технологічних схем транспортно-технологічних систем.

## 2.2. Алгоритм розроблення механіко-технологічної моделі та проведення досліджень очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин

На основі проведеного аналізу наукових досліджень методології розроблення математичних моделей, які функціонально описують реалізацію технологічних процесів складних технічних систем можна констатувати, що приймаючи до уваги значні наукові здобутки та обсяги відомих методів і принципів побудови конструктивно-технологічних схем й математичних моделей, є певні обмеження та наслідкові причини їх застосування для оптимізації процесів і параметрів робочих органів й для задовільного відокремлення домішок від коренеплодів у важких умовах роботи коренезбиральних машин [21, 47, 49, 61, 224, 225].

Основні недоліки, які не дозволяють забезпечувати задовільні показники якості технологічного процесу відокремлення домішок від коренеплодів при застосуванні відомих методологій полягає у наступному:

- компоненти домішок у більшості випадків розглядаються як суцільний потік у певному проміжку часу та нехтується наявна складова, що домішки за своїм складом є різноструктурованими компонентами, кожен з яких значною мірою впливає на процес і має свої відмінні один від іншого фізико-механічні характеристики, а також агробіологічні та природні властивості [226];

- процес відокремлення домішок від коренеплодів, або кількість відокремлених домішок описується залежностями, які характеризують процес сепарації суцільного потоку на всій довжині очисного робочого органу, або на всьому загальному шляху переміщення суцільного потоку коренеплодів і домішок [79, 143].

Детермінована модель дозволяє однозначно обчислити та передбачити значення вихідних величин за значеннями вхідних параметрів та керуючих впливів. У невизначених математичних моделей (рис. 2.1) значення всіх або окремих факторів і параметрів визначається випадковими величинами, які задаються імовірною щільністю випадкового розподілу величин [186].

Формалізована сутність, або цінність детермінованої моделі полягає в тому, що вона дозволяє в об'єкті дослідження, який взаємодіє з середовищем виділити загальні контури та властивості формальної технічної системи в певний період часу, яка в подальшому буде регламентувати систему-модель формальної технічної системи *МФТС* (рис. 2.6).

При цьому гіпотетичний процес розроблення формальної технічної системи, або процесу взаємодіє дослідника з частиною середовища, є результатом реалізації поставленої мети або критеріїв оптимізації, які було сформульовано дослідником на основі його взаємодії з тим формалізованим середовищем, яке формалізує технічну систему *ТС* (рис. 2.6) та формує функціональну систему-модель *ФС-М*.

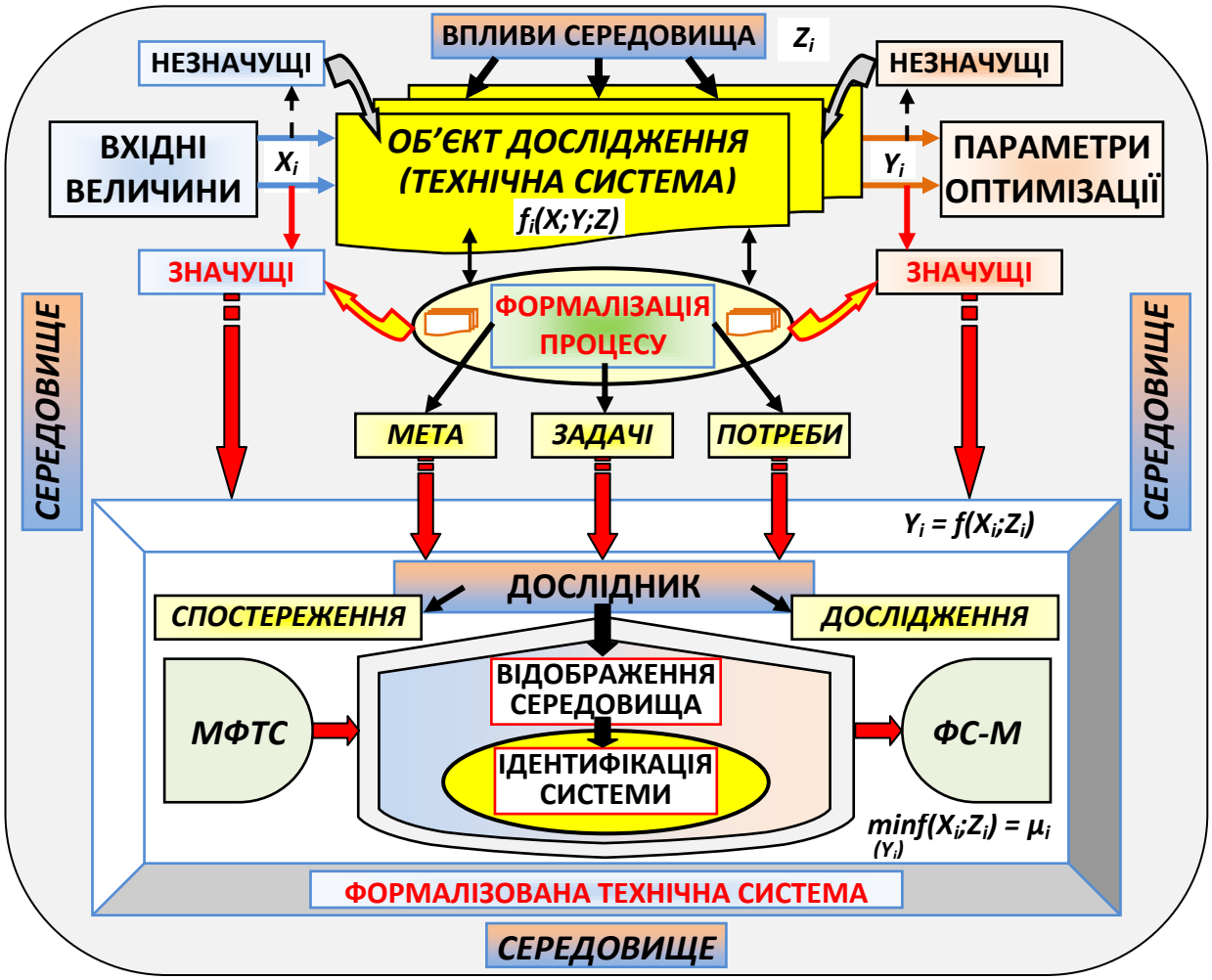



Рисунок 2.6 – Схема формування процесу розроблення функціональної системи-моделі технічного об'єкту дослідження, або складної динамічної технічної системи

Мистецтво моделювання технічних систем полягає у здатності дослідника проводити аналіз існуючої нагальної проблеми, виділяти з неї шляхом абстрагування її суттєві риси або ознаки, вибирати і належним чином модифікувати основні формалізовані припущення, а потім відпрацьовувати і вдосконалювати розроблену попередню модель доти, доки вона не даватиме корисні та позитивні для практики результати згідно з поставленою метою наукових досліджень.

Алгоритм розроблення ОТТМ коренезбиральної машини (рис. 2.7) тісно пов'язаний з складністю очищення вороху, який викопується робочими органами модуля викопування коренеплодів (МВК) із грунтово-коренеплідного середовища, при цьому якість очищення коренеплодів від структурних компонентів домішок функціонально пов'язана з необхідністю значного відокремлення різних за своїми фізико-механічними властивостями ґрунтових і рослинних домішок (подача домішок складає 4…8 кг/п.м), які перебувають відносно коренеплодів у вільному (сипучий грунт, дрібні 20…50 мм і крупні до 100 мм грудки грунту, втрачена гичка) та зв'язаному (налиплий грунт і залишки гички на коренеплодах) станах [143, 226].

Процес проведення наукових досліджень механіко-технологічної моделі ОТТМ коренезбиральної машини, або моделювання технологічного процесу інтенсифікації відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів проілюстровано блок-схемою, яку наведено на рис. 2.8.

Тому розробку та вдосконалення конструктивно-компонувальних схем ОТТМ коренезбиральних машин і оптимізацію параметрів їх робочих органів необхідно проводити із урахуванням специфічних властивостей наявного даного суб'єктивно-обєктивного середовища.

Це є особливо важливим і актуальним для процесу відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів і розроблення конструкцій комбінованих очисних систем, на робочі органи яких надходить значна кількість домішок (ґрунту – до 80…90 %, у тому числі налиплого ґрунту – до 3…5 %; рослинних домішок – до 10…15%; залишків гички на головках коренеплодів – 5…10 % відносно сумарних домішок [227].

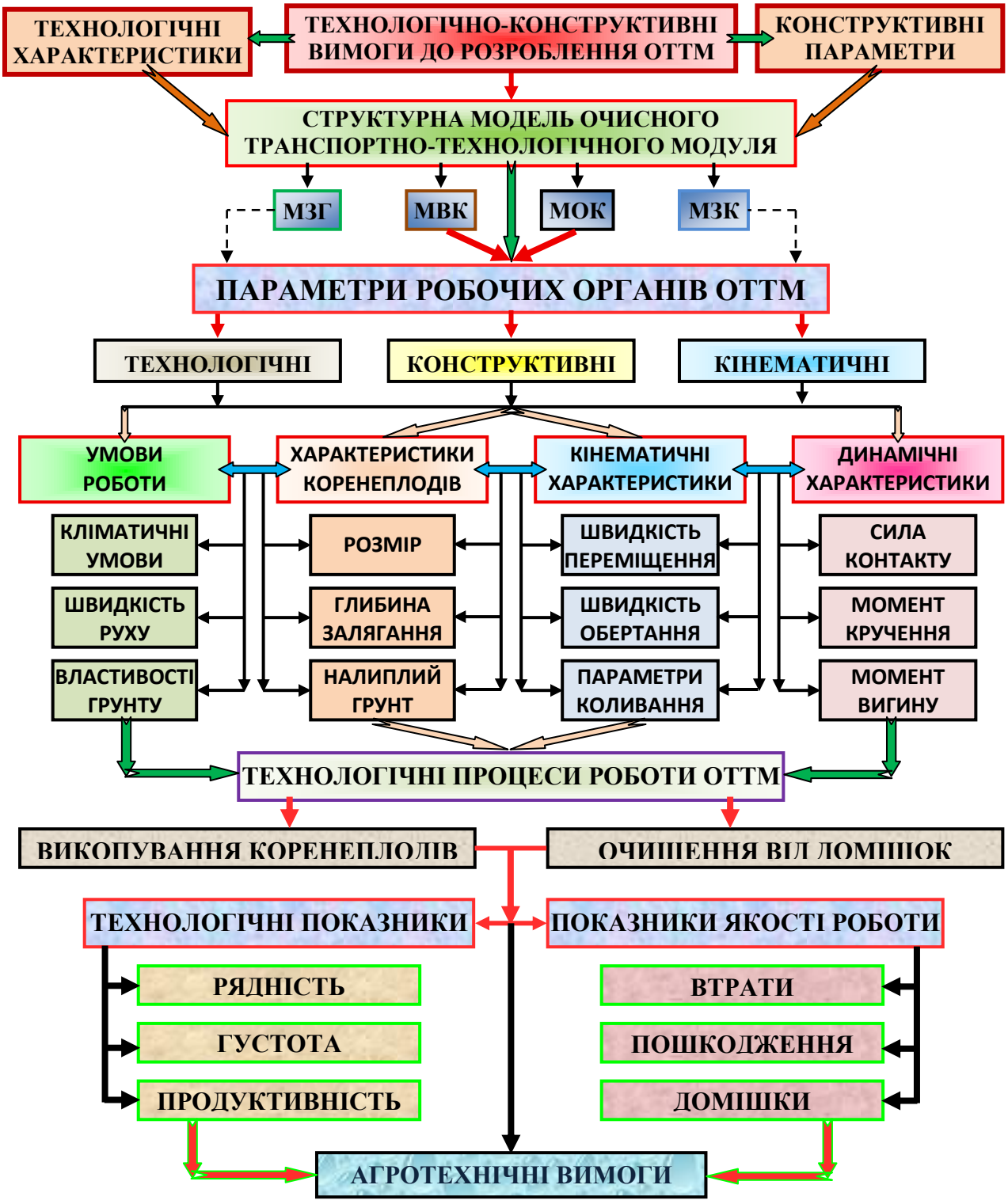



Рисунок 2.7. – Алгоритм розроблення моделі очисного транспортно-технологічного модуля коренезбиральної машини

При цьому, загальні домішки можуть складати до 30…40 % від кількості викопаних коренеплодів залежно від умов роботи коренезбиральної машини [1, 50, 143], які необхідно відокремити від коренеплодів, забезпечивши при цьому необхідні показники якості роботи згідно з агротехнічними вимогами.

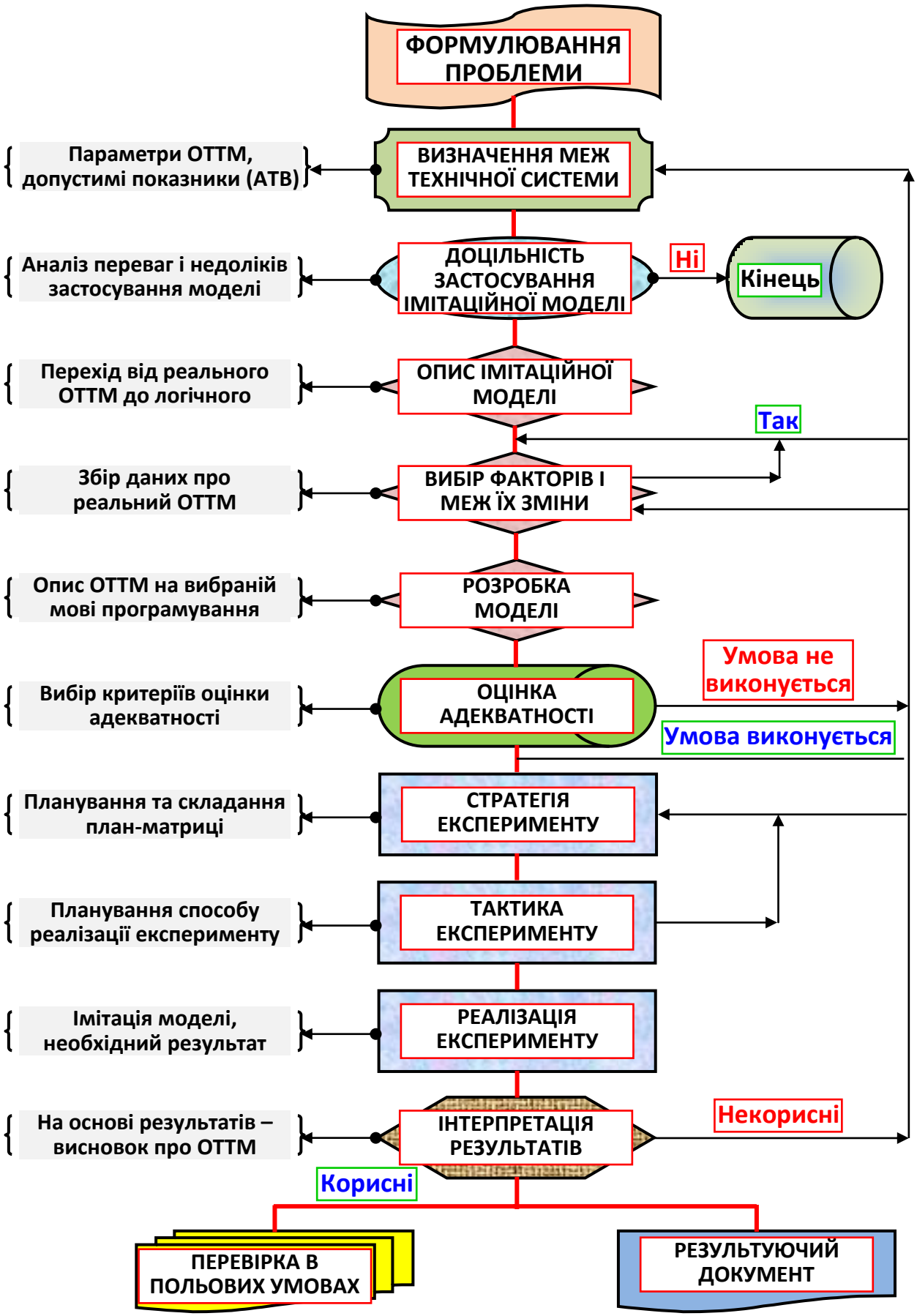



Рисунок 2.8 – Блок-схема взаємопов’язаних етапів проведення наукових досліджень очисного транспортно-технологічного модуля

На основі проведеного теоретично-експериментального аналізу процесів роботи транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин можна констатувати, що розробка комбінованих очисних систем, або ідентифікація процесу розроблення структурних схеми ОТТМ повинна базуватися на застосуванні удосконалених комбінованих робочих органів.

При цьому запропонована технічна система повинна забезпечити вирішення існуючої проблеми, або дозволяти суттєве підвищення показників якості роботи коренезбиральних машин шляхом значного зменшення подачі вільних грунтових і рослинних домішок, особливо грудок грунту та зв'язаних ґрунтових і рослинних домішок, залишків гички на головках коренеплодів, налиплого грунту на бічній поверхні тіла викопаних коренеплодів [228, 229].

Нами, на рівні запропонованої наукової концепції, висунуто робочу гіпотезу, реалізація якої дозволить підвищити показники якості збирання крупних коренеплодів або технологічну ефективність роботи коренезбиральних машин у складних умовах збирання.

Підвищення технологічної ефективності роботи коренезбиральних машин досягається за рахунок додаткової інтенсифікацій процесів очищення коренеплодів від домішок шляхом конструктивного розроблення та оптимізації параметрів робочих органів комбінованих очисних систем [230].

Для реалізації процесу інтенсифікації відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів складною динамічно-технічною системою нами на рівні винаходів запропоновано структурні схеми ОТТМ коренезбиральних машин, 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 важких умовах роботи коренезбиральних машин.

Структурно-конструктивні схеми компонування робочих органів ОТТМ коренезбиральних машин наведено на рис. 2.9 і рис. 2.10.

Базовими вузлами ОТТМ (рис. 2.9) коренезбиральних машин є: похилий транспортер 1; очисна гірка 2, яка встановлена під кутом $\alpha_г$ до горизонту; комбінований робочий орган 3 [231-245].

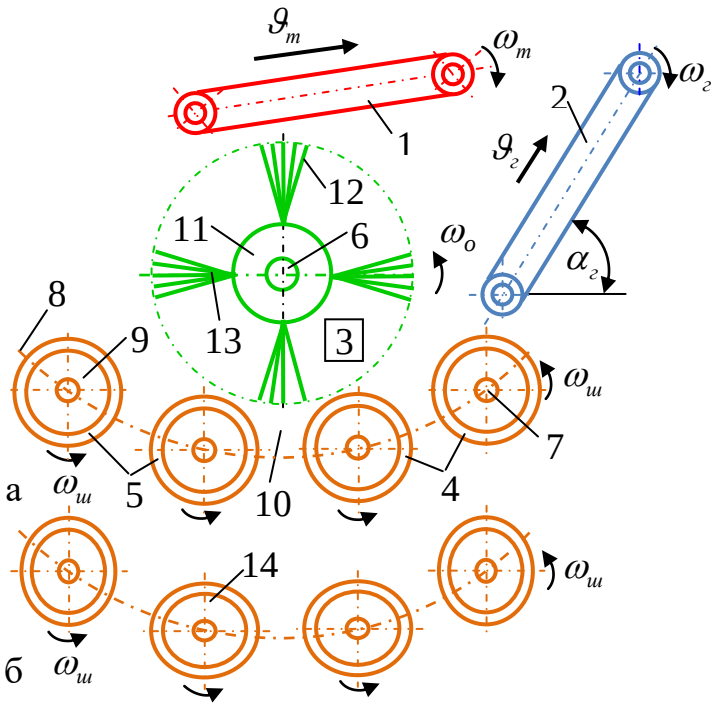



Рисунок 2.9 – Структурно-конструктивна схема очисного транспортно-технологічного модуля: 1 – похилий транспортер; 2 – очисна пальчикова гірка; 3 – комбінований робочий орган; 4, 5 – відповідно, права та ліва система шнеків; 6 – очисний вал; 7 – вал шнека; 8 – нижня вітка еліпса; 9 – очисні шнеки круглого перерізу; 10 – жолоб робочого русла; 11 – барабан; 12 – пружні очисні елементи; 13– пучки ворсу; 14 – еліпсні шнеки

Комбінований робочий орган 3, який виконано у вигляді послідовно встановлених шнеків 9 та розміщеного над ними очисного вала 6, змонтовано в нижній частині сходу робочої гілки очисної гірки. Шнеки утворюють праву 4 та ліву 5 системи. Осі обертання валів 7 шнеків розміщені на нижній вітці еліпса 8, а шнеки утворюють простір жолоба 10 робочого русла. Очисний вал встановлено горизонтально у просторі жолоба робочого русла та зверху над правою та лівою системами шнеків вздовж їх осі обертання.

Очисний вал має циліндричний барабан 11 вздовж якого по гвинтових лініях закріплено очисні пружні елементи 12, які набрані з пучків ворсу 13. Шнеки 9 і 14 можуть бути виконані круглої, або еліпсної форми. Шнеки мають односторонній напрямок обертання. Напрямок обертання очисних пружних елементів 12 протилежний напрямку руху спіральних витків правої та лівої системи шнеків.

За вихідним торцем жолоба робочого русла встановлено вивантажувальний транспортер (на схемі не показано) очищених коренеплодів. Схема його розміщення відносно торця жолоба робочого русла буде залежати від компонувальної схеми коренезбиральної машини.

Приводні вали подавального транспортера, очисної гірки, шнеків і очисного вала обертаються з кутовою швидкістю, відповідно, $\omega_m$, $\omega_г$, $\omega_ш$ і $\omega_o$.

ОТТМ працює таким чином. Викопаний ворох (коренеплоди та структурні компоненти домішок) надходять до похилого транспортера 1 та подаються по робочій гілці похилого транспортера до очисної гірки 2, а далі з нижнього сходу гірки до комбінованого робочого органу 3 у простір жолоба 10 робочого русла, або на праву 6 та ліву 7 системи шнеків.

Процес інтенсифікації відокремлення структурних компонентів домішок робочими органами ОТТМ відбувається таким чином.

За час переміщення вороху по робочій гілці похилого транспортера частина вільних структурних компонентів домішок (вільний сипучий грунт, вільні рослинні домішки, вільні дрібні грудки грунту) просіюються в зазор між прутками похилого транспортера.

У подальшому при попаданні залишкового вороху на робочу гілку очисної гірки, наступна деяка частина вільних домішок і більших грудок грунту виноситься робочою гілкою за межі очисної гірки, а коренеплоди та залишкові домішки скочуються вниз до нижнього сходу очисної гірки, а далі надходять до правої та лівої системи шнеків.

Інтенсифікація технологічного процесу відокремлення структурних компонентів домішок на комбінованому робочому органу 3 відбувається таким чином. При сходжені коренеплодів з нижнього сходу очисної гірки до правої та лівої системи шнеків і подальшого їх переміщення в просторі жолоба робочого русла вздовж осей обертання валів 7 правої 4 та лівої 5 системи шнеків відбувається контактна взаємодія очисних елементів 12, або пучків ворсу 13 з налиплим на поверхні тіла коренеплодів грунтом і залишками гички за рахунок обертання очисного вала 3 з кутовою швидкістю $\omega_o$.

При цьому налиплий грунт і залишки гички зшкрібаються з поверхні тіла коренеплодів і разом з частиною вільних сипучих структурних компонентів домішок просіюється в зазор між валами правої та лівої системи шнеків.

Крім того за рахунок виконання напрямку гвинтових ліній очисних пружних елементів очисного вала протилежних гвинтовим лініям спіральних витків шнеків відбувається пригальмування процесу переміщення структурних компонентів домішок вздовж осьової лінії обертання шнеків, що дозволяє збільшити час знаходження домішок на поверхнях шнеків, або збільшити кількість просіяних домішок через зазори між валами шнеків.

Також додаткова інтенсифікація процесу відокремлення структурних компонентів домішок, є можливою при застосуванні шнеків 14 еліпсної форми.

При обертання шнеків еліпсної форми структурні компоненти домішок під час їх переміщення вздовж осей обертання шнеків отримують додатковий знакоперемінний осцилюючий рух, який виникає в вертикальній площині простору жолоба робочого русла. Це дозволяє розріджувати ворох і покращити процес сепарації структурних компонентів домішок.

Очищені коренеплоди спіральними витками правої та лівої системи шнеків подаються далі за призначенням.

Основними базовими вузлами ОТТМ (рис. 2.10) є: комбінований робочий орган 1; очисна гірка 2; комбінований робочий орган 3 [246].

Конструкція та принцип його роботи комбінованого робочого органу 1 є прототипом конструкції пристрою для відокремлення домішок від коренеплодів [85], який наведено на рис. 1.17.

Конструкція комбінованого робочого органу 3 (рис. 2.10) та принцип його роботи є аналогічна конструкції комбінованого робочого органу 3, який наведено на рис. 2.9. При цьому очисні шнеки 9 можуть бути виготовлені, як круглого перерізу, так і еліпсної форми.

Таким чином, за рахунок встановлення горизонтального вала з очисними пружними елементами над правою та лівою системами шнеків відбувається значне підвищення ступеня відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів.

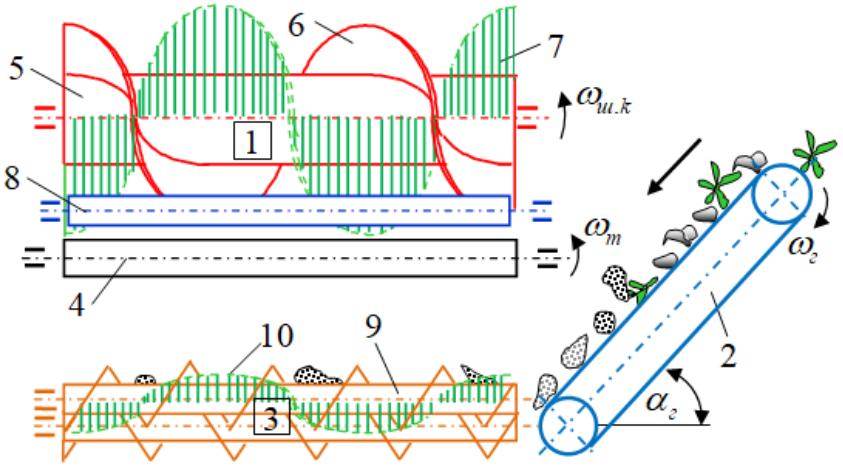



Рисунок 2.10 – Структурно-конструктивна схема очисного транспортно-технологічного модуля: 1 – комбінований робочий орган; 2 – очисна пальчикова гірка; 3 – комбінований робочий орган; 4 – горизонтальний транспортер; 5 – шнековий конвеєр; 6 – виток шнека; 7 – пружні очисні елементи; 8 – валець; 9 – очисні шнеки; 10 – очисний вал

Тому, враховуючи характеристики та властивості моделей і характеру протікання технологічного процесу очищення вороху від домішок можна констатувати, що оптимізацію параметрів робочих органів ОТТМ доцільно проводити шляхом розроблення та аналізу механіко-математичних моделей, які поєднують у собі функціональні властивості динамічних, детермінованих, тривимірних і дискретних імітаційних моделей.

Таке твердження ґрунтується на тому, що технологічному процесу роботи ОТТМ, або процесу відокремлення компонентів домішок від коренеплодів присутні:

- динамічні, або силові ефекти – зміна процесу очищення вороху відбувається внаслідок силової взаємодії компонентів домішок з робочими поверхнями ОТТМ: прутками похилого транспортера; полотном робочої гілки очисної гірки, витками шнека, яка виникає в результаті осцилюючого руху вороху; пружними елементами приводного очисного вала;

- детерміновані, або часові ефекти – зміна процесу відокремлення домішок відбувається в певний період і залежить від часу знаходження вороху на очисних поверхнях робочих органів ОТТМ;

- тривимірні, або просторові ефекти – переміщення компонентів складових домішок відбувається в середовищі просторових координат;

- дискретні, або випадкові ефекти – процес сепарації домішок може приймати деяку множину значень певної ймовірності.

Процес конструктивної розроблення механіко-технологічної моделі очисних транспортно-технологічних модулів коренезбиральних машин, яку побудовано у вигляді інтенсифікованих комбінованих очисних систем, або технічних систем для інтенсифікації функціонального процесу відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів проілюстровано блок-схемами, які наведено на рис. 2.11 і рис. 2.12.

В основу розроблення покладено метод і принцип моделювання на основі динамічного програмування Беллмана із застосуванням багатостадійної оптимізації за методом академіка Л. Погорілого з доповненням етапу транспортного запізнення переміщення вороху.

За принципом Беллмана, оптимальна стратегія динамічної моделі із застосуванням багатостадійної оптимізації має певну властивість стану (показника, параметра тощо), що хоч би якими були початковий стан і початкове рішення початкового стану, наступні рішення динамічної моделі мають становити оптимальний курс дій щодо стану, який отримано в результаті першого попереднього рішення.

На схемі рис. 2.11 і рис. 2.12 позначено:

- МВК – модуль викопування коренеплодів;

- ГС – грунтове середовище;

- СВ – середовище вороху;

- $K$ – коренеплоди;

- $D_1^{(0)}$, $D_2^{(1)}$; $D_1^{(2)}$, $D_2^{(2)}$ – стан об’єкту дослідження (початковий, заданий оптимум стану);

- $A_1^{(0)}$, $A_2^{(0)}$, $A_i^{(0)}$ – відповідно, структурні параметри процесу викопування коренеплодів робочими органами МВК;

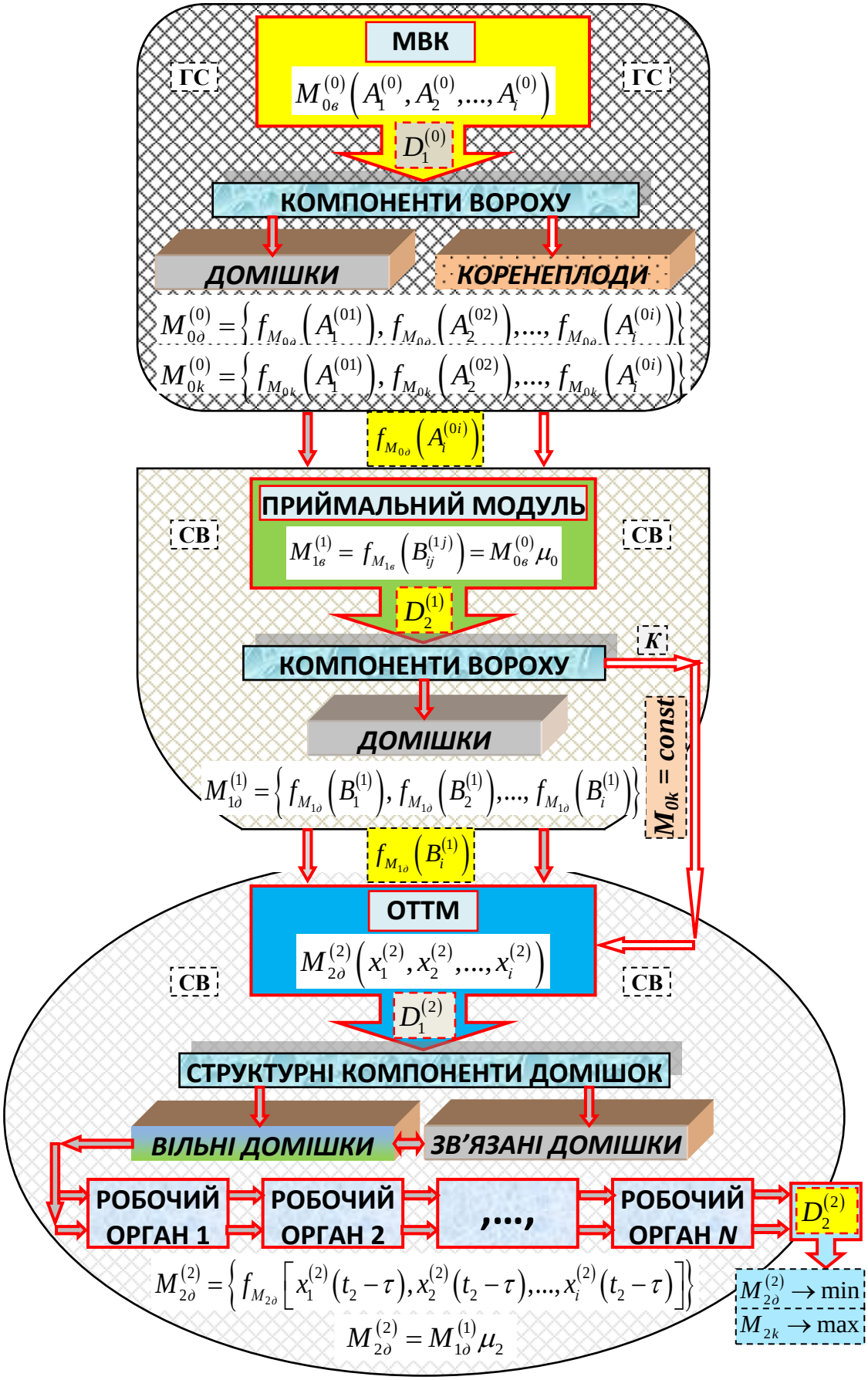



Рисунок 2.11 – Блок-схема розроблення механіко-технологічної моделі процесу відокремлення домішок від коренеплодів

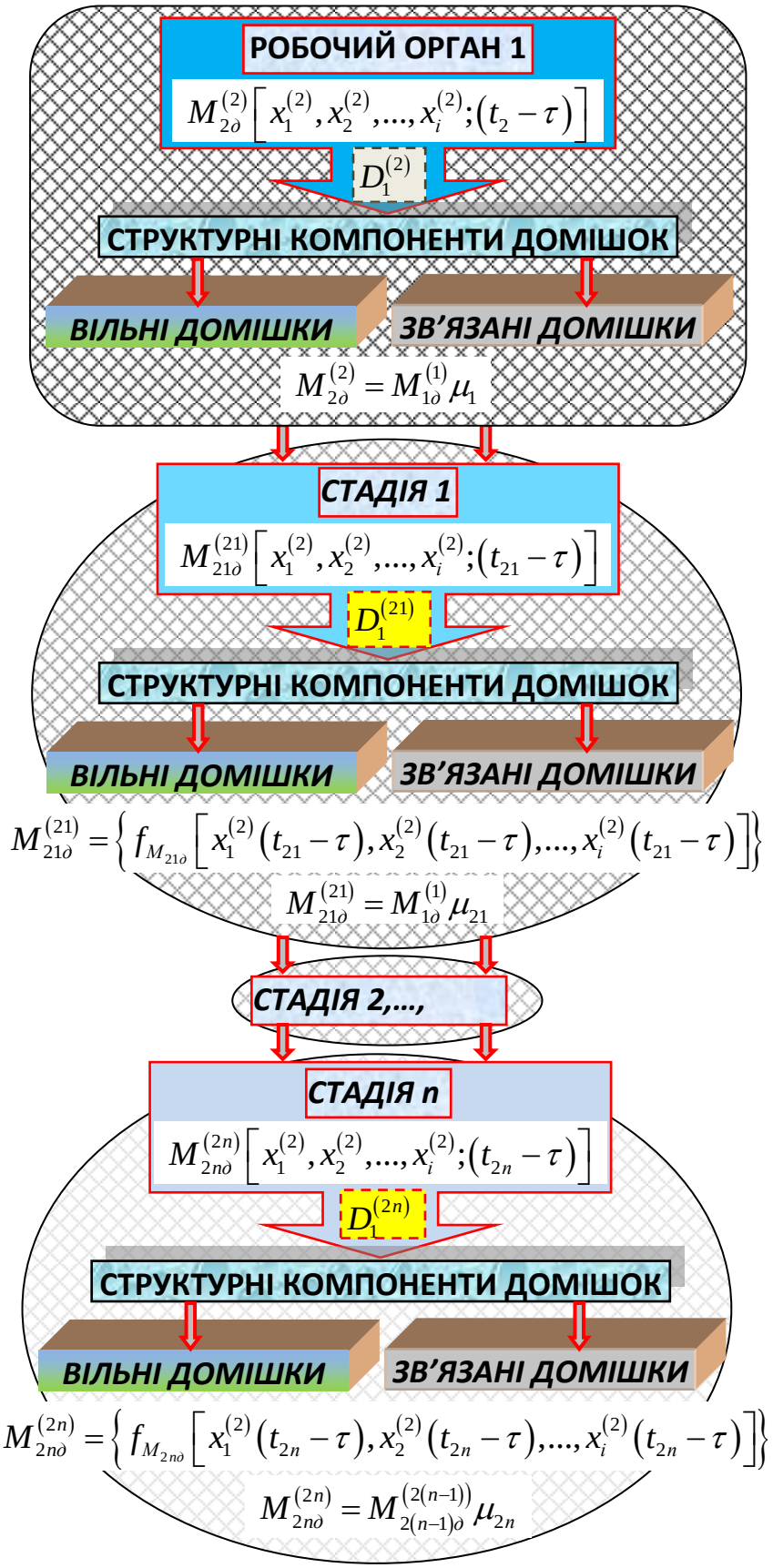



Рисунок 2.12 – Блок-схема розроблення механіко-технологічної моделі постадійного (поетапного) процесу відокремлення домішок від коренеплодів на одному робочому органі ОТТМ

- $B_1^{(1)}$, $B_2^{(1)}$, $B_i^{(1)}$ – відповідно, структурні параметри процесу сепарації домішок приймальним модулем;

- $x_1^{(2)}$, $x_2^{(2)}$, $x_i^{(2)}$ – відповідно, структурні параметри процесу відокремлення домішок від коренеплодів робочими органами ОТТМ;

$M_{0в}^{(0)}$, $M_{0д}^{(0)}$, $M_{0k}^{(0)}$ – відповідно, маса вороху, маса домішок і маса коренеплодів які подаються на робочі органи приймального модуля;

- $M_{1в}^{(1)}$, $M_{1д}^{(1)}$ – відповідно, маса вороху та маса домішок, які подаються на робочі органи ОТТМ; $M_{2д}^{(2)}$ – вихідна (задана) маса домішок;

- $\mu_1$, $\mu_2$ – коефіцієнти сепарації домішок;

- $t_2$, $t_{21}$– відповідно, загальний час переміщення домішок робочими органами ОТТМ і робочим органом 1 на стадії 1;

- $\tau$ – час транспортного запізнення руху складових компонентів домішок і коренеплодів.

Крім того, в основу методології принципів розроблення механіко-технологічної моделі процесу роботи ОТТМ покладено запропонований метод поетапного (багатостадійного) відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів одним робочим органом (наприклад, робочим органом 1, див. рис. 2.11), суть якого проілюстровано блок-схемою, яку наведено на рис. 2.12.

Підвищення ефективності збирання крупних коренеплодів у значній мірі залежить від подальшого поглиблення та розвитку загальної концепції побудови раціональних обрисів сучасних коренезбиральних машин і їх структурних компонентів, або транспортно-технологічних модулів, які забезпечують послідовність виконання основних технологічних операцій збирання коренеплодів, рис. 1.1–1.4.

При цьому, ефективність роботи ОТТМ кардинально залежить від технологічних аспектів роботи попередніх транспортно-технологічних модулів, які виконують початкові постадійні операції збирання основного масиву гички та дообрізування її заликів і викопування коренеплодів.

## 2.3. Технологічні передумови розроблення механіко-математичних моделей робочих процесів комбінованих модулів очищення коренеплодів від домішок

Для проведення оптимізації параметрів робочих органів ОТТМ на стадії його конструктивної розроблення й проектування доцільно визначити та обгрунтувати вихідні початкові передумови, які є визначальними та регламентованими вхідними показниками для проведення наукових досліджень запропонованої структурної механіко-технологічної моделі функціонального процесу відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів, яку розроблено та наведено на рис. 2.11.

Ефективність розроблення математичних моделей для проведення оптимізації параметрів робочих органів ОТТМ у значній мірі залежатиме від оцінки встановлення та аналізу можливих кількісних і якісних меж зміни технологічної подачі компонентів вороху до похилого транспортера 1 (рис. 2.9) або горизонтального транспортера 4 (рис. 2.10), яка функціонально залежить від конструкції і параметрів робочих органів МВК, параметрів насаджень коренеплодів і умов роботи коренезбиральної машини.

Для проведення теоретичного аналізу технологічної подачі компонентів вороху (коренеплодів і домішок) до робочого органу 1 (рис. 2.11, рис. 2.12) ОТТМ розглянемо складену розрахункову схему, яку наведено на рис. 2.13.

На першому етапі розглянемо процес надходження компонентів вороху, який викопується робочими органами МВК з одного рядка коренеплодів у загальному аспекті, рис. 2.14.

При цьому необхідно акцентувати, що технологічна подача складових компонентів вороху, або коренеплодів і домішок до робочих органів ОТТМ залежить від конструктивного виконання, характеристик коренеплодів і поля та відповідно, технологічного характеру процесу функціонування викопувальних робочих органів машини [247-250].

Технологічна подача коренеплодів залежить від:

- розмірно-масових характеристик коренеплодів, їх густоти насадження; робочої швидкості руху та ширини захвату коренезбиральної машини (рядності);

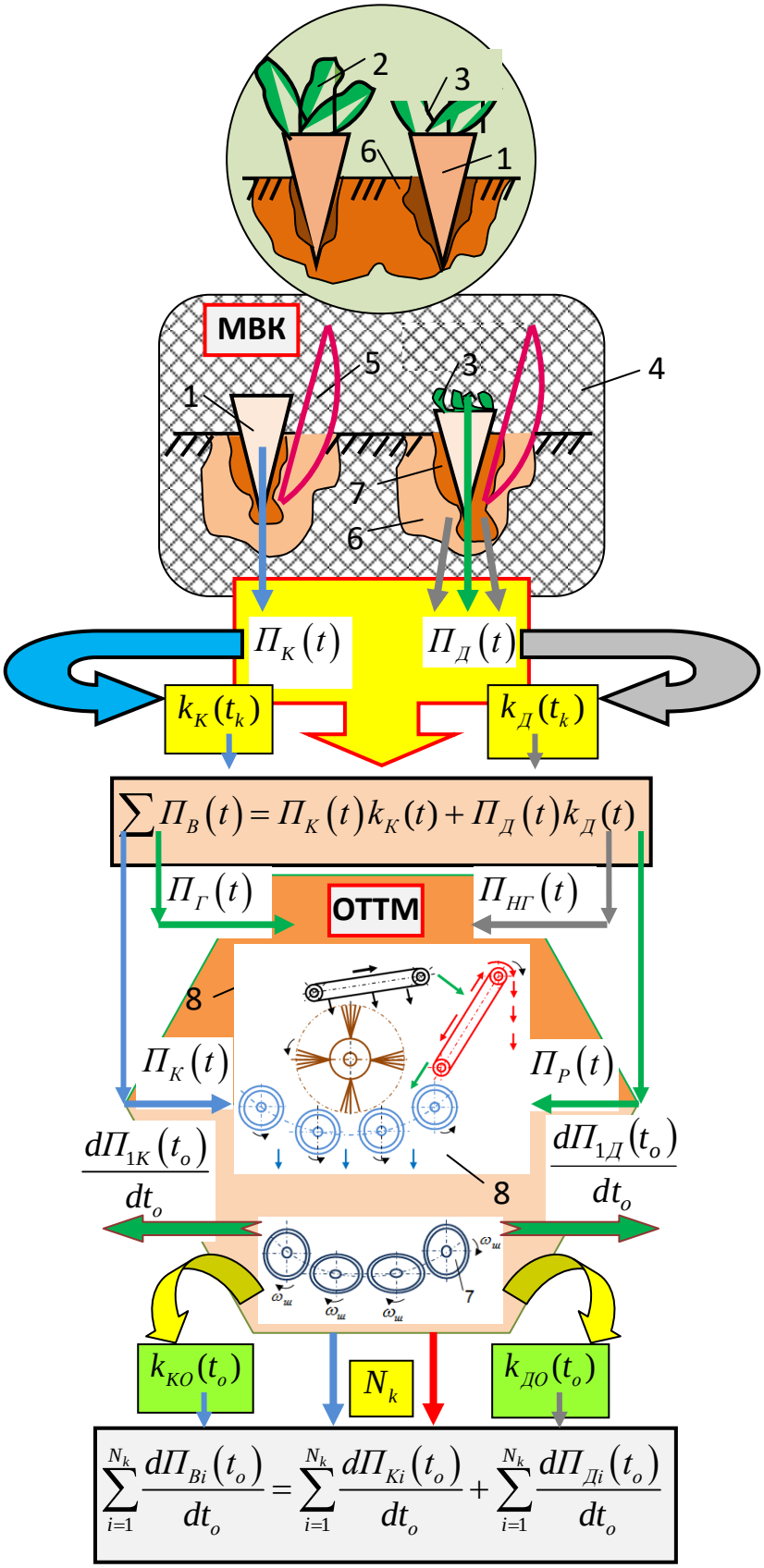



Рисунок 2.13 – Схема технологічної подачі вороху до робочих органів ОТТМ: 1 – коренеплід; 2 – гичка; 3 – залишки гички; 4 – МВК; 5 – копач; 6 – навколоплідне грунтове середовище; 7 – налиплий грунт; 8 – ОТТМ

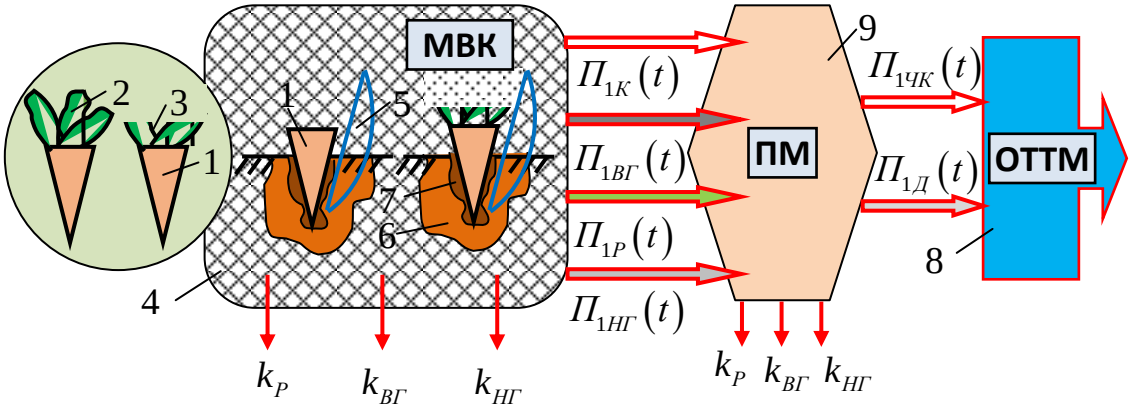



Рисунок 2.14 – Схема технологічної подачі вороху з одного рядка коренеплодів до робочих органів ОТТМ: 1 – коренеплід; 2 – гичка; 3 – залишки гички; 4 – МВК; 5 – копач; 6 – навколоплідне грунтове середовище; 7 – налиплий грунт; 8 – ОТТМ; 9 – приймальний модуль коренезбиральної машини

- технологічних втрат коренеплодів, які можуть бути в процесі їх викопування та переміщення до робочих органів ОТТМ.

Технологічна подача вільного грунту залежить від:

- конструктивного виконання викопувально-транспортного робочого органу;

- робочої швидкості руху та ширини захвату коренезбиральної машини (рядності);

- типу, кліматичного та фізико-механічного стану грунту, або стану грунтового середовища залягання коренеплодів;

- кількості просіяного грунту під час його викопування та переміщення до робочих органів ОТТМ.

Технологічна подача налиплого грунту на поверхні тіла викопаних коренеплодів залежить від [251, 252]:

- розмірно-масових характеристик коренеплодів, їх густоти насадження;

- глибини залягання коренеплодів в грунті;

- конструктивного виконання викопувально-транспортного робочого органу.

Технологічна подача рослинних домішок залежить від:

- урожайності основного масиву гички;

- робочої швидкості руху та ширини захвату гичкозбирального модуля або коренезбиральної машини (рядності);

- кількості втраченої гички під час її переміщення до робочих органів ОТТМ.

Згідно з положеннями [79, 80, 227] приймаємо припущення, що:

- розрахункова теоретично-технологічна подача викопаного вороху з одного рядка коренеплодів буде складатися з подачі коренеплодів і домішок;

- частина коренеплодів викопується та надходить до ОТТМ без налиплого грунту на їх поверхні («чисті» коренеплоди), а друга частина – з налиплим грунтом;

- залишки гички на головках коренеплодів відсутні, тобто ці домішки переходять в розряд вільних рослинних домішок, а бур'янів на полі немає.

Крім того, якщо формалізувати процес, що налиплий грунт 7 (рис. 2.14) на коренеплодах 1, які залягають у ґрунтовому середовищі 6 гіпотетично має вільний характер, або перевести цей структурний компонент домішок у розряд вільних грунтових домішок, тоді можна стверджувати, що подача вороху з одного рядка $dП_{1В}(t)/dt$ (кг/с) за час $t$ переміщення коренезбиральної машини буде складатися з теоретично-розрахункової сумарної подачі викопаних «чистих» коренеплодів $dП_{1ЧК}(t)/dt$ (кг) і домішок $dП_{1Д}(t)/dt$ (кг/с), які є сумарною подачею окремих структурних компонентів: $dП_{1Г}(t)/dt$ (кг/с) – грунтових домішок; $dП_{1Р}(t)/dt$ (кг/с) – рослинних домішок, тобто

$$\frac{dП_{1В}(t)}{dt}=\frac{dП_{1ЧК}(t)}{dt}+\frac{dП_{1Д}(t)}{dt}=\frac{dП_{1ЧК}(t)}{dt}+\frac{dП_{1Г}(t)}{dt}+\frac{dП_{1Р}(t)}{dt}. \qquad (2.1)$$

Тоді сумарна подача вороху $\sum_{i=1}^{N_k} dП_{Bi}(t)/dt$ з викопаних $N_k$-х рядків коренеплодів є кратною подачі вороху з одного рядка, тобто

$$\sum_{i=1}^{N_k} dП_{Bi}(t)/dt = dП_{1B}(t)/dt + dП_{2B}(t)/dt+,,,+dП_{N_kB}(t)/dt;\ i=1,2,\ldots,N_k, \qquad (2.2)$$

або згідно з правою частиною рівняння (2.1) отримаємо

$$\sum_{i=1}^{N_k} dП_{Bi}(t)/dt = \sum_{i=1}^{N_k} dП_{ЧКi}(t)/dt + \sum_{i=1}^{N_k} dП_{Дi}(t)/dt, \qquad (2.3)$$

або

$$\sum_{i=1}^{N_k} dП_{Bi}(t)/dt = \sum_{i=1}^{N_k} dП_{ЧКi}(t)/dt + \sum_{i=1}^{N_k} dП_{Гi}(t)/dt + \sum_{i=1}^{N_k} dП_{Pi}(t)/dt. \qquad (2.4)$$

Зважаючи на прийняті припущення можна записати, що:

- за час $t$ сумарна подача грунтових домішок з одного рядка коренеплодів $\sum_{j=1}^{2} dП_{1Гj}(t)/dt$ є сумою подачі вільного грунту $dП_{1ВГ}(t)/dt$ та налиплого грунту на коренеплодах $dП_{1НГ}(t)/dt$;

- за час $t$ сумарна подача рослинних домішок з одного рядка коренеплодів $\sum_{j=1}^{2} dП_{1Pj}(t)/dt$ є сумою подачі втраченої гички $dП_{1ГВ}(t)/dt$ та залишків гички $dП_{1ЗГ}(t)/dt$.

Тоді

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^{N_k} dП_{Bi}(t)/dt &= \sum_{i=1}^{N_k} dП_{ЧКi}(t)/dt + \sum_{i=1}^{N_k} dП_{Гi}(t)/dt + \sum_{i=1}^{N_k} dП_{Pi}(t)/dt = \\ &= \sum_{i=1}^{N_k} dП_{ЧКi}(t)/dt + \sum_{i=1}^{N_k} dП_{ВГi}(t)/dt + \sum_{i=1}^{N_k} dП_{НГi}(t)/dt + . \\ &+ \sum_{i=1}^{N_k} dП_{ВГi}(t)/dt + \sum_{i=1}^{N_k} dП_{ЗГi}(t)/dt \end{aligned} \qquad (2.5)$$

Аналогічно рівняння (2.2) можна стверджувати, що:

$$\sum_{i=1}^{N_k} dП_{ВГi}(t)/dt = dП_{1ВГ}(t)/dt + dП_{2ВГ}(t)/dt + ,,, + dП_{N_k ВГ}(t)/dt; \qquad (2.6)$$

$$\sum_{i=1}^{N_k} dП_{НГi}(t)/dt = dП_{1НГ}(t)/dt + dП_{2НГ}(t)/dt + ,,, + dП_{N_k НГ}(t)/dt; \qquad (2.7)$$

$$\sum_{i=1}^{N_k} dП_{ГВi}(t)/dt = dП_{1ГВ}(t)/dt + dП_{2ГВ}(t)/dt + ,,, + dП_{N_k ГВ}(t)/dt; \qquad (2.8)$$

$$\sum_{i=1}^{N_k} dП_{ЗГi}(t)/dt = dП_{1ЗГ}(t)/dt + dП_{2ЗГ}(t)/dt + ,,, + dП_{N_k ЗГ}(t)/dt; \qquad (2.9)$$

$$\sum_{i=1}^{N_k} dП_{ЧКi}(t)/dt = dП_{1ЧК}(t)/dt + dП_{2ЧК}(t)/dt + ,,, + dП_{N_k ЧК}(t)/dt; \qquad (2.10)$$

де $П_{1ВГ}(t)/dt$, $П_{2ВГ}(t)/dt,\ldots,П_{N_kВГ}(t)/dt$ – подача вільного грунту з 1-го, 2-го,…,$N_k$- го рядка коренеплодів за час $t$;

$П_{1НГ}(t)/dt$, $П_{2НГ}(t)/dt,\ldots,П_{N_kНГ}(t)/dt$ – подача налиплого грунту з 1-го, 2-го,…,$N_k$-го рядка коренеплодів за час $t$, кг;

$П_{1ГВ}(t)/dt$, $П_{2ГВ}(t)/dt,\ldots,П_{N_kГВ}(t)/dt$ – подача гички втраченої з 1-го, 2-го,…,$N_k$-го рядка коренеплодів за час $t$, кг;

$П_{1ЗГ}(t)/dt$, $П_{2ЗГ}(t)/dt,\ldots,П_{N_kЗГ}(t)/dt$ – подача залишків гички з 1-го, 2-го,…,$N_k$-го рядка коренеплодів за час $t$, кг.

$П_{1ЧК}(t)/dt$, $П_{2К}(t)/dt,\ldots,П_{N_kК}(t)/dt$ – подача «чистих» коренеплодів з 1-го, 2-го,…,$N_k$-го рядка за час $t$, кг.

Подача коренеплодів, а особливо структурних компонентів домішок, які викопуються робочими органами залежить від типу та конструкції копача МВК і його конструктивних параметрів.

У сучасних самохідних бункерних комбайнах найбільш пристосованим для збирання спектру коренеплодів застосовується однодисковий сферичний викопуючий робочий орган, який встановлений під кутом атаки відносно рядка коренеплодів [136, 182, 227, 253, 254].

Тому для теоретично-розрахункової подачі вороху приймаємо постулат, що коренеплоди 1 (рис. 2.15а [6]) викопуються із навколоплідного грунтового середовища сферичним диском 3, кут атаки якого $\gamma_д$.

Тоді згідно з (2.1)-(2.10) можна записати таку рівність [227]

$$\sum_{i=1}^{N_k}\frac{dП_{Дi}(t)}{dt}=\sum_{i=1}^{N_k}\frac{dП_{Bi}(t)}{dt}-\sum_{i=1}^{N_k}\frac{dП_{ЧКi}(t)}{dt}, \tag{2.11}$$

або

$$\sum_{i=1}^{N_k}\frac{dП_{Гi}(t)}{dt}+\sum_{i=1}^{N_k}\frac{dП_{Pi}(t)}{dt}=\sum_{i=1}^{N_k}\frac{dП_{Bi}(t)}{dt}-\sum_{i=1}^{N_k}\frac{dП_{ЧКi}(t)}{dt}, \tag{2.11}$$

або

$$\sum_{i=1}^{N_k}\frac{dП_{ВГi}(t)}{dt}+\sum_{i=1}^{N_k}\frac{dП_{НГi}(t)}{dt}+\sum_{i=1}^{N_k}\frac{dП_{ГВi}(t)}{dt}+\sum_{i=1}^{N_k}\frac{dП_{ЗГi}(t)}{dt}=\sum_{i=1}^{N_k}\frac{dП_{Bi}(t)}{dt}-\sum_{i=1}^{N_k}\frac{dП_{ЧКi}(t)}{dt}, \tag{2.12}$$

або

$$\frac{d\Pi_{1B\Gamma}(t)}{dt}+\frac{d\Pi_{2B\Gamma}(t)}{dt}+,,,+\frac{d\Pi_{N_kB\Gamma}(t)}{dt}+\frac{d\Pi_{1H\Gamma}(t)}{dt}+\frac{d\Pi_{2H\Gamma}(t)}{dt}+,,,+\frac{d\Pi_{N_kH\Gamma}(t)}{dt}+$$

$$+\frac{d\Pi_{1\Gamma B}(t)}{dt}+\frac{d\Pi_{2\Gamma B}(t)}{dt}+,...,+\frac{d\Pi_{N_k\Gamma B}(t)}{dt}+\frac{d\Pi_{13\Gamma}(t)}{dt}+\frac{d\Pi_{23\Gamma}(t)}{dt}+,...,+\frac{d\Pi_{N_k3\Gamma}(t)}{dt}=. \quad (2.13)$$

$$=\left(\frac{d\Pi_{1B}(t)}{dt}+\frac{d\Pi_{2B}(t)}{dt}+,,,+\frac{d\Pi_{N_kB}(t)}{dt}\right)-\left(\frac{d\Pi_{1ЧК}(t)}{dt}+\frac{d\Pi_{2ЧК}(t)}{dt}+,,,+\frac{d\Pi_{N_kЧК}(t)}{dt}\right)$$

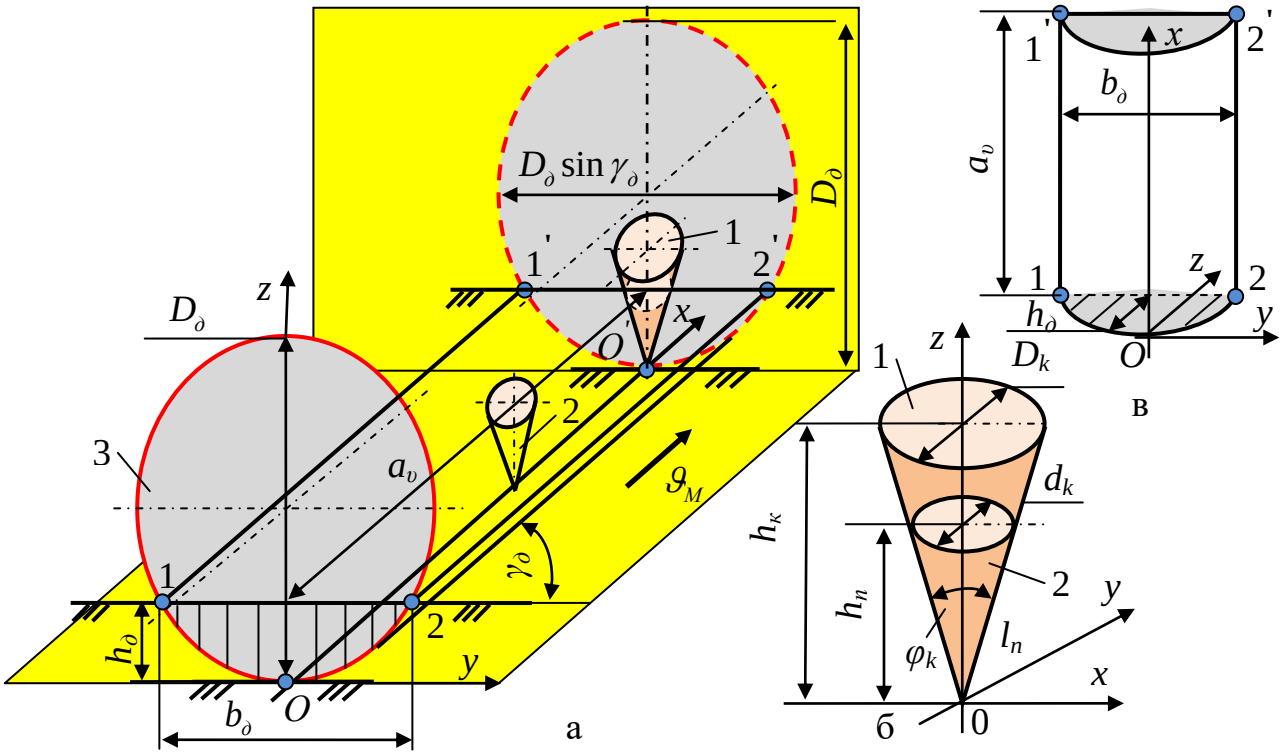



Рисунок 2.15 – Схема для розрахунку подач складових компонентів вороху: 1 – коренеплід; 2 – підземна частина коренеплоду; 3 – сферичний диск

Виразимо умовну 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, або у статичному стані однодискового сферичного копача через подачу сумарної біологічної маси всіх чистих коренеплодів $\sum_{j=1}^{q_k} m_{iЧКj}(t)/dt$ ($j$ = 1, 2,...,$q_k$, де $j$ – кількість коренеплодів, які залягають у навколоплідному ґрунтовому середовищі до їх викопування в одному рядку однакових розмірних параметрів), які розташовані в кожному окремому 1-му, 2-му,…,$N_k$-му рядку, тобто

$$\sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{ЧКi}(t)/dt = \frac{1}{t}\sum_{i=1}^{N_k}\sum_{j=1}^{q_k} m_{iЧКj}(t) = \frac{1}{t}\left[\sum_{j=1}^{q_{1k}} m_{1ЧКj}(t) + \sum_{j=1}^{q_{2k}} m_{2ЧКj}(t) + ,,, + \sum_{j=1}^{q_{N_k k}} m_{N_k ЧКj}(t)\right]. \quad (2.14)$$

Враховуючи, що $m_{ЧКj} = \rho_k V_{ЧКj}$ (де $\rho_k$ – питома маса тіла коренеплоду, кг/м$^3$; $V_{ЧКj}$ – об'єм $j$-го коренеплоду, м$^3$) та згідно з [255] можна записати інтегральний вираз за умови, що форма коренеплоду 1 (рис. 2.13б) є тіло, яке обмежене конічною поверхнею $0,25D_k^2 z^2 = h_k^2\left(x^2 + y^2\right)$, а цей конус лежить між площинами $z_0 = 0$ та $z = h_k$, при цьому $S_z = x^2 + y^2 \le \left(0,5D_k z / h_k\right)^2$ є колом, а $l_k = h_k / \cos\left(0,5\varphi_k\right) = D_k / 2\sin\left(0,5\varphi_k\right)$ є твірною конуса, де $D_k$ – діаметр головки коренеплоду, м; $h_k$ – висота коренеплоду, м; $\varphi_k$ – кут конуса росту коренеплоду, град. [256]

При цьому інтегральний вираз матиме такий загальний запис

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{ЧКi}(t)/dt = &\frac{1}{t}\rho_k \iiint\limits_{(V_{1ЧК})} f(z,y,x)dzdydx + \\ &+\frac{1}{t}\rho_k \iiint\limits_{V_{2ЧК}} f(z,y,x)dzdydx + ,,, + \frac{1}{t}\rho_k \iiint\limits_{V_{N_k ЧК}} f(z,y,x)dzdydx\end{aligned}, \quad (2.15)$$

де $V_{1ЧК}$, $V_{2ЧК}$,…,$V_{N_k ЧК}$ – загальний об'єм коренеплодів, які викопуються з 1-го, 2-го,…, $N_k$-го рядка, м$^3$.

Згідно з [255] інтегрування виразу (2.15) приведемо до інтегрування подвійного інтеграла по області $S_{iz}$. Тоді інтегральний вираз (2.15) з урахуванням (2.14) можна переписати у вигляді

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\Pi_{ЧКi}(t)}{dt} = &\frac{1}{t}\rho_k q_{1kj} \int_0^{l_{1k}} \left(\iint\limits_{S_{1z}} f(z,y,x)dxdy\right)dz + \\ &+\frac{1}{t}\rho_k q_{2kj} \int_0^{l_{2k}} \left(\iint\limits_{S_{2z}} f(z,y,x)dxdy\right)dz + ,,, + \frac{1}{t}\rho_k q_{N_k kj} \int_0^{l_{N_k k}} \left(\iint\limits_{S_{N_k z}} f(z,y,x)dxdy\right)dz\end{aligned}, \quad (2.16)$$

де $q_{1k}$, $q_{2k}$,…,$q_{N_k k}$ – загальна кількість коренеплодів, які залягають в 1-му, 2-му,…, $N_k$-му рядку, шт.

$l_{1k}$, $l_{2k}$,…,$l_{N_k k}$ – твірна конуса коренеплоду, який викопується з 1-го, 2-го,…, $N_k$-го рядка, м;

$S_{1z}$, $S_{2z}$,…,$S_{N_k z}$ – площа кола, або основи конуса коренеплоду, який викопується з 1-го, 2-го,…, $N_k$-го рядка, м$^2$.

У результаті обчислення інтегрального виразу (2.16) (додаток Б.1.3), отримано

$$\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{чKi}(t)}{dt}=\frac{2\pi\rho_k}{3t}\left[q_{1k}h_{1k}^2\left(l_{1k}-h_{1k}\right)+q_{2k}h_{2k}^2\left(l_{2k}-h_{2k}\right)+,,,+q_{N_k k}h_{N_k k}^2\left(l_{N_k k}-h_{N_k k}\right)\right], \quad (2.17)$$

або

$$\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{чKi}(t)}{dt}=\frac{2\pi\rho_k}{3t}\left[\begin{array}{l} q_{1k}h_{1k}^2\left(\dfrac{D_{1k}}{2\sin\left(0{,}5\varphi_{1k}\right)}-h_{1k}\right)+q_{2k}h_{2k}^2\left(\dfrac{D_{2k}}{2\sin\left(0{,}5\varphi_{2k}\right)}-h_{2k}\right)+ \\ +,,,+q_{N_k k}h_{N_k k}^2\left(\dfrac{D_{N_k k}}{2\sin\left(0{,}5\varphi_{N_k k}\right)}-h_{N_k k}\right) \end{array}\right]. \quad (2.18)$$

Для кінцевого визначення теоретично-розрахункової сумарної подачі чистих коренеплодів до робочого органа 1 (рис. 2.11, рис. 2.12) ОТТМ за сумарний час переміщення $t_n$, яку позначимо $\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{чKi}(t_n)}{dt_n}$, необхідно врахувати втрати коренеплодів, які виникають у процесі їх викопування копачем і переміщення викопаних коренеплодів до робочого органу 1 за сумарний час $t_n$.

При цьому приймаємо постулат, що втрати коренеплодів відбуваються тільки на етапі їх викопування копачем, які згідно агротехнічних вимог при збиранні цукрових і кормових буряків не повинні перевищувати 1,5% [65, 66], а при збиранні коренеплодів цикорію – 2,5% [257].

Крім того, застосування залежності (2.18) для проведення практичних розрахунків сумарної подачі чистих коренеплодів буде мати певні труднощі при визначені геометричних параметрів коренеплодів, які мають випадковий характер.

Тому для зручності та більшої вірогідної точності практичних розрахунків $\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{чКi}(t_n)}{dt_n}$ виразимо масу коренеплодів, які викопуються копачем за час $t_n$ через урожайність коренеплодів $B_k$ (кг/м$^2$) на даній площі $F_{\vartheta_M}$ (м$^2$) ділянки поля, геометричними розмірами якої є довжина ділянки $a_\vartheta = \vartheta_M t_n$ (м) та ширина ділянки, яка відповідає ширині міжряддя коренеплодів $b_м$ (м), при цьому $F_{\vartheta_M} = \vartheta_M t_n b_м$.

З урахуванням того, що $m_{ik} = B_{ik}\vartheta_M t_n b_м$ та позначивши коефіцієнт втрат коренеплодів $\lambda_{iв}$ залежність (2.18) запишемо у вигляді

$$\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{чКi}(t_n)}{dt_n} = B_{1k}\vartheta_M t_n b_м \lambda_{1в} + B_{2k}\vartheta_M t_n b_м \lambda_{2в} + ,,, + B_{N_k k}\vartheta_M t_n b_м \lambda_{N_k в}. \qquad (2.19)$$

Прийнявши у залежності (2.18) час $t$ =1 с і у залежності (2.19) час переміщення коренеплодів $t_n$ = 1 с = $t$, отримаємо залежності для визначення зміни сумарної секундної подачі $\sum_{i=1}^{N_k}\Pi_{чКi}/dt$ (кг/с) чистих коренеплодів до робочого органа 1 ОТТМ, відповідно: від зміни геометричних розмірів коренеплодів; від зміни урожайності коренеплодів, швидкості руху коренезбиральної машини та геометричних розмірів сферичного диска, тобто:

$$\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{чКi}}{dt} = \frac{2\pi\rho_k}{3t}\left[\begin{array}{l} q_{1k}^{(1)}h_{1k}^2\lambda_{1в}\left(\frac{D_{1k}}{2\sin(0{,}5\varphi_{1k})} - h_{1k}\right) + q_{2k}^{(1)}h_{2k}^2\lambda_{2в}\left(\frac{D_{2k}}{2\sin(0{,}5\varphi_{2k})} - h_{2k}\right) + \\ +,,, + q_{N_k k}^{(1)}h_{N_k k}^2\lambda_{N_k в}\left(\frac{D_{N_k k}}{2\sin(0{,}5\varphi_{N_k k})} - h_{N_k k}\right) \end{array}\right]; \qquad (2.20)$$

$$\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{чКi}}{dt} = B_{1k}\vartheta_M b_м \lambda_{1в} + B_{2k}\vartheta_M b_м \lambda_{2в} + ,,, + B_{N_k k}\vartheta_M b_м \lambda_{N_k в}. \qquad (2.21)$$

де $q_{1k}^{(1)}$, $q_{2k}^{(1)},\ldots,q_{N_k k}^{(1)}$ – кількість коренеплодів, які викопуються робочими органами МВК за час $t$ = 1 с з 1-го, 2-го,…, $N_k$-го рядка, або кількість коренеплодів, які залягають на 1 п.м в 1-му, 2-му,…, $N_k$-му рядку, шт.

Якщо спростити задачу шляхом прийняття постулатів, що:

- геометричні розмірі коренеплодів є постійними (однаковими, або їх значення є умовно середніми відносно варіації можливих значень) і кількість коренеплодів на 1 п.м в одному рядку є умовно середньо однаковою) для всіх $N_k$-х рядків, тобто $h_{ik} = h_k = const$, $D_{ik} = D_k = const$; $\varphi_{ik} = \varphi_k = const$; $q_{1k}^{(1)} = q_{2k}^{(1)} = ,,, = q_{N_k k}^{(1)} = q_k^{(1)}$;

- урожайність коренеплодів і втрати коренеплодів є постійними (однаковими) для всіх $N_k$-их рядків, тобто $B_{ik} = B_k = const$; $\lambda_{ів} = \lambda_в = const$).

Тоді залежності (2.20) і (2.21) для визначення секундної подачі чистих коренеплодів до робочого органа 1 ОТТМ матимуть вигляд:

$$\frac{d\Pi_{чК}}{dt} = \frac{2\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_k^2 \lambda_в N_k \left( \frac{D_k}{2\sin(0{,}5\varphi_k)} - h_k \right); \qquad (2.22)$$

$$\frac{d\Pi_{чК}}{dt} = B_k \vartheta_M b_м \lambda_в N_k, \qquad (2.21)$$

де $q_k^{(1)}$ – середня кількість коренеплодів, які викопуються робочими органами МВК за час $t_n$ = 1 с, або з 1 п.м рядка, шт.

Виразимо відсотковий показник значення коефіцієнта втрат $\lambda_в$ коренеплодів через уявне натуральне значення, тобто $\lambda_в = 1 - \lambda_{вк}$, де $\lambda_{вк}$ = 0,015…0,025.

Таким чином, кінцеві залежності для проведення теоретичних розрахунків прогнозованої сумарної секундної подачі чистих коренеплодів до робочого органу 1 (рис. 2.11, рис. 2.12) ОТТМ мають вигляд:

- залежно від геометричних розмірів коренеплодів

$$\frac{d\Pi_{чК}}{dt} = \frac{2\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_k^2 (1 - \lambda_{вк}) N_k \left( \frac{D_k}{2\sin(0{,}5\varphi_k)} - h_k \right); \qquad (2.23)$$

- залежно від біологічної урожайності коренеплодів

$$\frac{d\Pi_{чК}}{dt} = B_k \vartheta_M b_м (1 - \lambda_{вк}) N_k. \qquad (2.24)$$

На рис. 2.16 наведено побудовані згідно з (2.23) і (2.24) графічні відтворення залежності зміни сумарної секундної подачі чистих коренеплодів, відповідно, як функція $\frac{d\Pi_{ЧК}}{dt} = f_{П}(\lambda_{вк}, D_k)$ і $\frac{d\Pi_{ЧК}}{dt} = f_{П}(B_k, \lambda_{вк})$ за значень $t$ = 1 с; $\rho_k$ = 550 кг/м$^3$; $q_k^{(1)}$ = 4 шт.; $h_k$ = 0.15; 0,2; 0,25; 0,3 м; $b_м$ = 0,45 м, $N_k$ = 6 шт., $\varphi_k$ = 15 град., $\vartheta_M$ = 1,4; 1,6; 1,8; 2,0 м/с.

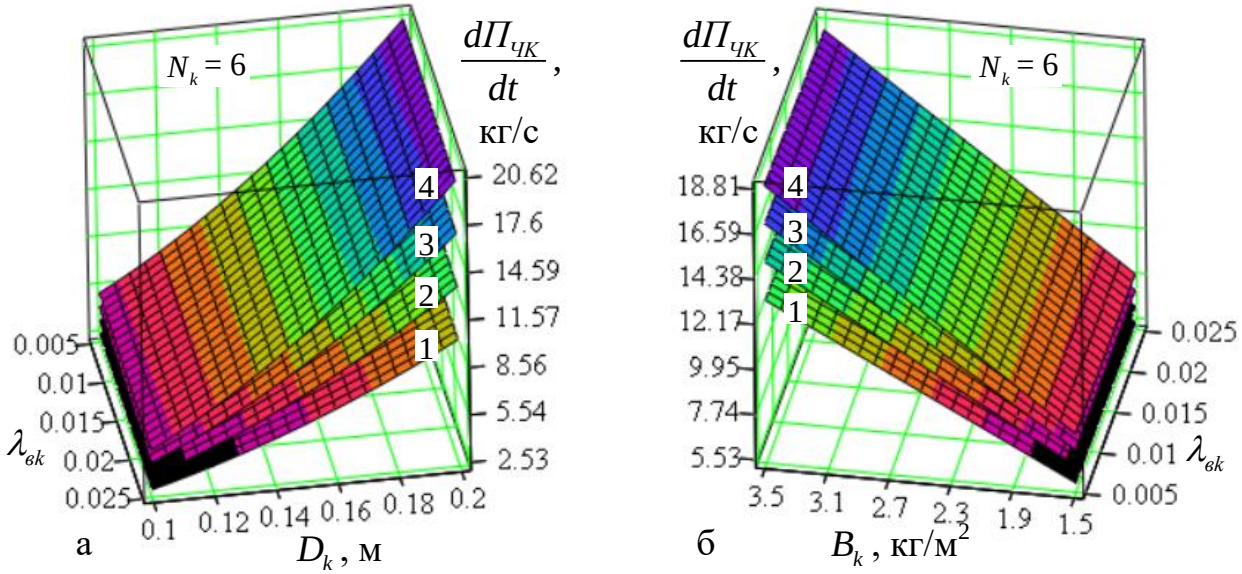



Рисунок 2.16 – Залежність зміни сумарної подачі чистих коренеплодів як функція: а – $\frac{d\Pi_{ЧК}}{dt} = f_{П}(\lambda_{вк}, D_k)$, 1, 2, 3, 4 – $h_k$ = 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 м; б – $\frac{d\Pi_{ЧК}}{dt} = f_{П}(B_k, \lambda_{вк})$, 1, 2, 3, 4 – $\vartheta_M$ = 1,4; 1,6; 1,8; 2,0 м/с

На основі аналізу графічних побудов (рис. 2.16) встановлено, що сумарна секундна подача чистих коренеплодів $d\Pi_{ЧК} / dt$ до робочого органу 1 (рис. 2.11) ОТТМ з 6 рядків знаходиться в межах від мінімального значення 2,5 кг/с до максимального значення 20,6 кг/с залежно від меж зміни геометричних параметрів коренеплодів ($D_k$, $h_k$), урожайності коренеплодів $B_k$ і швидкості руху $\vartheta_M$ коренезбиральної машини за зміни коефіцієнта втрат коренеплодів $\lambda_{вк}$ від 0,5 до 2,5%. При цьому, визначальними параметрами, які суттєво впливають на теоретично-розрахункове значення $d\Pi_{ЧК} / dt_n$ під час стабілізованого процесу викопування коренеплодів МВК ($\vartheta_M = const$) є діаметр $D_k$ та урожайність $B_k$ коренеплодів.

За зміни діаметра коренеплодів в межах $D_k \pm 0{,}02$ (м) сумарна секундна подача чистих коренеплодів $d\Pi_{ЧК}/dt$ до робочого органу 1 ОТТМ коренезбиральної машини, відповідно, зростає або зменшується в межах зміни від 1,2 до 3,7 кг/с (рис. 2.17а). За зміни урожайності коренеплодів в межах $B_k \pm 0{,}5$ (кг/м$^2$), або $B_k \pm 5$ (ц/га) – відповідно, зростає або зменшується в межах зміни від 1,4 до 2,6 кг/с (рис. 2.17б, рис. 2.18).

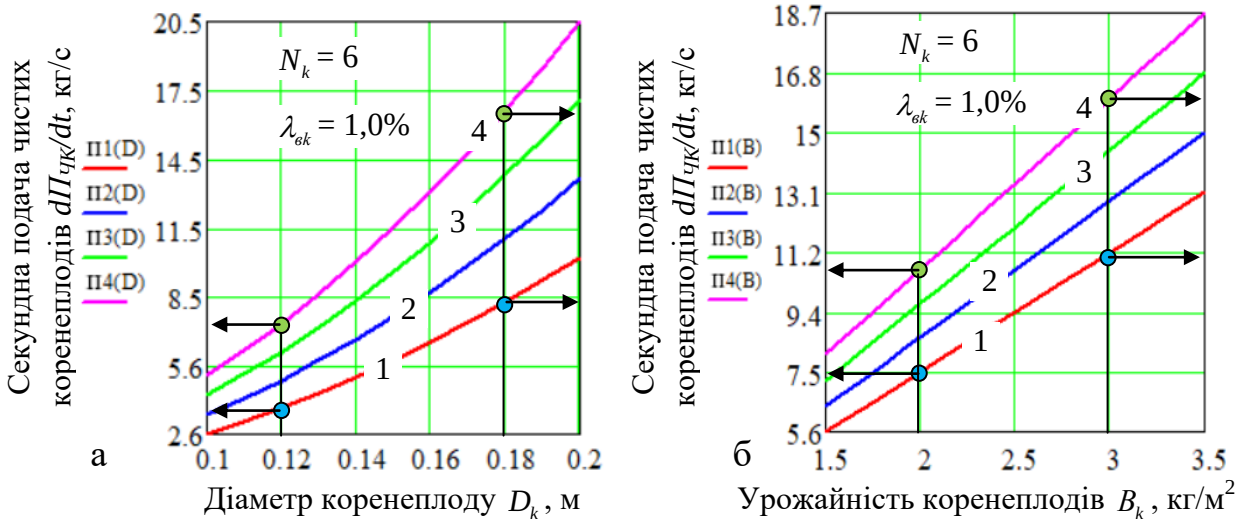
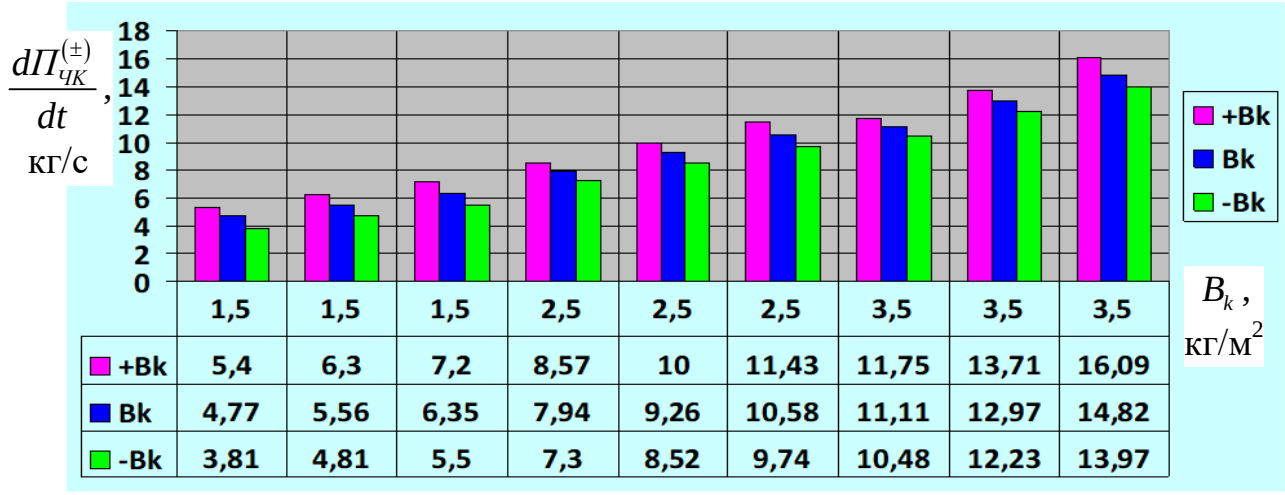


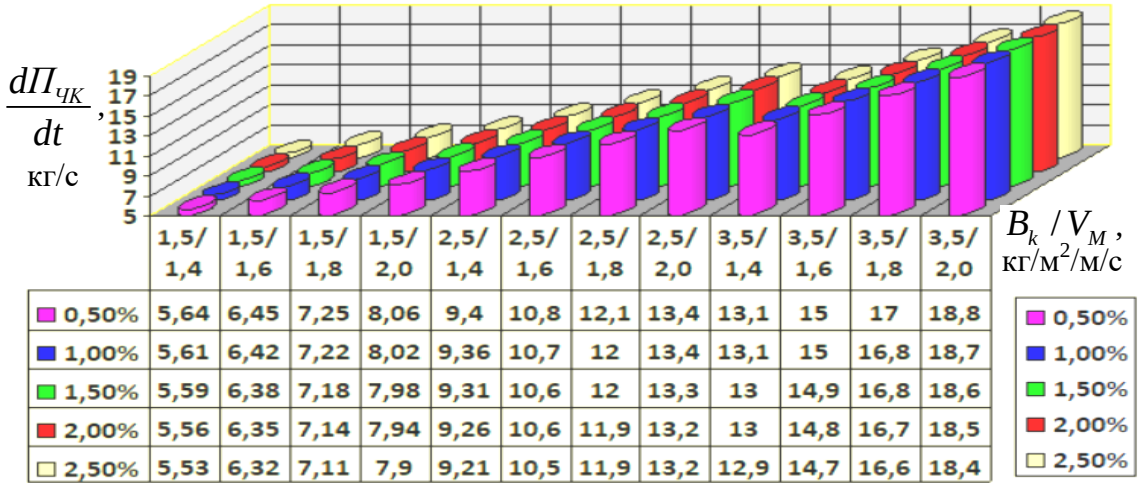

Рисунок 2.17 – Залежність зміни сумарної подачі чистих коренеплодів як функція: а – $\dfrac{d\Pi_{ЧК}}{dt} = f_{П}(D_k)$, 1, 2, 3, 4 – $h_k$ = 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 м; б – $\dfrac{d\Pi_{ЧК}}{dt} = f_{П}(B_k)$, 1, 2, 3, 4 – $\vartheta_M$ = 1,4; 1,6; 1,8; 2,0 м/с




| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| +Bk | 5,4 | 6,3 | 7,2 | 8,57 | 10 | 11,43 | 11,75 | 13,71 | 16,09 |
| Bk | 4,77 | 5,56 | 6,35 | 7,94 | 9,26 | 10,58 | 11,11 | 12,97 | 14,82 |
| -Bk | 3,81 | 4,81 | 5,5 | 7,3 | 8,52 | 9,74 | 10,48 | 12,23 | 13,97 |

Рисунок 2.18 – Діаграма зміни $d\Pi_{ЧК}/dt$ залежно від зміни урожайності коренеплодів $B_k \pm 0{,}5$ кг/м$^2$

Зміна коефіцієнта втрат коренеплодів $\lambda_{вк}$ в допустимих межах згідно з агротехнічними вимогами до коренезбиральних машин (для цукрових і кормових буряків $\lambda_{вк} \le 1{,}5\%$, для коренеплодів цикорію $\lambda_{вк} \le 2{,}5\%$) не вносить значних змін в теоретично-розрахункове значення $d\Pi_{ЧК}/dt$ під час стабілізованого процесу викопування коренеплодів МВК ($\vartheta_M = const$) – за збільшення $\lambda_{вк}$ в межах 0,5…2,5% (рис. 2.19) сумарна секундна подача чистих коренеплодів зменшується в межах 0,09…0,4 кг/с.




| | 1,5/1,4 | 1,5/1,6 | 1,5/1,8 | 1,5/2,0 | 2,5/1,4 | 2,5/1,6 | 2,5/1,8 | 2,5/2,0 | 3,5/1,4 | 3,5/1,6 | 3,5/1,8 | 3,5/2,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,50% | 5,64 | 6,45 | 7,25 | 8,06 | 9,4 | 10,8 | 12,1 | 13,4 | 13,1 | 15 | 17 | 18,8 |
| 1,00% | 5,61 | 6,42 | 7,22 | 8,02 | 9,36 | 10,7 | 12 | 13,4 | 13,1 | 15 | 16,8 | 18,7 |
| 1,50% | 5,59 | 6,38 | 7,18 | 7,98 | 9,31 | 10,6 | 12 | 13,3 | 13 | 14,9 | 16,8 | 18,6 |
| 2,00% | 5,56 | 6,35 | 7,14 | 7,94 | 9,26 | 10,6 | 11,9 | 13,2 | 13 | 14,8 | 16,7 | 18,5 |
| 2,50% | 5,53 | 6,32 | 7,11 | 7,9 | 9,21 | 10,5 | 11,9 | 13,2 | 12,9 | 14,7 | 16,6 | 18,4 |

Рисунок 2.19 – Діаграма зміни $d\Pi_{ЧК}/dt$ залежно від коефіцієнта втрат $\lambda_{вк}$ коренеплодів

Для подальшого аналізу необхідно визначити розрахунково-теоретичну сумарну секундну подачу домішок до робочого органу 1 (рис. 2.11, рис. 2.12) ОТТМ.

Згідно з (2.3), (2.4) сумарна секундна подача домішок $\sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{Дi}/dt$ складається з арифметичної суми сумарної секундної подачі грунтових домішок $\sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{Гi}/dt$ і сумарної секундної подачі рослинних домішок $\sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{Pi}/dt$, тобто

$$\sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{Дi}/dt = \sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{Гi}/dt + \sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{Pi}/dt, \qquad (2.25)$$

або

$$\sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\Pi_{Дi}}{dt} = \sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\Pi_{ВГi}}{dt_n} + \sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\Pi_{НГi}}{dt} + \sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\Pi_{ВГi}}{dt} + \sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\Pi_{ЗГi}}{dt}. \qquad (2.26)$$

Згідно з рис. 2.15а сумарна секундна подача грунтових домішок $\sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{Гi} / dt$ буде складатися з різниці умовної секундної подачі грунту, який знаходиться в об'ємі фігури $1O21'O'2'$ (позначимо як $\sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{V_{c}i} / dt$, кг/с) і секундної подачі підземних частин 2 коренеплодів 1, які розташовані в навколоплідному (підземному) ґрунтовому середовищі (позначимо, як $\sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{V_{nk}i} / dt$, кг/с), тобто

$$\sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\Pi_{Гi}}{dt} = \sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\Pi_{V_{c}i}}{dt} - \sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\Pi_{V_{nk}i}}{dt}. \qquad (2.27)$$

За аналогією (2.23), (2.24) та симетрією об'ємів фігур (коренеплоду 1 (рис. 2.15б) та підземної частини 2) секундна подача коренеплодів, які розташовані в навколоплідному (підземному) ґрунтовому середовищі буде визначатися адекватно залежностям (2.14)-(2.18), (2.23) і (2.24) за винятком втрат підземних частин коренеплодів, тобто:

$$\frac{d\Pi_{V_{nk}}}{dt} = \frac{2\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_n^2 N_k \left( \frac{d_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_n \right); \qquad (2.28)$$

$$\frac{d\Pi_{V_{nk}}}{dt} = B_k \vartheta_M b_м N_k K_{m_n/m_K}, \qquad (2.29)$$

де $h_n$ – висота конуса підземної частини коренеплоду, м;

$d_k$ – діаметр коренеплоду на рівні поверхні грунту, 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, при цьому за результатами експериментальних досліджень маємо:

- для гібридних сортів кормових буряків $K_{m_n/m_K}$ = 0,5…0,65[258];

- для цукрових буряків $K_{m_n/m_K}$ = 0,8…0,95 [259];

- для коренеплодів цикорію $K_{m_n/m_K}$ = 0,7…0,8 [260].

Умовну секундну подачі грунту без урахування підземних частин коренеплодів, або умовну сумарну секундну подачі грунту з 1-го, 2-го,…, $N_k$-го рядка визначимо за формулою

$$\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{V_{2}i}}{dt}=\rho_{2}\sum_{i=1}^{N_k}\frac{dV_{2i}}{dt}=\rho_{2}\frac{dV_{1г}}{dt}N_k, \tag{3.30}$$

де $\rho_{2}$ – питома маса грунту, кг/м$^3$;

$V_{2i}$, $V_{1г}$ – відповідно, сумарний об’єм грунту, який викопується МВК з 1-го, 2-го,…, $N_k$-го рядка та об’єм грунту, який викопується з одного рядка коренеплодів, м$^3$.

Визначимо об’єм $V_{1г}$, який викопується МВК з одного рядка коренеплодів, тобто об’єм який знаходиться в просторі фігури $1O21'O'2'$, рис. 1.15а). Розглянемо фігуру $1O21'O'2'$ (рис. 1.15а) в аспекті того, що точки 1, *O*, 2, 1', *O*', 2' є поворотними сферичними шарнірами.

Тоді переміщенням твірних 11', *OO*' і 22' по осі *Ox* фігуру $1O21'O'2'$ (рис. 1.15а) можна привести до вигляду фігури $1O21'O'2'$ (рис. 1.15б), яка являє собою деяку частину правильного циліндра в основі якого лежить фігура $1O2$, або сектор еліпса.

Тоді, враховуючи симетрію фігур і згідно з [255] об’єм фігури $1O21'O'2'$ (рис. 1.15б), або умовну сумарну секундну подачу грунту $\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{V_{2}i}}{dt}$ можна визначити за інтегральним виразом

$$\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{V_{2}i}}{dt}=\frac{1}{t}\rho_{2}\left(\begin{array}{l}\iiint\limits_{V_{1г}}f\left(x,y,z\right)dxdydz+\\+\iiint\limits_{V_{2г}}f\left(x,y,z\right)dxdydz+,,,+\iiint\limits_{V_{N_k г}}f\left(x,y,z\right)dxdydz\end{array}\right), \tag{2.31}$$

або за умови, що $V_{1г}=V_{2г}=,...,V_{N_k г}=V_{г}=const$

$$\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{V_{2}i}}{dt}=\frac{1}{t}\rho_{2}N_k\iiint\limits_{V_{2}}f\left(x,y,z\right)dxdydz=\frac{1}{t}\rho_{2}N_k\int\limits_{a}^{b}\left(\iint\limits_{S_{2}}f\left(x,y,z\right)dydz\right)dx, \tag{2.32}$$

де $\int_a^b \left( \iint_{S_г} f(x,y,z)\,dydz \right) dx = V_г$ – об'єм грунту, який викопується МВК з одного рядка коренеплодів.

При цьому фігура $1O21'O'2'$ (рис. 1.15б) є тіло, яке обмежене деякою частиною циліндричного тіла $V_г$, а проекція деякої частини циліндричного тіла $V_г$ на площину $zOy$ ($z$, $y$), є область $S_г$, при цьому тіло $V_г$ обмежене знизу та зверху поверхнею $x = x_1(z, y)$, а $S_c = \left[ \left( x^2 / a^2 \right) + \left( y^2 / b^2 \right) \right] = 1 \le ab \arccos\left( z / a \right) - zy$ є сегментом еліпса, в якого велика вісь дорівнює $2a = D_д$, а мала вісь – $2b = D_д \sin\gamma_д$, а це тіло $V_г$ лежить між площинами $x_0 = 0$ та $x = a_ф$.

Тоді умовний об'єм грунту, який викопується МВК з одного рядка коренеплодів визначається із інтегрального виразу

$$V_г = \int_0^{a_ф} \left( \iint_{S_г} f(x,y,z)\,dydz \right) dx, \qquad (2.33)$$

де $a_ф$ – шлях, який проходить коренезбиральна машина за 1 с (м), або верхня межа інтегрування.

Тоді інтегральний вираз (2.32) можна записати у вигляді

$$\sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\Pi_{V_г i}}{dt} = \frac{1}{t} \rho_г N_k \int_0^{a_ф} \left( \iint_{S_г} f(x,y,z)\,dydz \right) dx. \qquad (2.34)$$

У результаті обчислення інтегрального виразу (2.34) (додаток Б.2.3), отримано залежність для визначення умовної сумарної секундної подачі грунту з 1-го, 2-го,…, $N_k$ -го рядка коренеплодів

$$\sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\Pi_{V_г i}}{dt} = \frac{a_ф}{t} \rho_г N_k \left[ \frac{D_д^2 \sin\gamma_д}{4} \arccos\left( 2h_д / D_д \right) - \frac{h_д D_д}{2} \right], \qquad (2.35)$$

де $D_д$ – діаметр сферичного диска, м;

$h_д$ – глибина ходу диска, м;

$\gamma_д$ – кут атаки диска, рад.

Тоді сумарна секундна подача грунтових домішок $\sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_Г / dt$ до похилого транспортера 1 (рис. 2.11, рис. 2.12) ОТТМ з $N_k$ рядків коренеплодів за час викопування $t =$ 1 с згідно з (2.27)-(2.29) і (2.35) визначається за формулами:

$$\frac{d\Pi_Г}{dt} = \frac{a_\vartheta}{t}\rho_г N_k\left[\frac{D_\partial^2 \sin\gamma_\partial}{4}\arccos\left(2h_\partial / D_\partial\right) - \frac{h_\partial D_\partial}{2}\right] - \\ -\frac{2\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_n^2 N_k\left(\frac{d_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_n\right) \quad ; \qquad (2.36)$$

$$\frac{d\Pi_Г}{dt} = \frac{a_\vartheta}{t}\rho_г N_k\left[\frac{D_\partial^2 \sin\gamma_\partial}{4}\arccos\left(2h_\partial / D_\partial\right) - \frac{h_\partial D_\partial}{2}\right] - B_k \vartheta_M b_м N_k K_{m_п/m_К}. \qquad (2.37)$$

Для визначення сумарної секундної подачі $d\Pi_Р / dt$ рослинних домішок застосовуємо відому формулу згідно з [239], при цьому

$$\frac{d\Pi_Р}{dt} = 2\vartheta_M N_k \sin\gamma_\partial \sqrt{h_\partial\left(D_\partial - h_\partial\right)} B_г\left(\mu + \eta\right), \qquad (2.38)$$

де $B_г$ – урожайність гички, кг/м$^2$;

$\mu$ – коефіцієнт, який враховує масові втрати гички під час зрізування основного масиву гички робочими органами модуля для збирання гички;

$\eta$ – коефіцієнт, який враховує масові залишки гички на головках коренеплодів після зрізування основного масиву.

Враховуючи (2.36)-(2.38) та ввівши коефіцієнт втрат грунту та гички сумарна секундна подача домішок $d\Pi_Д / dt$ буде визначатися за залежностями:

- від розмірних параметрів коренеплодів і сферичного диска

$$\frac{d\Pi_Д}{dt} = \frac{a_\vartheta}{t}\rho_г \lambda_{вг} N_k\left[\frac{D_\partial^2 \sin\gamma_\partial}{4}\arccos\left(2h_\partial / D_\partial\right) - \frac{h_\partial D_\partial}{2}\right] - \\ -\frac{2\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_n^2 N_k\left(\frac{d_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_n\right) + \quad ; \qquad (2.39)$$

$$+2\vartheta_M \lambda_p N_k \sin\gamma_\partial \sqrt{h_\partial\left(D_\partial - h_\partial\right)} B_г\left(\mu + \eta\right)$$

- від біологічної урожайності коренеплодів і гички

$$\frac{d\Pi_{Д}}{dt}=\frac{a_{\vartheta}}{t}\rho_{г}\lambda_{вг}N_{k}\left[\frac{D_{\partial}^{2}\sin\gamma_{\partial}}{4}\arccos\left(2h_{\partial}/D_{\partial}\right)-\frac{h_{\partial}D_{\partial}}{2}\right]- \\ -B_{k}\vartheta_{M}b_{м}N_{k}K_{m_{n}/m_{K}}+2\vartheta_{M}\lambda_{p}N_{k}\sin\gamma_{\partial}\sqrt{h_{\partial}\left(D_{\partial}-h_{\partial}\right)}B_{г}\left(\mu+\eta\right), \quad (2.40)$$

де $\lambda_{вг}$ – коефіцієнт, який враховує втрати грунту;

$\lambda_{p}$ – коефіцієнт, який враховує втрати гички.

Таким чином, кінцеві математичні моделі для проведення теоретичних розрахунків прогнозованої теоретичної сумарної секундної подачі вороху до робочого органу 1 (рис. 2.11, рис. 2.12) ОТТМ згідно (2.4), (2.28), (2.29), (2.41) і (2.42) мають вигляд:

- залежно від геометричних розмірів диска та коренеплодів

$$\frac{d\Pi_{B}}{dt}=\frac{2\pi\rho_{k}}{3t}q_{k}^{(1)}h_{k}^{2}\left(1-\lambda_{вк}\right)N_{k}\left(\frac{D_{k}}{2\sin\left(0{,}5\varphi_{k}\right)}-h_{k}\right)+ \\ +\frac{a_{\vartheta}}{t}\rho_{г}\lambda_{вг}N_{k}\left[\frac{D_{\partial}^{2}\sin\gamma_{\partial}}{4}\arccos\left(2h_{\partial}/D_{\partial}\right)-\frac{h_{\partial}D_{\partial}}{2}\right]- \\ -\frac{2\pi\rho_{k}}{3t}q_{k}^{(1)}h_{n}^{2}N_{k}\left(\frac{d_{k}}{2\sin\left(0{,}5\varphi_{k}\right)}-h_{n}\right)+2\frac{da_{\vartheta}}{dt}\lambda_{p}N_{k}\sin\gamma_{\partial}\sqrt{h_{\partial}\left(D_{\partial}-h_{\partial}\right)}B_{г}\left(\mu+\eta\right); \quad (2.41)$$

- залежно від біологічної урожайності коренеплодів і гички

$$\frac{d\Pi_{B}}{dt}=B_{k}\frac{da_{\vartheta}}{dt}b_{м}\left(1-\lambda_{вк}\right)N_{k}+\frac{a_{\vartheta}}{t}\rho_{г}\lambda_{вг}N_{k}\left[\frac{D_{\partial}^{2}\sin\gamma_{\partial}}{4}\arccos\left(2h_{\partial}/D_{\partial}\right)-\frac{h_{\partial}D_{\partial}}{2}\right]- \\ -B_{k}\frac{da_{\vartheta}}{dt}b_{м}N_{k}K_{m_{n}/m_{K}}+2\frac{da_{\vartheta}}{dt}\lambda_{p}N_{k}\sin\gamma_{\partial}\sqrt{h_{\partial}\left(D_{\partial}-h_{\partial}\right)}B_{г}\left(\mu+\eta\right). \quad (2.42)$$

Розроблені математичні моделі (2.41) і (2.42) сумарної секундної подачі вороху є початковими вихідними умовами для подальшої теоретичної оптимізації конструктивно-кінематичних параметрів робочих органів ОТТМ, наприклад, на основі аналізу необхідної розрахункової продуктивності робочих органів ОТТМ тощо.

При цьому моделі (2.41) і (2.42) матимуть фізичний зміст, або будуть адекватними за накладеної умови: секундна подача $d\Pi_{V_{nk}} / dt$ підземних частин коренеплодів має бути завжди менше секундної подачі $d\Pi_Д / dt$ домішок, тобто $d\Pi_{V_{nk}} / dt < d\Pi_Д / dt$. Інакше значення секундної подачі $d\Pi_B / dt$ вороху матимуть від'ємний характер.

За математичними моделями (2.39) і (2.40) побудовано графічні залежності зміни секундної подачі $d\Pi_Д / dt$ домішок як функція: $d\Pi_Д / dt = f_П(D_o, h_o)$, рис. 2.18; $d\Pi_Д / dt = f_П(B_k, B_г)$, рис. 2.19.

При цьому: $t$ = 1 с; $\rho_г$ = 1300 кг/м$^3$; $\rho_k$ = 550 кг/м$^3$; $q_k^{(1)}$ = 4 шт.; $\gamma_д$ = 30 град.; $h_n$ = 0,07 м; $d_k$ = 0,07 м; $\lambda_{вг}$ = 0,5; $N_k$ = 6 шт., $\varphi_k$ = 15 град., $B_г$ = 1,1 кг/м$^2$; $\lambda_p$ = 0,5; $\mu$ = 0,1; $\eta$ = 0,08.

У загальному, розрахункова теоретична секундна подача домішок до робочого органу 1 (рис. 2.11), 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, рис. 2.20;

- від 4,5 до 59,6 кг/с залежно від зміни біологічної урожайності коренеплодів і гички, рис. 2.19.

За зміни поступальної швидкості руху $da_ϑ / dt$ коренезбиральної машини від 1,6 до 2,0 м/с секундна подача домішок до робочого органу 1 (рис. 2.11), або похилого транспортера ОТТМ збільшується приблизно в 1,4…3,1 рази для обох випадків, що характерно залежностям, які наведено на рис. 2.20 та рис. 2.21.

На рис. 2.22 наведено діаграму секундних подач коренеплодів і домішок для двох випадків:

- залежно від розмірів коренеплодів і геометричних параметрів сферичного диска, рис. 2.22а;

- залежно від біологічної урожайності коренеплодів і гички, рис. 2.22б.

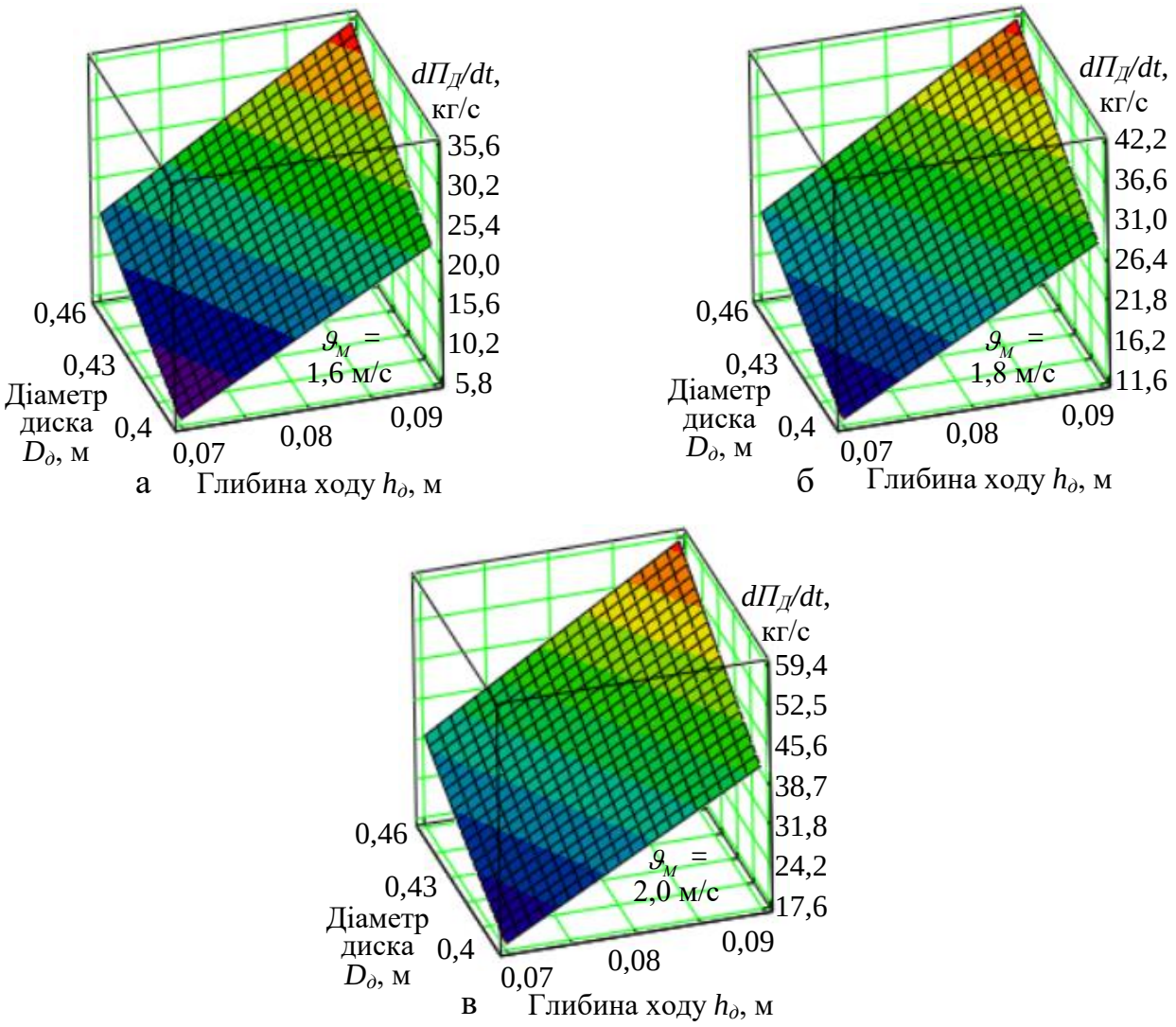



Рисунок 2.20 – Залежність зміни секундної подачі домішок як функція $d\Pi_Д / dt = f_П(D_д, h_д)$

На основі проведеного графічного аналізу рис. 2.22 встановлено, що відношення секундної подачі коренеплодів і секундної подачі домішок до робочого органу 1 (рис. 2.11), або похилого транспортера ОТТМ знаходиться в середньому співвідношенні 1 : 3, або в середньому відсотковому співвідношенні 30 % : 70 %.

Таким чином, можна констатувати, що загальна секундна подача $\sum_{i=1}^{2} d\Pi_{вi} / dt$ компонентів вороху (коренеплодів і домішок) до похилого транспортера 1 (рис. 2.11) ОТТМ буде знаходитися в середніх межах від 50 до 80 кг/с залежно від зміни основних впливів:

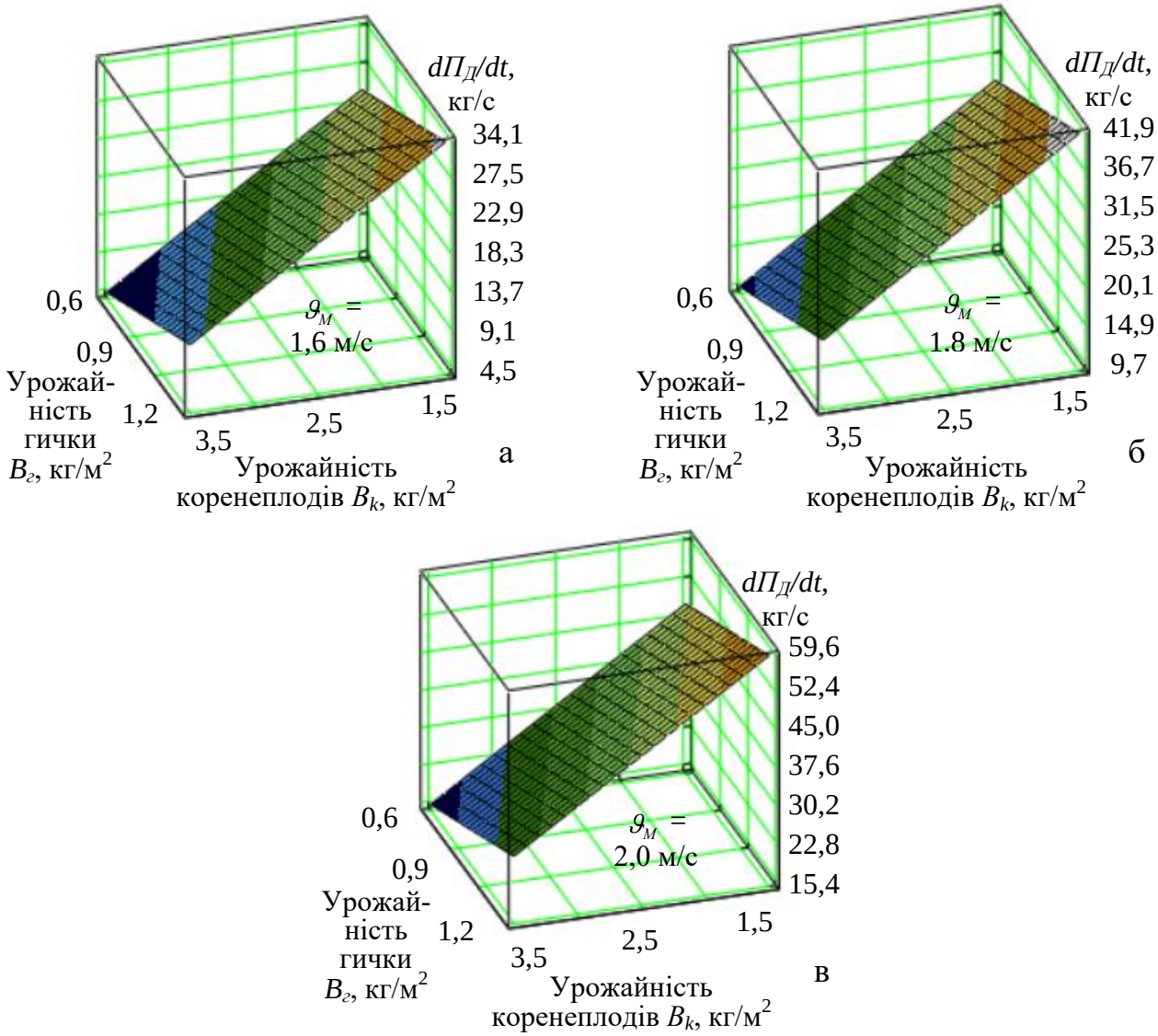



Рисунок 2.21 – Залежність зміни секундної подачі домішок як функція $dП_Д / dt = f_П(B_k, B_г)$

- кількості рядків коренеплодів, які викопуються робочими органами МВК відповідної конструкції;

- геометричних розмірів робочого органу, який викопує крупні коренеплоди, або в нашому випадку від геометричних розмірів сферичного диска;

- глибини ходу робочого органу, який викопує крупні коренеплоди

- сорту та розмірних параметрів насаджень коренеплодів (урожайності коренеплодів);

- швидкості руху коренезбиральної машини.

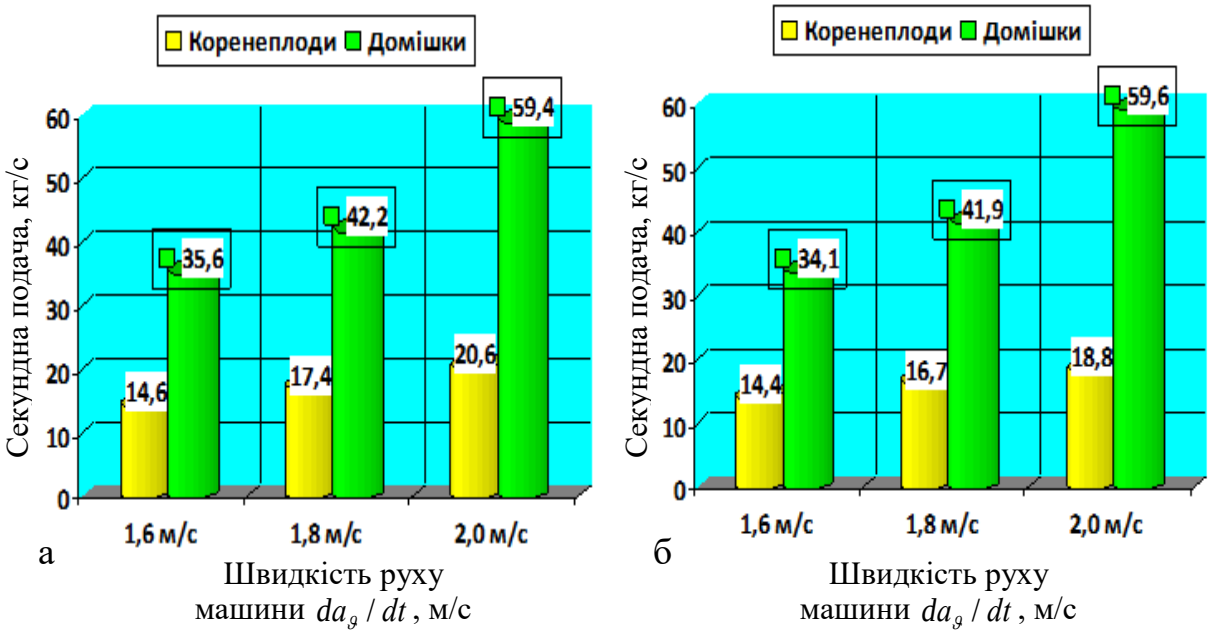



Рисунок 2.22 – Діаграма секундної подачі чистих коренеплодів і домішок: а – коренеплодів залежно від розмірів коренеплодів; домішок залежно від розмірів коренеплодів і геометричних параметрів сферичного диска; б – коренеплодів залежно від біологічної урожайності коренеплодів; домішок залежно від біологічної урожайності коренеплодів і гички

При цьому, початкова умова оптимізації раціонального процесу функціонування ОТТМ загалом, яку буде розглянуто в подальших викладеннях, має вигляд:

$$\sum_{i=1}^{2} d\Pi_{Bi} / dt \le dW_Z / dt_z \le ... \le dW_i / dt_i, \qquad (2.43)$$

де $\sum_{i=1}^{2} d\Pi_{Bi} / dt$ – секундна подача викопаного вороху (коренеплодів і домішок) робочими органами відповідної конструкції МВК коренезбиральної машини, кг/с.

$dW_Z / dt_z$ – пропускна секундна здатність або продуктивність похилого транспортера, кг/с.

$dW_i / dt_i$ – пропускна секундна здатність або продуктивність наступних робочих органів ОТТМ, кг/с.

## 2.4. Висновки до розділу

За результатами проведених досліджень необхідно зазначити:

2.4.1. Розробка та оптимізація параметрів нових робочих органів і машин загалом вимагає поетапного аналізу та узагальнення існуючих технологій, способів збирання коренеплодів, конструктивних особливостей сучасних технічних засобів і робочих органів, виявлення їх переваг та недоліків, розроблення теорії технологічного процесу роботи, вироблення критеріїв оптимізації параметрів, пошуку нових інженерних методів розрахунку.

2.4.2. Для опису процесів функціонування технічних систем, як правило у більшості випадків застосовують методи розроблення та одночасного поєднання емпіричних і аналітичних математичних моделей, або методи емпіричного та аналітичного моделювання.

2.4.3. На основі аналізу наукових досліджень з методології розроблення математичних моделей можна констатувати, що приймаючи до уваги значні наукові здобутки та обсяги відомих методів і принципів побудови конструктивно-технологічних схем і математичних моделей, є певні обмеження та наслідкові причини їх застосування для оптимізації процесів і параметрів робочих органів для задовільного відокремлення домішок від коренеплодів у важких умовах роботи коренезбиральних машин.

2.4.4. Підвищення технологічної ефективності роботи коренезбиральних машин досягається за рахунок додаткової інтенсифікацій процесів очищення коренеплодів від домішок шляхом конструктивної розроблення та оптимізації параметрів робочих органів комбінованих очисних систем.

2.4.5. Для реалізації процесу інтенсифікації відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів складною динамічно-технічною системою нами на рівні винаходів запропоновано структурну схему ОТТМ коренезбиральних машин, яка поєднує в собі послідовність конструктивного розміщення $N$-х робочих очисних органів і послідовність виконання технологічних постадійних $n$-х операцій процесу відокремлення домішок від коренеплодів у важких умовах роботи коренезбиральних машин.

2.4.6. В основу розроблення покладено метод і принцип моделювання на основі динамічного програмування Беллмана з застосуванням багатостадійної оптимізації за методом академіка Л. Погорілого з доповненням етапу транспортного запізнення переміщення вороху.

2.4.7. Встановлено, що сумарна секундна подача чистих коренеплодів $dП_{ЧК} / dt$ до похилого транспортера ОТТМ з 6 рядків знаходиться в межах від мінімального значення 2,5 кг/с до максимального значення 20,6 кг/с залежно від меж зміни геометричних параметрів коренеплодів, урожайності коренеплодів $B_k$ і швидкості руху $\vartheta_M$ коренезбиральної машини за зміни коефіцієнта втрат коренеплодів $\lambda_{вк}$ від 0,5 до 2,5%.

2.4.8. У загальному, розрахункова теоретична секундна подача домішок до 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.

2.4.9. За зміни поступальної швидкості руху $da_\vartheta / dt$ коренезбиральної машини від 1,6 до 2,0 м/с секундна подача домішок до похилого транспортера ОТТМ збільшується приблизно в 1,4…3,1 рази для обох випадків.

2.4.10. Встановлено, що відношення секундної подачі коренеплодів і секундної подачі домішок до похилого транспортера ОТТМ знаходиться в середньому співвідношенні 1 : 3, або в середньому відсотковому співвідношенні 30 % : 70 %.

Основні наукові результати розділу опубліковано в наукових працях [47, 49, 50, 61, 79, 147, 207, 211, 212, 222, 224-226, 229–251, 252, 254].

# РОЗДІЛ 3
# ТЕОРЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ ОЧИСНИХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОДУЛІВ КОРЕНЕЗБИРАЛЬНИХ МАШИН

## 3.1. Математична модель функціонального процесу поетапного відокремлення домішок робочими органами ОТТМ

Принципи моделювання технологічних процесів і якості роботи ОТТМ у першу чергу регламентуються та в значній мірі залежать від технологічної подачі складових компонентів викопаного вороху до його робочих органів.

При цьому технологічна подача складових компонентів викопаного вороху є функціонально-залежною від багатьох керовано-регульованих і неконтрольованих (некерованих) вхідних факторів чорної скрині: агробіологічних і фізико-механічних характеристик й властивостей коренеплодів і навколоплідного грунтового середовища; типу та конструкції копачів; конструктивного-технологічного виконання та умов роботи коренезбиральної машини [247-249, 258, 260-264].

Складовими компонентами технологічної подачі викопаного вороху, є технологічна подача до робочих органів ОТТМ викопаних коренеплодів і домішок. Домішки, які викопуються та надходять разом з коренеплодами до ОТТМ, є багатокомпонентними – грунтові домішки та рослинні домішки.

При цьому як і грунтові, так і домішки рослинного походження відносно «чистих» коренеплодів знаходяться у вільному та позв’язаному станах: вільний і налиплий на коренеплодах грунт («зв’язаний» грунт); втрачена гичка після зрізування основного масиву гички з головок коренеплодів і залишки гички на головках коренеплодів (зв’язана гичка).

Існуючі аналітичні математично-технологічні моделі, які описують і характеризують функціональну залежність процесів відокремлення домішок як грунтових, так і рослинних, є одноетапними або узагальнюючими.

При цьому на їх основі функціональний процес відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів розглядається з певної позиції одночасного та одноразового перетікання процесу очищення на всьому шляху переміщення коренеплодів і структурних компонентів домішок робочими поверхнями очисних транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин [6, 52, 55, 61, 79, 118, 177, 183, 184, 265, 266].

Це значно звужує можливості розширеного математичного опису процесу відокремлення домішок від коренеплодів і не дозволяє більш точно з технологічної позиції описати закономірності існуючого реального процесу очищення вороху коренеплодів.

На основі візуалізації процесу можна впевнено стверджувати, що відокремлення домішок від коренеплодів фактично або в реальному часі відбувається на кожному послідовно-умовному відрізку, або певній умовній ділянці за час переміщення вороху очисними поверхнями кожної ділянки та за загальний час переміщення вороху по всій довжині очисної поверхні кожного робочого органа й очисної системи загалом.

За основу для розроблення аналітичної математичної моделі поетапного відокремлення домішок від коренеплодів приймаємо технічно-технологічну динамічну очисну систему, яку реалізовано у вигляді ОТТМ, при цьому ОТТМ технологічно поєднує в собі конструктивні схеми очисних комбінованих робочих органів, які в основному застосовуються для відокремлення домішок від коренеплодів у сучасних самохідних коренезбиральних машинах.

Нехай необхідно розглянути процес очищення складових компонентів вороху, або процес відокремлення *i*-их компонентів домішок від коренеплодів, який надходить на поверхні робочих органів ОТТМ, узагальнена схема якого наведена на рис. 3.1 [49].

При цьому необхідно розробити математичну модель, яка описує поетапний процес відокремлення домішок від коренеплодів окремим *j*-м робочим органом та математичну модель процесу очищення коренеплодів від домішок ОТТМ загалом.

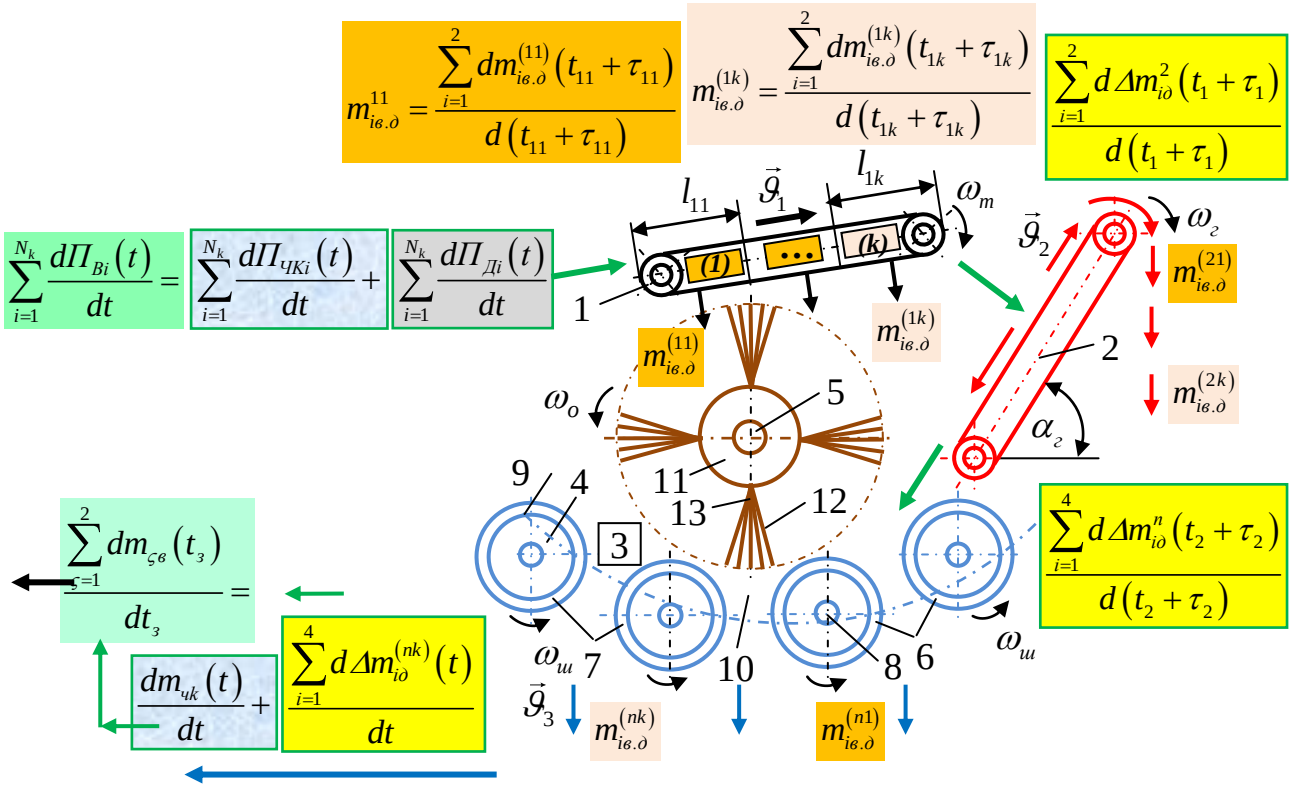



Рисунок 3.1 – Схема моделі для розрахунку поетапного відокремлення домішок від коренеплодів робочими органами ОТТМ: 1 – похилий транспортер; 2 – очисна гірка; 3 – комбінований робочий орган; 4 – очисні шнеки; 5 – очисний вал; 6, 7 – відповідно, права та ліва система; 8 – вал шнека; 9 – нижня вітка еліпса; 10 – жолоб робочого русла; 11 – барабан; 12 – пружні очисні елементи; 13– пучки ворсу

Умовно вважаємо, що ОТТМ складається з $j$ = 1, 2,…,$n$ 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 на ОТТМ, який має $j$-і робочі органи (рис. 3.1) та на яких відбувається очищення коренеплодів від домішок, із робочих органів МВК надходить загальна масова кількість структурно-складових компонентів вороху $\sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{Bi}(t)/dt$. Згідно з п. 2.3 другого розділу складовими компонентами вороху є коренеплоди й грунтові та рослинні домішки. Крім того, домішки перебувають відносно коренеплодів у вільному та пов’язаному станах.

При цьому, згідно з (2.3)-(2.5) можна записати

$$\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iв}(t)}{dt}=\frac{dm_{к}(t)}{dt}+\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iд}(t)}{dt}=\frac{dm_{к}(t)}{dt}+\frac{dm_{вд}(t)}{dt}+\frac{dm_{зд}(t)}{dt}, \qquad (3.1)$$

де $m_{iд}$, $m_{к}$, $m_{вд}$, $m_{зд}$ – відповідно, загальна маса домішок, маса коренеплодів, вільних і зв'язаних домішок, які надходять на ОТТМ, кг.

Для розроблення поетапної математичної моделі умовно поділимо загальну довжину очисної поверхні кожного *j*-го робочого органа ОТТМ на $q$ = 1, 2,…, $k$ ділянок (рис. 3.1), де відбувається процес відокремлення домішок від коренеплодів.

Приймаємо припущення, що маса «відносно чистих» коренеплодів (відповідно, очищених від деякої частини налиплого грунту) після їх проходження на всіх *q*-х ділянках кожного *j*-го робочого органа залишається постійною, або вхідна масова кількість коренеплодів $\frac{dm_{k}(t)}{dt}$ дорівнює вихідні масовій кількості коренеплодів після процесу їх очищення ОТТМ загалом, тобто $\frac{dm_{к}(t)}{dt}=\frac{dm_{k}^{(nk)}(t_{nk})}{dt_{nk}}=const$, або у процесі очищення втрати коренеплодів на робочих органах ОТТМ відсутні.

Також для подальшого аналізу функціонального процесу відокремлення структурних компонентів домішок згідно з [1, 267] введемо поняття «транспортного запізнення» часу $t+\tau$ пересування домішок очисними поверхнями робочих органів ОТТМ, де $\tau$ – час запізнення руху домішок.

Тоді рівняння (3.1) можна записати у вигляді

$$\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iд}(t+\tau)}{d(t+\tau)}=\frac{dm_{вд}(t+\tau)}{d(t+\tau)}+\frac{dm_{зд}(t+\tau)}{d(t+\tau)}. \qquad (3.2)$$

Також приймаємо, що під час переміщення структурних компонентів домішок в ОТТМ, процес очищення коренеплодів від домішок відбувається кожним окремим *n*-м робочим органом.

При цьому за конструктивними ознаками кожного окремого *j*-го робочого органа ОТТМ, відокремлення вільних компонентів домішок (вільного ґрунту та вільних рослинних решток – бур'янів і втраченої гички під час її збирання) відбувається шляхом їх просіювання (сепарації) через:

- зазори між прутками похилого транспортера 1 (рис. 3.1);

- винесення вільних домішок робочою гілкою очисної гірки 2;

- просіювання вільного грунту та вільних рослинних домішок у зазори між шнеками 4 правої 6 та лівої 7 системи у жолобі 10 робочого русла комбінованого робочого органа 3.

Відокремлення зв'язаних домішок відбувається шляхом зскрібання налиплого грунту з поверхні тіла коренеплоду та залишків гички з головок коренеплодів витками шнека 4 й пружними очисними елементами 12, які утворюють пучки ворсу 13, що закріплені на барабані 11 очисного вала 5.

Позначимо загальну масову кількість відокремлених домішок як грунтового, так і рослинного походження одним окремим *j*-м робочим органом ОТТМ через $\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{ів.д}^{(j)}\left(t_j+\tau_j\right)}{d\left(t_j+\tau_j\right)}$, де $j$ = 1, 2,…,$n$; $t_j+\tau_j$ – загальний час знаходження компонентів вороху на окремому *j*-му робочому органі ОТТМ, або час реалізації процесу відокремлення домішок від коренеплодів, с.

Тут верхній у дужках індекс (*j*) відповідає позначенню номера конкретного робочого органу від 1 до *n*, на якому безпосередньо відбувається процес очищення коренеплодів від домішок.

Тоді

$$\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{ів.д}^{(j)}\left(t_j+\tau_j\right)}{d\left(t_j+\tau_j\right)}=\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{ів.г}^{(j)}\left(t_j+\tau_j\right)}{d\left(t_j+\tau_j\right)}+\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{ів.р}^{(j)}\left(t_j+\tau_j\right)}{d\left(t_j+\tau_j\right)}, \qquad (3.3)$$

де $m_{ів.г}^{(j)}$ – загальна маса відокремлених грунтових домішок *j*-ми робочими органами ОТТМ, кг.

$m_{ів.р}^{(j)}$ – загальна маса відокремлених рослинних домішок *j*-ми робочими органами ОТТМ, кг.

З урахуванням (3.2) можна записати, що

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{ів.д}^{(1)}(t_1+\tau_1)}{d(t_1+\tau_1)}=\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{в.г}^{(1)}(t_1+\tau_1)}{d(t_1+\tau_1)}+\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{в.р}^{(1)}(t_1+\tau_1)}{d(t_1+\tau_1)}= \\ =\frac{dm_{в.вг}^{(1)}(t_1+\tau_1)}{d(t_1+\tau_1)}+\frac{dm_{в.вр}^{(1)}(t_1+\tau_1)}{d(t_1+\tau_1)}+\frac{dm_{в.нг}^{(1)}(t_1+\tau_1)}{d(t_1+\tau_1)}+\frac{dm_{в.зг}^{(1)}(t_1+\tau_1)}{d(t_1+\tau_1)}; \\ \sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{ів.д}^{(2)}(t_2+\tau_2)}{d(t_2+\tau_2)}=\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{в.г}^{(2)}(t_2+\tau_2)}{d(t_2+\tau_2)}+\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{в.р}^{(2)}(t_2+\tau_2)}{d(t_2+\tau_2)}= \\ =\frac{dm_{в.вг}^{(2)}(t_2+\tau_2)}{d(t_2+\tau_2)}+\frac{dm_{вр}^{(2)}(t_2+\tau_2)}{d(t_2+\tau_2)}+\frac{dm_{2нг}(t_2+\tau_2)}{d(t_2+\tau_2)}+\frac{dm_{в.зг}^{(2)}(t_2+\tau_2)}{d(t_2+\tau_2)}; \\ .....; \\ \sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{ів.д}^{(n)}(t_n+\tau_n)}{d(t_n+\tau_n)}=\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{в.г}^{(n)}(t_n+\tau_n)}{d(t_n+\tau_n)}+\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{в.р}^{(n)}(t_n+\tau_n)}{d(t_n+\tau_n)}= \\ =\frac{dm_{в.вг}^{(n)}(t_n+\tau_n)}{d(t_n+\tau_n)}+\frac{dm_{в.вр}^{(n)}(t_n+\tau_n)}{d(t_n+\tau_n)}+\frac{dm_{в.нг}^{(n)}(t_n+\tau_n)}{d(t_n+\tau_n)}+\frac{dm_{в.зг}^{(n)}(t_n+\tau_n)}{d(t_n+\tau_n)}, \end{cases} \quad (3.4)$$

де $m_{в.г}^{(1)},m_{в.г}^{(2)},...,m_{в.г}^{(n)}$, $m_{в.р}^{(1)},m_{в.р}^{(2)},...,m_{в.р}^{(n)}$ – відповідно, загальна маса відокремлених грунтових і рослинних домішок 1, 2,…, *n*-м робочим органом ОТТМ за певний проміжок часу, кг;

$m_{в.вг}^{(1)},m_{в.вг}^{(2)},...,m_{в.вг}^{(n)}$, $m_{в.вр}^{(1)},m_{в.вр}^{(2)},...,m_{в.вр}^{(n)}$ – відповідно, маса відокремлених вільних грунтових і вільних рослинних домішок 1, 2,…, *n*-м робочим органом ОТТМ за певний проміжок часу, кг;

$m_{в.нг}^{(1)},m_{в.нг}^{(2)},...,m_{в.нг}^{(n)}$, $m_{зг}^{(1)},m_{зг}^{(2)},...,m_{зг}^{(n)}$ – відповідно, маса відокремленого налиплого грунту на коренеплодах і залишків гички на головках коренеплодів 1, 2,…, *n*-м робочим органом ОТТМ за певний проміжок часу, кг;

$(t_1+\tau_1),(t_2+\tau_2),...,(t_n+\tau_n)$ – загальний час знаходження компонентів вороху на 1, 2,…, *n*-му робочому органі ОТТМ, с.

На першому етапі розглянемо процес відокремлення структурних компонентів домішок на першій *(1)* (рис. 3.1) ділянці очищення коренеплодів похилим транспортером 1 ОТТМ.

При цьому на кожній $q$-й ділянці похилого транспортера 1 ОТТМ за рахунок просіювання домішок через зазори між прутками відокремлюються тільки два компоненти вільних домішок (вільний грунт і вільні рослинні домішки) загальною масовою кількістю, яку позначимо через $m_{в.д}^{(1q)} = \sum_{i=1}^{2} \frac{dm_{ів.д}^{(1q)}\left(t_{1q}+\tau_{1q}\right)}{d\left(t_{1q}+\tau_{1q}\right)}$, де $q$ = 1, 2,…,$k$.

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 (3.4) буде становити

$$\sum_{i=1}^{2} \frac{dm_{ів.д}^{(1)}\left(t_1+\tau_1\right)}{d\left(t_1+\tau_1\right)} = \frac{dm_{в.вг}^{(11)}\left(t_{11}+\tau_{11}\right)}{d\left(t_{11}+\tau_{11}\right)} + \frac{dm_{в.вг}^{(12)}\left(t_{12}-\tau_{12}\right)}{d\left(t_{12}-\tau_{12}\right)} + ,...,+ \frac{dm_{в.вг}^{(1k)}\left(t_{1k}+\tau_{1k}\right)}{d\left(t_{1k}+\tau_{1k}\right)} + \\ + \frac{dm_{в.вр}^{(11)}\left(t_{11}+\tau_{11}\right)}{d\left(t_{11}+\tau_{11}\right)} + \frac{dm_{в.вр}^{(12)}\left(t_{12}+\tau_{12}\right)}{d\left(t_{12}+\tau_{12}\right)} + ,...,+ \frac{dm_{в.вр}^{(1k)}\left(t_{1k}+\tau_{1k}\right)}{d\left(t_{1k}+\tau_{1k}\right)} . \quad (3.5)$$

З урахуванням прийнятих припущень загальна масова кількість структурних компонентів домішок, яка надходить на першу (*1*) ділянку похилого транспортера 1 (рис. 3.1), яку позначимо через $\sum_{i=1}^{2} \frac{dm_{iд}^{(1)}\left(t+\tau\right)}{d\left(t+\tau\right)}$ дорівнює загальній масовій кількості складових компонентів домішок $\sum_{i=1}^{2} \frac{dm_{iд}\left(t+\tau\right)}{d\left(t+\tau\right)}$, які надходять на ОТТМ, тобто

$$\sum_{i=1}^{2} \frac{dm_{iд}^{(1)}\left(t+\tau\right)}{d\left(t+\tau\right)} = \sum_{i=1}^{2} \frac{dm_{iд}\left(t+\tau\right)}{d\left(t+\tau\right)} . \quad (3.6)$$

Тоді загальна масова кількість структурних компонентів домішок, які надходять, наприклад, на робочу поверхню першої ($1_2$) ділянки очисної гірки 2 (рис. 3.1), яку позначимо через $\sum_{i=1}^{2} \frac{dm_{iд}^{(2)}\left(t_1+\tau_1\right)}{d\left(t_1+\tau_1\right)}$ дорівнює різниці загальної масової кількості структурних компонентів домішок $\sum_{i=1}^{2} \frac{dm_{iд}^{(1)}\left(t+\tau\right)}{d\left(t+\tau\right)}$ і

$\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iв.д}^{(1)}(t_1+\tau_1)}{d(t_1+\tau_1)}$, яка відповідно, надходить на похилий транспортер і яка відокремилася від коренеплодів кожною $q$-ю ділянкою похилого транспортера ОТТМ, яку позначимо через $\sum_{i=1}^{2}\frac{d\Delta m_{iд}^{(2)}(t_1+\tau_1)}{d(t_1+\tau_1)}$, тобто

$$\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iд}^{(2)}(t_1+\tau_1)}{d(t_1+\tau_1)}=\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iд}^{(1)}(t+\tau)}{d(t+\tau)}-\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iв.д}^{(1)}(t_1+\tau_1)}{d(t_1+\tau_1)}=\sum_{i=1}^{2}\frac{d\Delta m_{iд}^{(2)}(t_1+\tau_1)}{d(t_1+\tau_1)}. \quad (3.7)$$

Відповідно, за аналогією (3.5) і (3.7) можна записати, що:

- загальна кількість відокремлених структурних компонентів вільних домішок очисною гіркою 2 (рис. 3.1), які відокремлюються кожною $q$-ю ділянкою очисної гірки із урахуванням другого рівняння (3) буде становити

$$\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iв.д}^{(2)}(t_2+\tau_2)}{d(t_2+\tau_2)}=\frac{dm_{в.вг}^{(21)}(t_{21}+\tau_{21})}{d(t_{21}+\tau_{21})}+\frac{dm_{в.вг}^{(22)}(t_{22}+\tau_{22})}{d(t_{22}+\tau_{22})}+,...,+\frac{dm_{в.вг}^{(2k)}(t_{2k}+\tau_{2k})}{d(t_{2k}+\tau_{2k})}+$$
$$+\frac{dm_{в.вр}^{(21)}(t_{21}+\tau_{21})}{d(t_{21}+\tau_{21})}+\frac{dm_{в.вр}^{(22)}(t_{22}+\tau_{22})}{d(t_{22}+\tau_{22})}+,...,+\frac{dm_{в.вр}^{(2k)}(t_{2k}+\tau_{2k})}{d(t_{2k}+\tau_{2k})}; \quad (3.8)$$

- загальна масова кількість структурних компонентів домішок, яка надходить наприклад, на першу ($1_3$) ділянку правої 6 та лівої 7 системи шнеків буде становити

$$\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iд}^{(n)}(t_{n-1}+\tau_{n-1})}{d(t_{n-1}+\tau_{n-1})}=\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iд}^{(2)}(t_1+\tau_1)}{d(t_1+\tau_1)}-\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iв.д}^{(2)}(t_2+\tau_2)}{d(t_2+\tau_2)}-$$
$$-,...,-\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iв.д}^{(2)}(t_{n-1}+\tau_{n-1})}{d(t_{n-1}+\tau_{n-1})}=\sum_{i=1}^{2}\frac{d\Delta m_{iд}^{(n)}(t_{n-1}+\tau_{n-1})}{d(t_{n-1}+\tau_{n-1})}; \quad (3.9)$$

- загальна кількість відокремлених структурних компонентів вільних і зв'язаних домішок системами шнеків і пружними очисними елементами 12 очисного вала 5, які відокремлюються кожною $q$-ю ділянкою правої 6 та лівої 7 системи шнеків 4 комбінованого очисника 3 із урахуванням $n$-го рівняння (3.4), буде становити:

$$\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{i\text{в.д}}^{(n)}\left(t_n+\tau_n\right)}{d\left(t_n+\tau_n\right)}=\frac{dm_{\text{в.вг}}^{(n1)}\left(t_{n1}+\tau_{n1}\right)}{d\left(t_{n1}+\tau_{n1}\right)}+\frac{dm_{\text{в.вг}}^{(n2)}\left(t_{n2}+\tau_{n2}\right)}{d\left(t_{n2}+\tau_{n2}\right)}+,...,+\frac{dm_{\text{в.вг}}^{(nk)}\left(t_{nk}+\tau_{nk}\right)}{d\left(t_{nk}+\tau_{nk}\right)}+\frac{dm_{\text{в.вр}}^{(n1)}\left(t_{n1}+\tau_{n1}\right)}{d\left(t_{n1}+\tau_{n1}\right)}+$$
$$+\frac{dm_{\text{в.вр}}^{(n2)}\left(t_{n2}+\tau_{n2}\right)}{d\left(t_{n2}+\tau_{n2}\right)}+,...,+\frac{dm_{\text{в.вр}}^{(nk)}\left(t_{nk}+\tau_{nk}\right)}{d\left(t_{nk}+\tau_{nk}\right)}+\frac{dm_{\text{в.нг}}^{(n1)}\left(t_{n1}+\tau_{n1}\right)}{d\left(t_{n1}+\tau_{n1}\right)}+\frac{dm_{\text{в.нг}}^{(n2)}\left(t_{n2}+\tau_{n2}\right)}{d\left(t_{n2}+\tau_{n2}\right)}+ \quad . (3.10)$$
$$+,...,+\frac{dm_{\text{в.нг}}^{(nk)}\left(t_{nk}+\tau_{nk}\right)}{d\left(t_{nk}+\tau_{nk}\right)}+\frac{dm_{\text{в.зг}}^{(n1)}\left(t_{n1}+\tau_{n1}\right)}{d\left(t_{n1}+\tau_{n1}\right)}+\frac{dm_{\text{в.зг}}^{(n2)}\left(t_{n2}+\tau_{n2}\right)}{d\left(t_{n2}+\tau_{n2}\right)}+,...,+\frac{dm_{\text{в.зг}}^{(nk)}\left(t_{nk}+\tau_{nk}\right)}{d\left(t_{nk}+\tau_{nk}\right)}$$

Таким чином маємо:

- загальна масова кількість відокремлених структурних компонентів домішок, які відокремилися кожною *q*-ю ділянкою кожного *j*-го робочого органа ОТТМ за сумарний час $t_з=\left(t_1+\tau_1\right)+\left(t_2+\tau_2\right)+,...,+\left(t_n+\tau_n\right)$ знаходження складових компонентів домішок на робочих органах ОТТМ (час очищення вороху від домішок) буде дорівнювати сумі відокремлених складових компонентів домішок кожним *j*-м робочим органом ОТТМ та згідно із (3.5), (3.7) і (3.9) буде визначатися за формулою

$$\sum_{i=1}^{n}\frac{dm_{i\text{в.д}}^{(n)}\left(t_з\right)}{dt_з}=\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{i\text{в.д}}^{(1)}\left(t_1+\tau_1\right)}{d\left(t_1+\tau_1\right)}+\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{i\text{в.д}}^{(2)}\left(t_2+\tau_2\right)}{d\left(t_2+\tau_2\right)}+,...,+\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{i\text{в.д}}^{(n)}\left(t_n+\tau_n\right)}{d\left(t_n+\tau_n\right)}; \quad (3.11)$$

- підставивши значення із (3.5), (3.8) і (3.10) у рівняння (3.11), отримаємо

$$\sum_{i=1}^{n}\frac{dm_{i\text{в.д}}^{(n)}\left(t_з\right)}{dt_з}=\frac{dm_{\text{в.вг}}^{(11)}\left(t_{11}+\tau_{11}\right)}{d\left(t_{11}+\tau_{11}\right)}+\frac{dm_{\text{в.вг}}^{(12)}\left(t_{12}+\tau_{12}\right)}{d\left(t_{12}+\tau_{12}\right)}+,...,+\frac{dm_{\text{в.вг}}^{(1k)}\left(t_{1k}+\tau_{1k}\right)}{d\left(t_{1k}+\tau_{1k}\right)}+\frac{dm_{\text{в.вр}}^{(11)}\left(t_{11}+\tau_{11}\right)}{d\left(t_{11}+\tau_{11}\right)}+$$
$$+\frac{dm_{\text{в.вр}}^{(12)}\left(t_{12}+\tau_{12}\right)}{d\left(t_{12}+\tau_{12}\right)}+,...,+\frac{dm_{\text{в.вр}}^{(1k)}\left(t_{1k}+\tau_{1k}\right)}{d\left(t_{1k}+\tau_{1k}\right)}+\frac{dm_{\text{в.вг}}^{(21)}\left(t_{21}+\tau_{21}\right)}{d\left(t_{21}+\tau_{21}\right)}+\frac{dm_{\text{в.вг}}^{(22)}\left(t_{22}+\tau_{22}\right)}{d\left(t_{22}+\tau_{22}\right)}+$$
$$+,...,+\frac{dm_{\text{в.вг}}^{(2k)}\left(t_{2k}+\tau_{2k}\right)}{d\left(t_{2k}+\tau_{2k}\right)}+\frac{dm_{\text{в.вр}}^{(21)}\left(t_{21}+\tau_{21}\right)}{d\left(t_{21}+\tau_{21}\right)}+\frac{dm_{\text{в.вр}}^{(22)}\left(t_{22}+\tau_{22}\right)}{d\left(t_{22}+\tau_{22}\right)}+,...,+\frac{dm_{\text{в.вр}}^{(2k)}\left(t_{2k}+\tau_{2k}\right)}{d\left(t_{2k}+\tau_{2k}\right)}+$$
$$+\frac{dm_{\text{в.вг}}^{(n1)}\left(t_{n1}+\tau_{n1}\right)}{d\left(t_{n1}+\tau_{n1}\right)}+\frac{dm_{\text{в.вг}}^{(n2)}\left(t_{n2}+\tau_{n2}\right)}{d\left(t_{n2}+\tau_{n2}\right)}+,...,+\frac{dm_{\text{в.вг}}^{(nk)}\left(t_{nk}+\tau_{nk}\right)}{d\left(t_{nk}+\tau_{nk}\right)}+\frac{dm_{\text{в.вр}}^{(n1)}\left(t_{n1}+\tau_{n1}\right)}{d\left(t_{n1}+\tau_{n1}\right)}+$$
$$+\frac{dm_{\text{в.вр}}^{(n2)}\left(t_{n2}+\tau_{n2}\right)}{d\left(t_{n2}+\tau_{n2}\right)}+,...,+\frac{dm_{\text{в.вр}}^{(nk)}\left(t_{nk}+\tau_{nk}\right)}{d\left(t_{nk}+\tau_{nk}\right)}+\frac{dm_{\text{в.нг}}^{(n1)}\left(t_{n1}+\tau_{n1}\right)}{d\left(t_{n1}+\tau_{n1}\right)}+\frac{dm_{\text{в.нг}}^{(n2)}\left(t_{n2}+\tau_{n2}\right)}{d\left(t_{n2}+\tau_{n2}\right)}+$$
$$+,...,+\frac{dm_{\text{в.нг}}^{(nk)}\left(t_{nk}+\tau_{nk}\right)}{d\left(t_{nk}+\tau_{nk}\right)}+\frac{dm_{\text{в.зг}}^{(n1)}\left(t_{n1}+\tau_{n1}\right)}{d\left(t_{n1}+\tau_{n1}\right)}+\frac{dm_{\text{в.зг}}^{(n2)}\left(t_{n2}+\tau_{n2}\right)}{d\left(t_{n2}+\tau_{n2}\right)}+,...,+\frac{dm_{\text{в.зг}}^{(nk)}\left(t_{nk}+\tau_{nk}\right)}{d\left(t_{nk}+\tau_{nk}\right)} \quad ; (3.12)$$

- загальна масова кількість структурних компонентів домішок, які залишилися після їх відокремлення кожною *q*-ю ділянкою кожного *j*-го робочого органа ОТТМ за загальний (сумарний) час очищення вороху від домішок $t_з$ та які будуть надходити на наступні транспортно-технологічні системи коренезбиральної машини буде дорівнювати різниці загальної масової кількості складових компонентів домішок, які надходять на ОТТМ і загальної масової кількості відокремлених складових компонентів домішок, які відокремилися кожною *q*-ю ділянкою кожного *j*-го робочого органа ОТТМ та згідно із (3.2) і (3.11) буде визначатися за формулою:

$$\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iдз}(t_з)}{dt_з}=\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iд}(t)}{dt}-\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iв.д}^{(n)}(t_з)}{dt_з}=\sum_{i=1}^{2}\frac{d\Delta m_{iд}^{(nk)}(t_n)}{dt_n}; \tag{3.13}$$

$$\begin{aligned}&\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iдз}(t_з)}{dt_з}=\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iд}(t)}{dt}-\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iв.д}^{(1)}(t_1+\tau_1)}{d(t_1+\tau_1)}+\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iв.д}^{(2)}(t_2+\tau_2)}{d(t_2+\tau_2)}+\\&+,...,+\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iв.д}^{(n)}(t_n+\tau_n)}{d(t_n+\tau_n)}=\sum_{i=1}^{2}\frac{d\Delta m_{iд}^{(nk)}(t_j+\tau_j)}{d(t_j+\tau_j)}\end{aligned}. \tag{3.14}$$

Відповідно, загальна масова кількість вороху, який буде надходити на наступні транспортно-технологічні системи коренезбиральної машини після його очищення з урахуванням (3.14) і (3.5), (3.8), (3.10) визначається за формулами [49]:

$$\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iвз}(t_з)}{t_з}=\frac{dm_к(t)}{dt}+\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iд}(t_з)}{t_з}=\frac{dm_к(t)}{dt}+\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iд}(t_з)}{t_з}-\sum_{i=1}^{2}\frac{d\Delta m_{iв}(t_з)}{t_з}; \tag{3.15}$$

$$\begin{aligned}&\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iвз}(t_з)}{t_з}=\\&=\frac{dm_к(t)}{dt}+\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iд}(t)}{dt}-\left(\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iв.д}^{(1)}(t_1+\tau_1)}{d(t_1+\tau_1)}+\sum_{i=1}^{3}\frac{dm_{iв.д}^{(2)}(t_2+\tau_2)}{d(t_2+\tau_2)}+,...,+\sum_{i=1}^{4}\frac{dm_{iв.д}^{(n)}(t_n+\tau_n)}{d(t_n+\tau_n)}\right)\end{aligned}. \tag{3.16}$$

Виразимо третю складову правої частини диференціального рівняння (3.16), або сумарну масову кількість відокремлених домішок через масову кількість відокремленого кожного структурного компонента домішок кожною *q*-ю ділянкою кожного *j*-го робочого органу ОТТМ.

При цьому, отримаємо

$$\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iвз}(t_з)}{dt_з}=\frac{dm_к(t)}{dt}+\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iд}(t)}{dt}-$$

$$-\left[\begin{array}{l}
\frac{dm_{в.вг}^{(11)}(t_{11}+\tau_{11})}{d(t_{11}+\tau_{11})}+\frac{dm_{в.вг}^{(12)}(t_{12}+\tau_{12})}{d(t_{12}+\tau_{12})}+,...,+\frac{dm_{в.вг}^{(1k)}(t_{1k}+\tau_{1k})}{d(t_{1k}+\tau_{1k})}+\\
+\frac{dm_{в.вр}^{(11)}(t_{11}+\tau_{11})}{d(t_{11}+\tau_{11})}+\frac{dm_{в.вр}^{(12)}(t_{12}+\tau_{12})}{d(t_{12}+\tau_{12})}+,...,+\frac{dm_{в.вр}^{(1k)}(t_{1k}+\tau_{1k})}{d(t_{1k}+\tau_{1k})}+\\
+\frac{dm_{в.вг}^{(21)}(t_{21}+\tau_{21})}{d(t_{21}+\tau_{21})}+\frac{dm_{в.вг}^{(22)}(t_{22}+\tau_{22})}{d(t_{22}+\tau_{22})}+,...,+\frac{dm_{в.вг}^{(2k)}(t_{2k})}{dt_{2k}}+\\
+\frac{dm_{в.вр}^{(22)}(t_{22}+\tau_{22})}{d(t_{22}+\tau_{22})}+,...,+\frac{dm_{в.вр}^{(2k)}(t_{2k}+\tau_{2k})}{d(t_{2k}+\tau_{2k})}+\frac{dm_{в.вг}^{(n1)}(t_{n1}+\tau_{n1})}{d(t_{n1}+\tau_{n1})}+\\
+\frac{dm_{в.вг}^{(n2)}(t_{n2}+\tau_{n2})}{d(t_{n2}+\tau_{n2})}+,...,+\frac{dm_{в.вг}^{(nk)}(t_{nk}+\tau_{nk})}{d(t_{nk}+\tau_{nk})}+\frac{dm_{в.вр}^{(n1)}(t_{n1}+\tau_{n1})}{d(t_{n1}+\tau_{n1})}+\\
+\frac{dm_{в.вр}^{(n2)}(t_{n2}+\tau_{n2})}{d(t_{n2}+\tau_{n2})}+,...,+\frac{dm_{в.вр}^{(nk)}(t_{nk}+\tau_{nk})}{d(t_{nk}+\tau_{nk})}+\frac{dm_{в.нг}^{(n1)}(t_{n1}+\tau_{n1})}{d(t_{n1}+\tau_{n1})}+\\
+\frac{dm_{в.нг}^{(n2)}(t_{n2}+\tau_{n2})}{d(t_{n2}+\tau_{n2})}+,...,+\frac{dm_{в.нг}^{(nk)}(t_{nk}+\tau_{nk})}{d(t_{nk}+\tau_{nk})_{nk}}+\frac{dm_{в.зг}^{(n1)}(t_{n1}+\tau_{n1})}{d(t_{n1}+\tau_{n1})}+\\
+\frac{dm_{в.зг}^{(n2)}(t_{n2}+\tau_{n2})}{d(t_{n2}+\tau_{n2})}+,...,+\frac{dm_{в.зг}^{(nk)}(t_{nk}+\tau_{nk})}{d(t_{nk}+\tau_{nk})}
\end{array}\right]. \quad (3.17)$$

Отримане диференціальне рівняння (3.17) є математичною моделлю, яка в загальному вигляді функціонально описує поетапний процес відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів залежно від часу $t_{jq}$ знаходження складових структурних компонентів домішок на кожній $q$-й ділянці кожного $j$-го робочого органу складних динамічних транспортно-очисних систем вороху коренезбиральних машин [49].

Виразимо час $t_{jq}$ знаходження структурних компонента домішок на кожній $q$-й ділянці кожного $j$-го робочого органу через довжину кожної $q$-ї ділянки $l_{jq}$ та швидкість переміщення $\vartheta_j$ структурних компонентів домішок кожним $j$-м робочим органом, при цьому $t_{jq}=l_{jq}/\vartheta_{jq}$ [267].

Тоді диференціальне рівняння (3.17) можна записати у вигляді

$$\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iвз}(t_з)}{dt_з}=\frac{dm_к(t)}{dt}+\sum_{i=1}^{2}\frac{dm_{iд}(t)}{dt}-$$

$$-\left[\begin{array}{l}
\frac{dm_{в.вг}^{(11)}\left(\frac{l_{11}}{\vartheta_1}+\tau_{11}\right)}{d\left(\frac{l_{11}}{\vartheta_1}+\tau_{11}\right)}+\frac{dm_{в.вг}^{(12)}\left(\frac{l_{12}}{\vartheta_1}+\tau_{12}\right)}{d\left(\frac{l_{12}}{\vartheta_1}+\tau_{12}\right)}+,\ldots,+\frac{dm_{в.вг}^{(1k)}\left(\frac{l_{1k}}{\vartheta_1}+\tau_{1k}\right)}{d\left(\frac{l_{1k}}{\vartheta_1}+\tau_{1k}\right)}+\\
+\frac{dm_{в.вр}^{(11)}\left(\frac{l_{11}}{\vartheta_1}+\tau_{11}\right)}{d\left(\frac{l_{11}}{\vartheta_1}+\tau_{11}\right)}+\frac{dm_{в.вр}^{(12)}\left(\frac{l_{12}}{\vartheta_1}+\tau_{12}\right)}{d\left(\frac{l_{12}}{\vartheta_1}+\tau_{12}\right)}+,\ldots,+\frac{dm_{в.вр}^{(1k)}\left(\frac{l_{1k}}{\vartheta_1}+\tau_{1k}\right)}{d\left(\frac{l_{1k}}{\vartheta_1}+\tau_{1k}\right)}+\\
+\frac{dm_{в.вг}^{(21)}\left(\frac{l_{21}}{\vartheta_2}+\tau_{21}\right)}{d\left(\frac{l_{21}}{\vartheta_2}+\tau_{21}\right)}+\frac{dm_{в.вг}^{(22)}\left(\frac{l_{22}}{\vartheta_2}+\tau_{22}\right)}{d\left(\frac{l_{22}}{\vartheta_2}+\tau_{22}\right)}+,\ldots,+\frac{dm_{в.вг}^{(2k)}\left(\frac{l_{2k}}{\vartheta_2}+\tau_{2k}\right)}{d\left(\frac{l_{2k}}{\vartheta_2}+\tau_{2k}\right)}+\\
+\frac{dm_{в.вр}^{(21)}\left(\frac{l_{21}}{\vartheta_2}+\tau_{21}\right)}{d\left(\frac{l_{21}}{\vartheta_2}+\tau_{21}\right)}+\frac{dm_{в.вр}^{(22)}\left(\frac{l_{22}}{\vartheta_2}+\tau_{22}\right)}{d\left(\frac{l_{22}}{\vartheta_2}+\tau_{21}\right)}+,\ldots,+\frac{dm_{в.вр}^{(2k)}\left(\frac{l_{2k}}{\vartheta_2}+\tau_{2k}\right)}{d\left(\frac{l_{2k}}{\vartheta_2}+\tau_{2k}\right)}+\\
+\frac{dm_{в.вг}^{(n1)}\left(\frac{l_{n1}}{\vartheta_3}+\tau_{n1}\right)}{d\left(\frac{l_{n1}}{\vartheta_3}+\tau_{n1}\right)}+\frac{dm_{в.вг}^{(n2)}\left(\frac{l_{n2}}{\vartheta_3}+\tau_{n2}\right)}{d\left(\frac{l_{n2}}{\vartheta_3}+\tau_{n2}\right)}+,\ldots,+\frac{dm_{в.вг}^{(nk)}\left(\frac{l_{nk}}{\vartheta_3}+\tau_{nk}\right)}{d\left(\frac{l_{nk}}{\vartheta_3}+\tau_{nk}\right)}+\\
+\frac{dm_{в.вр}^{(n1)}\left(\frac{l_{n1}}{\vartheta_3}+\tau_{n1}\right)}{d\left(\frac{l_{n1}}{\vartheta_3}+\tau_{n1}\right)}+\frac{dm_{в.вр}^{(n2)}\left(\frac{l_{n2}}{\vartheta_3}+\tau_{n2}\right)}{d\left(\frac{l_{n2}}{\vartheta_3}+\tau_{n2}\right)}+,\ldots,+\frac{dm_{в.вр}^{(nk)}\left(\frac{l_{nk}}{\vartheta_3}-\tau_{nk}\right)}{d\left(\frac{l_{nk}}{\vartheta_3}-\tau_{nk}\right)}+\\
+\frac{dm_{в.нг}^{(n1)}\left(\frac{l_{n1}}{\vartheta_3}+\tau_{n1}\right)}{d\left(\frac{l_{n1}}{\vartheta_3}+\tau_{n1}\right)}+\frac{dm_{в.нг}^{(n2)}\left(\frac{l_{n2}}{\vartheta_3}+\tau_{n2}\right)}{d\left(\frac{l_{n2}}{\vartheta_3}+\tau_{n2}\right)}+,\ldots,+\frac{dm_{в.нг}^{(nk)}\left(\frac{l_{nk}}{\vartheta_3}+\tau_{nk}\right)}{d\left(\frac{l_{n1}}{\vartheta_3}+\tau_{n1}\right)}+\\
+\frac{dm_{в.зг}^{(n1)}\left(\frac{l_{n1}}{\vartheta_3}+\tau_{n1}\right)}{d\left(\frac{l_{n1}}{\vartheta_3}+\tau_{n1}\right)}+\frac{dm_{в.зг}^{(n2)}\left(\frac{l_{n2}}{\vartheta_3}+\tau_{n2}\right)}{d\left(\frac{l_{n1}}{\vartheta_3}+\tau_{n1}\right)}+,\ldots,+\frac{dm_{в.зг}^{(nk)}\left(\frac{l_{nk}}{\vartheta_3}+\tau_{nk}\right)}{d\left(\frac{l_{nk}}{\vartheta_3}+\tau_{nk}\right)}
\end{array}\right]. \quad (3.18)$$

Для реального (практичного) застосування розробленої математичної моделі (3.18) у контексті запропонованого нами ОТТМ виразимо згідно з (3.1) загальну масову подачу до похилого транспортера складових компонентів вороху $\sum_{i=1}^{2} dm_{iв}(t)/dt$, масову подачу коренеплодів $dm_{к}(t)/dt$, загальну масову подачу структурних компонентів домішок $\sum_{i=1}^{2} dm_{iд}(t)/dt$, масову кількість відокремлених домішок $\sum_{i=1}^{2} dm_{iв.д}^{(jq)}(t_{jq})/dt_{jq}$ через адекватну їм загальну секундну подачу складових компонентів вороху (коренеплодів і домішок) $\sum_{i=1}^{2} Q_{iв} = \left( \sum_{i=1}^{2} \frac{dm_{iв}(t_з)}{dt_з} \right) / dt_з$, секундну подачу коренеплодів $Q_к$, загальну секундну подачу структурних компонентів домішок $\sum_{i=1}^{2} Q_{iд}$, секундну кількість відокремлених домішок $Q_{iв.д}\left( \sum_{i=1}^{2} \frac{dm_{iв.д}^{(jq)}(t_{jq})}{dt_{jq}} \right) / dt_{jq}$.

Структурну схему для розроблення математичної моделі функціонального процесу відокремлення структурних компонентів домішок робочими органами запропонованого нами ОТТМ наведено на рис. 3.2.

Тоді диференціальне рівняння (3.17) згідно з (3.18) запишемо у вигляді

$$\sum_{i=1}^{2} Q_{iв} = Q_k + \sum_{i=1}^{4} Q_{iд} - \left[ \begin{array}{l} Q_{в.вг}^{(11)} + Q_{в.вг}^{(12)} + ,...,+ Q_{в.вг}^{(1k)} + Q_{в.вр}^{(11)} + Q_{в.вр}^{(12)} + ,...,+ Q_{в.вр}^{(1k)} + \\ + Q_{в.вг}^{(21)} + Q_{в.вг}^{(22)} + ,...,+ Q_{в.вг}^{(2k)} + Q_{в.вр}^{(21)} + Q_{в.вр}^{(22)} + ,...,+ Q_{в.вр}^{(2k)} + \\ + Q_{в.нг}^{(21)} + Q_{в.нг}^{(22)} + ,...,+ Q_{в.нг}^{(2k)} + \\ + Q_{в.вг}^{(31)} + Q_{в.вг}^{(31)} + ,...,+ Q_{в.вг}^{(3k)} + Q_{в.вр}^{(31)} + Q_{в.вр}^{(32)} + ,...,+ Q_{в.вр}^{(3k)} + \\ + Q_{в.нг}^{(31)} + Q_{в.нг}^{(32)} + ,...,+ Q_{в.нг}^{(3k)} + Q_{в.зг}^{(31)} + Q_{в.зг}^{(32)} + ,...,+ Q_{в.зг}^{(3k)} \end{array} \right]. \quad (3.19)$$

де $Q_{в.вг}^{(11)}$, $Q_{в.вг}^{(12)},\ldots,Q_{в.вг}^{(1k)}$; $Q_{в.вг}^{(21)}$, $Q_{в.вг}^{(22)},\ldots,Q_{в.вг}^{(2k)}$; $Q_{в.вг}^{(31)}$, $Q_{в.вг}^{(32)},\ldots,Q_{в.вг}^{(3k)}$ – секундна кількість відокремленого вільного грунту 1, 2,…, *k*-м етапом кожним 1, 2 і 3-м робочим органом ОТТМ, кг/с;

$Q_{в.вр}^{(11)}$, $Q_{в.вр}^{(12)},\ldots,Q_{в.вр}^{(1k)}$; $Q_{в.вр}^{(21)}$, $Q_{в.вр}^{(22)},\ldots,Q_{в.вр}^{(2k)}$; $Q_{в.вр}^{(31)}$, $Q_{в.вр}^{(32)},\ldots,Q_{в.вр}^{(3k)}$ – секундна кількість відокремлених вільних рослинних домішок 1, 2,…, *k*-м етапом кожним 1,2 і 3-м робочим орган ОТТМ, кг/с;

$Q_{в.нг}^{(21)}$, $Q_{в.нг}^{(22)},\ldots,Q_{в.нг}^{(2k)}$; $Q_{в.нг}^{(31)}$, $Q_{в.нг}^{(32)},\ldots,Q_{в.нг}^{(3k)}$ – секундна кількість відокремленого налиплого грунту 1, 2,…, *k*-м етапом кожним 2 і 3-м робочим органом ОТТМ, кг/с;

$Q_{в.зг}^{(31)}$, $Q_{в.зг}^{(32)},\ldots,Q_{в.зг}^{(3k)}$ – секундна кількість відокремлених залишків гички 1, 2,…, *k*-м етапом 3-м робочим органом ОТТМ, кг/с.

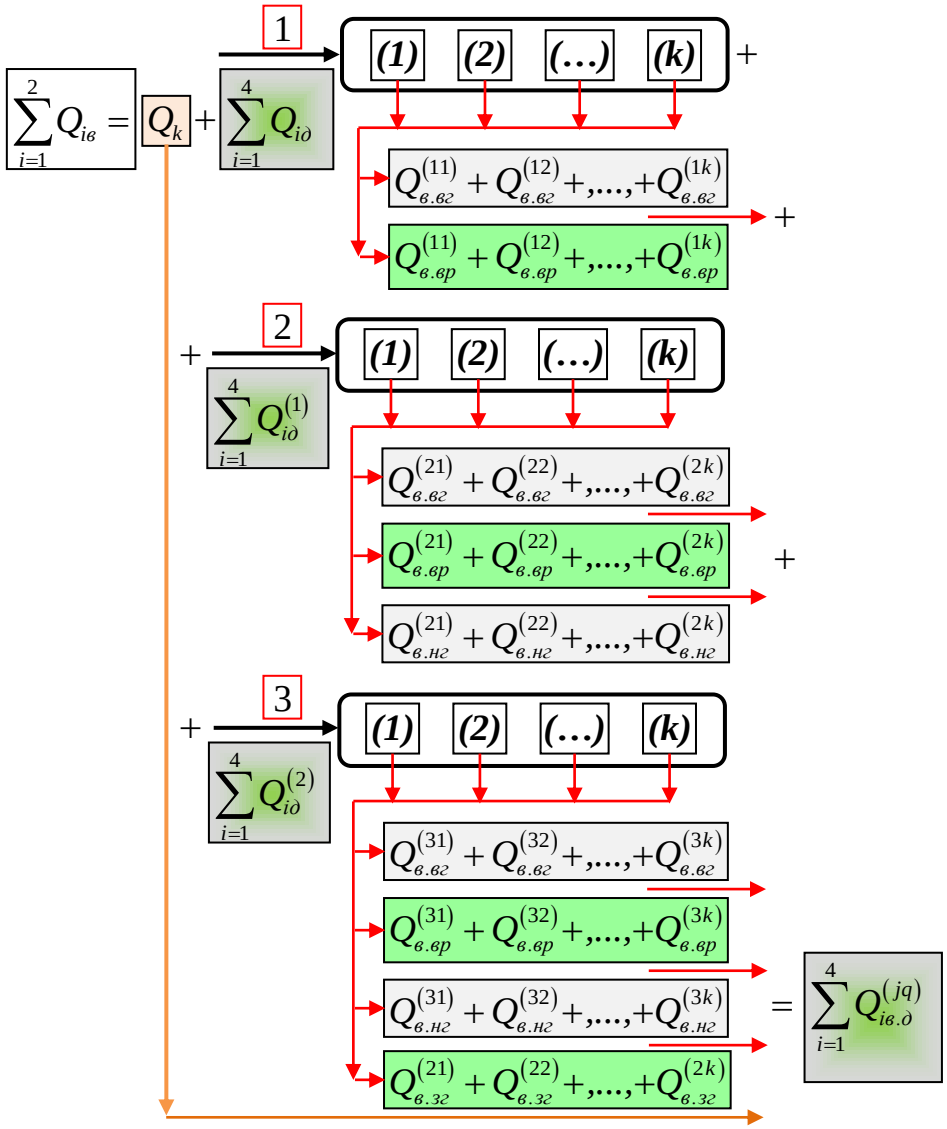



Рисунок 3.2 – Структурна схема моделі функціонального процесу відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів робочими органами ОТТМ: 1 – похилий транспортер; 2 – очисна гірка; 3 – комбінований робочий орган

Виразимо секундну кількість кожного відокремленого складового структурного компонента домішок кожним *k*-м етапом кожного *j*-го (1, 2 і 3-го) робочого органу ОТТМ як різницю вхідної секундної кількості складового структурного компонента домішок кожного *k*-го етапу кожного *j*-го (1, 2 і 3-го) робочого органу ОТТМ і вихідної кількості складового структурного компонента домішок з кожного *k*-го етапу кожного 1, 2 і 3-го робочого органу ОТТМ, при цьому

$$Q_{ів.д}^{(jk)} = Q_{івх.д}^{(jk)} - Q_{івих.д}^{(jk)} = \frac{Q_{ів.д}^{(jk)}}{Q_{івх.д}^{(jk)}} = \frac{Q_{івх.д}^{(jk)}}{Q_{івх.д}^{(jk)}} - \frac{Q_{івих.д}^{(jk)}}{Q_{івх.д}^{(jk)}} = Q_{івх.д}^{(jk)}\left(1-\mu_{зд}^{(j_k)}\right), \qquad (3.20)$$

де $Q_{івх.д}^{(jk)}$ – секундна подача *i*-го складового компонента домішок *k*-ї ділянки кожного *j*-го (1, 2 і 3-го) робочого органу ОТТМ, кг/с;

$\mu_{зд}^{(j_k)}$ – коефіцієнт, який визначає ступінь відокремлення *i*-го складового компонента домішок *k*-ю ділянкою кожного *j*-го (1, 2 і 3-го) робочого органу ОТТМ [267].

Тоді рівняння (3.20) з урахуванням (3.19) буде мати вигляд [267]

$$\sum_{i=1}^{2} Q_{iв} = Q_k + \sum_{i=1}^{4} Q_{iд} -$$

$$-\left[\begin{array}{l}
Q_{вх.вг}^{(11)}\left(1-\mu_{в.вг}^{(11)}\right)+Q_{вх.вг}^{(12)}\left(1-\mu_{в.вг}^{(12)}\right)+,...,+Q_{вх.вг}^{(1k)}\left(1-\mu_{в.вг}^{(1k)}\right)+ \\
+Q_{вх.вр}^{(11)}\left(1-\mu_{в.вр}^{(11)}\right)+Q_{в.вр}^{(12)}\left(1-\mu_{в.вр}^{(12)}\right)+,...,+Q_{в.вр}^{(1k)}\left(1-\mu_{в.вр}^{(1k)}\right)+ \\
+Q_{вх.вг}^{(21)}\left(1-\mu_{в.вг}^{(21)}\right)+Q_{вх.вг}^{(22)}\left(1-\mu_{в.вг}^{(22)}\right)+,...,+Q_{вх.вг}^{(2k)}\left(1-\mu_{в.вг}^{(2k)}\right)+ \\
+Q_{вх.вр}^{(21)}\left(1-\mu_{в.вр}^{(21)}\right)+Q_{вх.вр}^{(22)}\left(1-\mu_{в.вр}^{(22)}\right)+,...,+Q_{вх.вр}^{(2k)}\left(1-\mu_{в.вр}^{(2k)}\right)+ \\
+Q_{вх.нг}^{(21)}\left(1-\mu_{в.нг}^{(21)}\right)+Q_{вх.нг}^{(22)}\left(1-\mu_{в.нг}^{(22)}\right)+,...,+Q_{вх.нг}^{(2k)}\left(1-\mu_{в.нг}^{(2k)}\right)+ \\
+Q_{вх.вг}^{(31)}\left(1-\mu_{в.вг}^{(31)}\right)+Q_{вх.вг}^{(32)}\left(1-\mu_{в.вг}^{(32)}\right)+,...,+Q_{в.вг}^{(3k)}\left(1-\mu_{вх.вг}^{(3k)}\right)+ \\
+Q_{вх.вр}^{(n1)}\left(1-\mu_{в.вр}^{(31)}\right)+Q_{в.вр}^{(32)}\left(1-\mu_{в.вр}^{(32)}\right)+,...,+Q_{в.вр}^{(3k)}\left(1-\mu_{в.вр}^{(3k)}\right)+ \\
+Q_{вх.нг}^{(n1)}\left(1-\mu_{в.нг}^{(31)}\right)+Q_{в.нг}^{(32)}\left(1-\mu_{в.нг}^{(32)}\right)+,...,+Q_{вх.нг}^{(3k)}\left(1-\mu_{в.нг}^{(3k)}\right)+ \\
+Q_{вх.зг}^{(31)}\left(1-\mu_{в.зг}^{(31)}\right)+Q_{вх.зг}^{(32)}\left(1-\mu_{в.зг}^{(32)}\right)+,...,+Q_{вх.зг}^{(3k)}\left(1-\mu_{в.зг}^{(3k)}\right)
\end{array}\right]. \qquad (3.21)$$

Запропонований метод розроблення математичної моделі поетапного відокремлення компонентів домішок від коренеплодів дозволяє проводити подальшу оптимізацію технологічних і конструктивно-кінематичних параметрів робочих органів складних динамічних очисних систем як на аналітичному, так і емпіричному рівні.

Подальший аналіз отриманої математичної моделі (3.17), шляхом її інтегрування по частинам за встановлених меж інтегрування дозволяє визначати загальний час відокремлення компонентів домішок кожним робочим органом й очисною системою загалом і коефіцієнти ступеня відокремлення компонентів домішок.

При цьому функцією оптимізації параметрів робочих органів, є мінімізовані показники якості роботи очисної системи згідно з агротехнічними вимогами до процесу збирання коренеплодів.

Аналітичне розв'язування та експериментальні результати запропонованих моделей дозволяють визначати й проводити подальшу оптимізацію необхідної мінімізованої протяжності кожного очисного робочого органу та встановлювати необхідну мінімізовану загальну протяжність очисної системи коренезбиральної машини загалом.

Коефіцієнти $\mu_{зд}^{(j_k)}$, які визначають ступінь відокремлення *i*-го компонента домішок *k*-м етапом кожного *j*-го робочого органу ОТТМ можуть бути встановлені як правило, тільки експериментальним шляхом у польових реальних умовах збирання великорозмірних коренеплодів.

При цьому числове значення кожного коефіцієнт $\mu_{зд}^{(j_k)}$, є гіпотетично залежним від багатьох об'єктивних і суб'єктивних чинників або факторів, які регламентують:

- агрофізичні властивості та характеристики грунтового навколоплідного середовища та коренеплодів;

- агрокліматичних умов збирання коренеплодів, характеристики агрофізичного стану поля на час збирання;

- фізичних властивостей і характеристик робочих органів і їх конструктивно-кінематичних параметрів тощо.

Реалізацію розроблених графічної (рис. 3.3) та математичної (3.21) моделей у практичній площині розглянемо на прикладі аналітичного аналізу процесу очищення складових компонентів домішок, або процесу інтенсифікації відокремлення *i*-их структурних компонентів домішок від коренеплодів, який надходить на поверхні робочих органів ОТТМ, узагальнена схема моделі якого наведена на рис. 3.4 [224].

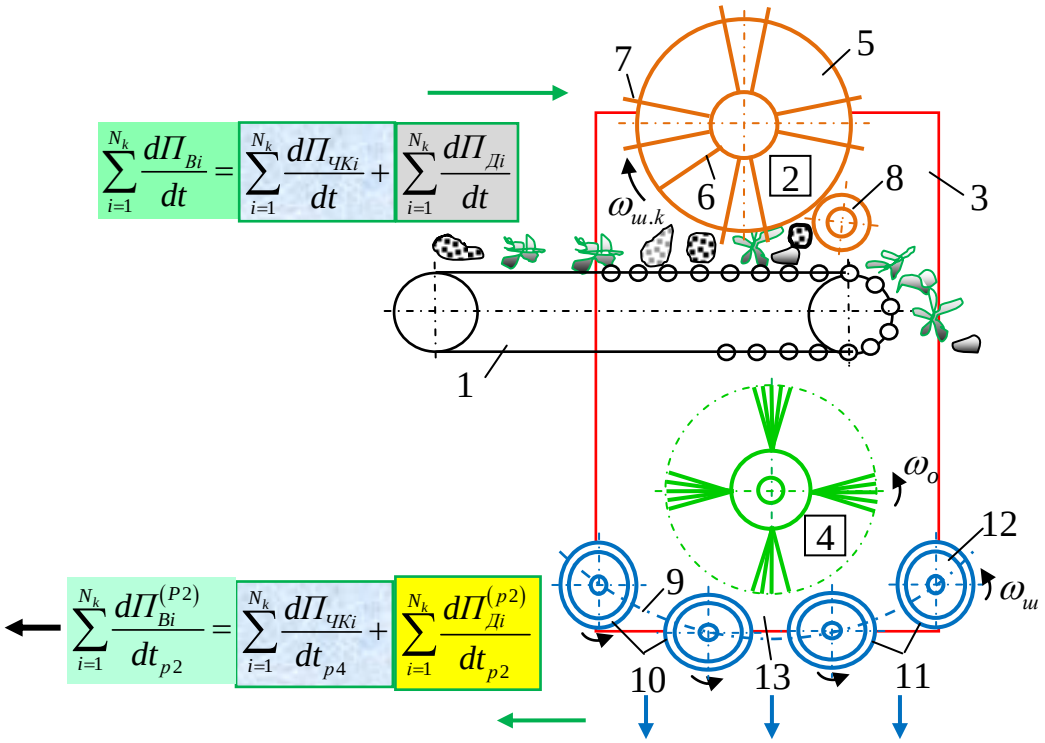



Рисунок 3.3 – Схема інтенсифікації процесу відокремлення домішок від коренеплодів: 1 – завантажувальний транспортер; 2 – комбінований робочий орган; 3 – очисна гірка; 4 – комбінований робочий орган; 5 – шнековий конвеєр; 6 – виток шнека; 7 – пружні очисні елементи; 8 – валець; 9 – нижня вітка еліпса; 10, 11 – ліва та права системи шнеків; 12 – шнек; 13 – жолоб робочого русла

Для проведення аналітичного аналізу переміщення технологічної маси викопаного вороху по завантажувальному транспортері 1 (рис. 3.4), комбінованому робочому органу 2, очисній гірці 3 та комбінованому робочому органу 4 позначимо: загальну подачу викопаного копачами МВК вороху за час $t$ до завантажувального транспортера 1 через $\sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{Bi}(t)/dt$ (кг/с); подачу

вороху із завантажувального транспортера 1 за час $t_z$ до комбінованого робочого органу 2 через $\sum_{i=1}^{N_k} dQ_{Bi}^{(Z)}\left(t_z\right)/dt_z$ (кг); подачу вороху від комбінованого робочого органу 2 за час $t_{p2}$ до очисної гірки 3 через $\sum_{i=1}^{N_k} dQ_{Bi}^{(P2)}\left(t_{p2}\right)/dt_{p2}$ (кг); подачу вороху від очисної гірки 3 за час $t_q$ до комбінованого робочого органу 4 через $\sum_{i=1}^{N_k} dQ_{Bi}^{(G)}\left(t_q\right)/dt_q$ (к).

При цьому, технологічну подачу комбінованого робочого органу 4 за час $t_{p4}$ позначимо через $\sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{Bi}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)/dt_{p4}$ (кг).

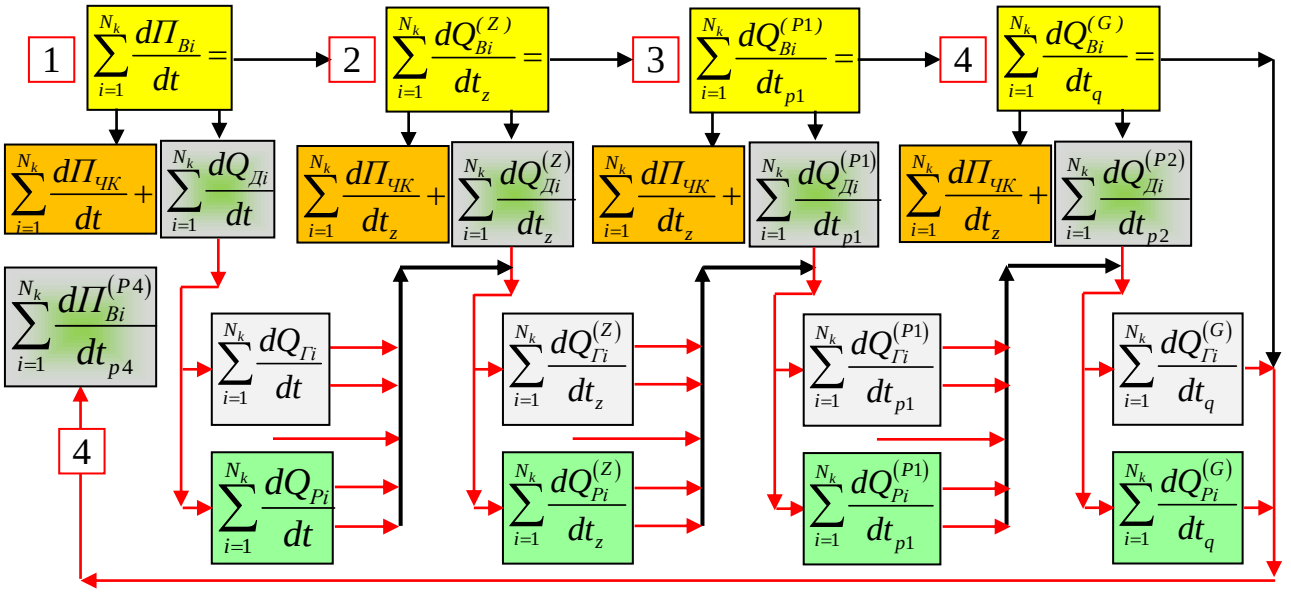



Рисунок 3.4 – Структурна модель функціонального процесу відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів робочими органами ОТТМ: 1 – завантажувальний транспортер; 2 – комбінований робочий орган; 3 – очисна гірка; 4 – комбінований робочий орган

Тоді аналітичне моделювання технологічного процесу роботи складної технічної системи, якою є ОТТМ у аспекті дотримання задовільної (раціональної) технологічності її функціонування згідно з (2.43) можна записати у вигляді накладеної умови

$$\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{Bi}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)}{dt_{p4}}\geq\sum_{i=1}^{N_k}\frac{dQ_{Bi}^{(G)}\left(t_q\right)}{dt_q}\geq\sum_{i=1}^{N_k}\frac{dQ_{Bi}^{(P1)}\left(t_{p2}\right)}{dt_{p2}}\geq\sum_{i=1}^{N_k}\frac{dQ_{Bi}^{(Z)}\left(t_z\right)}{dt_z}\geq\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{Bi}\left(t_к\right)}{dt_к},\quad(3.22)$$

де $t_{p4}$, $t_q$, $t_{p2}$, $t_z$, $t_к$ – час перебування вороху на робочих поверхнях комбінованого робочого органу 4, очисної гірки 3, комбінованого робочого органу 2, завантажувального транспортера 1, час переміщення викопаного вороху до завантажувального транспортера 1, с.

Враховуючи (2.3) та (2.4) нерівність (3.22) запишемо у вигляді

$$\begin{cases}\sum_{i=1}^{N_k}d\Pi_{ЧК}/dt_{p2}+\sum_{i=1}^{N_k}dQ_{Дi}^{(P4)}/dt_{p4}\geq\sum_{i=1}^{N_k}d\Pi_{ЧК}/dt_q+\sum_{i=1}^{N_k}dQ_{Дi}^{(G)}/dt_q;\\ \sum_{i=1}^{N_k}d\Pi_{ЧК}/dt_q+\sum_{i=1}^{N_k}dQ_{Дi}^{(G)}\left(t_q\right)/dt_q\geq\sum_{i=1}^{N_k}d\Pi_{ЧК}\left(t_{p2}\right)/dt_{p2}+\sum_{i=1}^{N_k}dQ_{Дi}^{(P2)}\left(t_{p2}\right)/dt_{p2};\\ \sum_{i=1}^{N_k}d\Pi_{ЧК}/dt_{p1}+\sum_{i=1}^{N_k}dQ_{Дi}^{(P2)}\left(t_{p2}\right)/dt_{p2}\geq\sum_{i=1}^{N_k}d\Pi_{ЧК}\left(t_z\right)/dt_Z+\sum_{i=1}^{N_k}dQ_{Дi}^{(Z)}\left(t_z\right)/dt_z;\\ \sum_{i=1}^{N_k}d\Pi_{ЧК}\left(t_z\right)/dt_Z+\sum_{i=1}^{N_k}dQ_{Дi}^{(Z)}\left(t_z\right)/dt_z\geq\sum_{i=1}^{N_k}d\Pi_{ЧК}/dt_к+\sum_{i=1}^{N_k}d\Pi_{Дi}\left(t_к\right)/dt_к\end{cases},\quad(3.23)$$

або

$$\begin{cases}\sum_{i=1}^{N_k}d\Pi_{ЧК}/dt_{p4}+\sum_{i=1}^{N_k}dQ_{Гi}^{(P4)}/dt_{p4}+\sum_{i=1}^{N_k}dQ_{Pi}^{(P4)}/dt_{p4}\geq\\ \geq\sum_{i=1}^{N_k}d\Pi_{ЧК}/dt_q+\sum_{i=1}^{N_k}dQ_{Гi}^{(G)}/dt_q+\sum_{i=1}^{N_k}dQ_{Pi}^{(G)}/dt_q;\\ \sum_{i=1}^{N_k}d\Pi_{ЧК}/dt_q+\sum_{i=1}^{N_k}dQ_{Гi}^{(G)}/dt_q+\sum_{i=1}^{N_k}dQ_{Pi}^{(G)}/dt_q\geq\\ \geq\sum_{i=1}^{N_k}d\Pi_{ЧК}\left(t_{p2}\right)/dt_{p2}+\sum_{i=1}^{N_k}dQ_{Гi}^{(P2)}\left(t_{p2}\right)/dt_{p2}+\sum_{i=1}^{N_k}dQ_{Pi}^{(P2)}\left(t_{p2}\right)/dt_{p2};\\ \sum_{i=1}^{N_k}d\Pi_{ЧК}\left(t_{p2}\right)/dt_{p2}+\sum_{i=1}^{N_k}dQ_{Гi}^{(P2)}\left(t_{p2}\right)/dt_{p2}+\sum_{i=1}^{N_k}dQ_{Pi}^{(P2)}\left(t_{p2}\right)/dt_{p2}\geq\\ \geq\sum_{i=1}^{N_k}d\Pi_{ЧК}\left(t_z\right)/dt_Z+\sum_{i=1}^{N_k}dQ_{Гi}^{(Z)}\left(t_z\right)/dt_z+\sum_{i=1}^{N_k}dQ_{Pi}^{(Z)}\left(t_z\right)/dt_z;\\ \sum_{i=1}^{N_k}d\Pi_{ЧК}\left(t_z\right)/dt_Z+\sum_{i=1}^{N_k}dQ_{Гi}^{(Z)}\left(t_z\right)/dt_z+\sum_{i=1}^{N_k}dQ_{Pi}^{(Z)}\left(t_z\right)/dt_z\geq\\ \geq\sum_{i=1}^{N_k}d\Pi_{ЧК}\left(t_к\right)/dt_к+\sum_{i=1}^{N_k}d\Pi_{Гi}\left(t_к\right)/dt_к+\sum_{i=1}^{N_k}d\Pi_{Pi}\left(t_к\right)/dt_к\end{cases}.\quad(3.24)$$

Тоді з урахуванням відповідного прийнятого загального коефіцієнта сепарації домішок відповідних *j*-х робочих органів ОТТМ, який позначимо символом $\mu_{зд}^{(j_k)}(c_i,t_i)$, де $(c_i)$ – сталі коефіцієнти, які враховують параметри робочих органів, фізико-механічні властивості домішок, кліматичні умови тощо) та який визначає ступінь одночасного відокремлення загальних домішок (всіх структурних компонентів домішок: вільних і зв'язаних грунтових і рослинних домішок) на шляху переміщення вороху кожним *j*-м робочим органом ОТТМ, можна записати, що подача викопаного вороху до завантажувального транспортера 1 $\sum_{i=1}^{N_k} dQ_{Bi}^{(Z)}(t_к)/dt_к$ за час $t_к$, подача вороху до комбінованого робочого органу 2 $\sum_{i=1}^{N_k} dQ_{Bi}^{(P2)}(t_z)/dt_z$ за час $t_z$, подача вороху до очисної гірки 3 $\sum_{i=1}^{N_k} dQ_{Bi}^{(G)}(t_{p2})/dt_{p2}$ за час $t_{p1}$, подача вороху до комбінованого робочого органу 4 $\sum_{i=1}^{N_k} dQ_{Bi}^{(P4)}(t_q)/dt_q$ за час $t_q$ буде становити [224]:

$$
\begin{cases}
\sum_{i=1}^{N_k} Q_{Bi}^{(Z)}(t_к)/dt_к = \left(\sum_{i=1}^{N_k} П_{Bi}(t_к)/dt_к\right)\mu_{зд}(c_i,t_к) = \\
= \left(\sum_{i=1}^{N_k} П_{ЧК}(t_к)/dt_к\right) + \left(\sum_{i=1}^{N_k} Q_{Дi}(t_к)/dt_к\right)\mu_{зд}(c_i,t_к); \\
\sum_{i=1}^{N_k} dQ_{Bi}^{(P2)}(t_z)/dt_Z = \left(\sum_{i=1}^{N_k} dQ_{Bi}^{(Z)}(t_z)/dt_z\right)\mu_{зд}^{(Z)}(c_i,t_z) = \\
= \left(\sum_{i=1}^{N_k} dП_{ЧКi}(t_z)/dt_z\right) + \left(\sum_{i=1}^{N_k} dQ_{Дi}^{(Z)}(t_z)/dt_z\right)\mu_{зд}^{(Z)}(c_i,t_z); \\
\sum_{i=1}^{N_k} dQ_{Bi}^{(G)}(t_{p2})/dt_{p2} = \left(\sum_{i=1}^{N_k} dQ_{Bi}^{(G)}(t_{p2})/dt_{p2}\right)\mu_{зд}^{(p2)}(c_i,t_{p2}) = \\
= \left(\sum_{i=1}^{N_k} dП_{ЧКi}(t_{p2})/dt_{p2}\right) + \left(\sum_{i=1}^{N_k} dQ_{Дi}^{(P2)}(t_{p2})/dt_{p2}\right)\mu_{зд}^{(P2)}(c_i,t_{p2}); \\
\sum_{i=1}^{N_k} dQ_{Bi}^{(P4)}/dt_q = \left(\sum_{i=1}^{N_k} dQ_{Bi}^{(P4)}(t_q)/dt_q\right)\mu_{зд}^{(q)}(c_i,t_q) = \\
= \left(\sum_{i=1}^{N_k} dП_{ЧКi}(t_{p2})/dt_{p2}\right) + \left(\sum_{i=1}^{N_k} dQ_{Дi}^{(P2)}(t_q)/dt_q\right)\mu_{зд}^{(q)}(c_i,t_q)
\end{cases}
. \qquad (3.25)
$$

Тоді вихідна подача вороху з комбінованого робочого органу 4 до наступних транспортно-технологічних систем коренезбиральної машини, яку позначимо як $\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{Bi}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)}{dt_{p4}}$, визначається за формулою

$$\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{Bi}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)}{dt_{p4}}=\sum_{i=1}^{N_k}\frac{dQ_{Bi}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)}{dt_{p4}}\mu_{зд}^{(p4)}\left(c_i,t_{p4}\right)=$$
$$=\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{ЧК}\left(t_{p4}\right)}{dt_{p4}}+\sum_{i=1}^{N_k}\frac{dQ_{Дi}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)}{dt_{p4}}\mu_{зд}^{(p4)}\left(c_i,t_{p4}\right)= \quad , (3.26)$$
$$=\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{ЧК}\left(t_4\right)}{dt_{p4}}+\sum_{i=1}^{N_k}\frac{dQ_{Гi}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)}{dt_{p4}}\mu_{зд}^{(p4)}\left(c_i,t_{p4}\right)+\sum_{i=1}^{N_k}\frac{dQ_{Pi}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)}{dt_{p4}}\mu_{зд}^{(p4)}\left(c_i,t_{p4}\right)$$

або з урахуванням складових структурних компонентів домішок матимемо

$$\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{Bi}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)}{dt_{p4}}=\sum_{i=1}^{N_k}\frac{dQ_{Bi}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)}{dt_{p4}}\mu_{зд}^{(p4)}\left(c_i,t_{p4}\right)=$$
$$=\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{ЧК}\left(t_{p4}\right)}{dt_{p4}}+\left[\begin{array}{l}\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\left[Q_{в.гр}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)+Q_{н.г}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)\right]}{dt_{p4}}+\\+\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\left[Q_{в.р}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)+Q_{з.г}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)\right]}{dt_{p4}}\end{array}\right]\mu_{зд}^{(p4)}\left(c_i,t_{p4}\right) \quad , \quad (3.27)$$

де $\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\left[Q_{в.гр}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)+Q_{н.г}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)\right]}{dt_{p4}}$ – подача грунтових домішок (сума, відповідно, вільних грунтових домішок і налиплого грунту на коренеплодах), кг;

$\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\left[Q_{в.р}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)+Q_{з.г}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)\right]}{dt_{p4}}$ – подача рослинних домішок (сума, відповідно, вільних рослинних домішок і залишків гички на головках коренеплодів), кг.

Коефіцієнти сепарації домішок $\mu_{зд}^{(Z)}\left(c_i,t_z\right)$, $\mu_{зд}^{(P2)}\left(c_i,t_{p2}\right)$, $\mu_{зд}^{(G)}\left(c_i,t_q\right)$, $\mu_{зд}^{(P4)}\left(c_i,t_{p4}\right)$ робочих органів ОТТМ, з урахуванням тієї кількості домішок, яка відокремлюється від коренеплодів на шляху переміщення викопаного вороху

до завантажувального транспортера ($-\sum_{i=1}^{N_k} dw_{в.д}(t)/dt$), робочими поверхнями завантажувального транспортера ($-\sum_{i=1}^{N_k} dw_{в.д}^{(Z)}(t_z)/dt_z$), очисною гіркою ($-\sum_{i=1}^{N_k} dw_{в.д}^{(G)}(t_q)/dt_q$), комбінованими робочими органами ($-\sum_{i=1}^{N_k} dw_{в.д}^{(P2)}(t_{p2})/dt_2$), ($-\sum_{i=1}^{N_k} dw_{в.д}^{(P4)}(t_{p4})/dt_{p4}$), враховуючи залежності (3.25), (3.27) можна записати у вигляді [224, 267]:

$$\mu_{зд}^{(Z)}(c_i,t_z)=\frac{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d\left[\Pi_{ЧК}(t_к)+Q_{Дi}(t_к)\right]/dt_к\right)\mu_{зд}(c_i,t_к)-\sum_{i=1}^{N_k} dw_{в.д}^{(Z)}(t_z)/dt_z}{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d\left[\Pi_{ЧК}(t_к)+Q_{Дi}(t_к)\right]/dt_к\right)\mu_{зд}(c_i,t_к)}=$$

$$=1-\frac{\sum_{i=1}^{N_k} dw_{в.д}^{(Z)}(t_z)/dt_z}{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d\left[\Pi_{ЧК}(t)+Q_{Дi}(t)\right]/dt\right)\mu_{зд}(c_i,t)}; \quad (3.28)$$

$$\mu_{зд}^{(P2)}(c_i,t_{p2})=\frac{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d\left[\Pi_{ЧК}(t_z)+Q_{Дi}^{(P2)}(t_{p2})\right]/dt_{p2}\right)-\sum_{i=1}^{N_k} dw_{в.д}^{(P2)}(t_{p2})/dt_{p2}}{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d\left[\Pi_{ЧК}(t_{p2})+Q_{Дi}^{(P2)}(t_{p2})\right]/dt_{p2}\right)}=$$

$$=1-\frac{\sum_{i=1}^{N_k} dw_{в.д}^{(P2)}(t_{p2})/dt_{p2}}{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d\left[\Pi_{ЧК}(t_{p2})+Q_{Дi}^{(P2)}(t_{p2})\right]/dt_{p2}\right)}; \quad (3.29)$$

$$\mu_{зд}^{(G)}(c_i,t_q)=\frac{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d\left[\Pi_{ЧК}(t_q)+Q_{Дi}^{(G)}(t_q)\right]/dt_q\right)-\sum_{i=1}^{N_k} dw_{в.д}^{(G)}(t_q)/dt_q}{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d\left[\Pi_{ЧК}(t_q)+Q_{Дi}^{(G)}(t_q)\right]/dt_q\right)}=$$

$$=1-\frac{\sum_{i=1}^{N_k} dw_{в.д}^{(G)}(t_q)/dt_q}{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d\left[\Pi_{ЧК}(t_q)+Q_{Дi}^{(G)}(t_q)\right]/dt_q\right)}; \quad (3.30)$$

$$\mu_{зд}^{(P4)}\left(c_i,t_{p4}\right)=\frac{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d\left[\Pi_{ЧК}\left(t_{p4}\right)+Q_{Дi}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)\right]/dt_{p4}\right)-\sum_{i=1}^{N_k} dw_{в.д}^{(P4)}(t_{p4})/dt_{p4}}{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d\left[\Pi_{ЧК}\left(t_{p4}\right)+Q_{Дi}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)\right]/dt_{p4}\right)}=$$

$$=1-\frac{\sum_{i=1}^{N_k} dw_{в.д}^{(P4)}(t_{p4})/dt_{p4}}{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d\left[\Pi_{ЧК}\left(t_{p4}\right)+Q_{Дi}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)\right]/dt_{p4}\right)} \quad ; \quad (3.31)$$

Час перебування вороху на робочих поверхнях завантажувального транспортера 1 (рис. 3.1), комбінованого робочого органу 2, очисної гірки 3, комбінованого робочого органу 4, відповідно, $t_z$, $t_{p2}$, $t_q$, $t_{p4}$ можна записати у вигляді:

$$t_z = S_m / \vartheta_m^*;\ \ t_{p4} = S_{p2} / \vartheta_{ш.к};\ \ t_q = S_q / \vartheta_q^*;\ \ t_{p4} = S_{p4} / \vartheta_ш, \qquad (3.32)$$

де $S_m$, $S_{p2}$, $S_q$, $S_{p4}$ – відповідно, шлях переміщення вороху (коренеплодів і домішок) по робочих поверхнях завантажувального транспортера 1, комбінованого робочого органу 2, очисної гірки 3, комбінованого робочого органу 4, м;

$\vartheta_m^*$, $\vartheta_{ш.к}^*$ $\vartheta_q^*$; $\vartheta_ш^*$ – відповідно, швидкість переміщення вороху (коренеплодів і домішок) робочими поверхнями завантажувального транспортера 1, шнекового конвеєра 5 комбінованого робочого органу 2, очисної гірки 3 (швидкість скочування вороху), шнека 12 комбінованого робочого органу 4, м/с.

Позначимо складові:

- $S_m = l_m$, де $l_m$ – довжина робочої гілки завантажувального транспортера, м; $\vartheta_m^* = \vartheta_m k_\vartheta = \omega_z r_з k_{\vartheta_m} = r_з k_{\vartheta_m} \frac{d\varphi_з}{dt}$, де $\vartheta_m$ – теоретична швидкість руху робочої гілки завантажувального транспортера (м/с); $k_\vartheta$ – коефіцієнт, який враховує зниження $\vartheta_m^*$ відносно $\vartheta_m$; $r_з$ – радіус ведучої зірочки завантажувального транспортера (м); $\omega_з = d\varphi_з / dt$ – кутова швидкість ведучої зірочки (рад/с); $\varphi_з$ – кут повороту ведучої зірочки, рад.;

- $S_{p2} = l_{ш.к}$, де $l_{ш.к}$ – довжина гвинтової лінії шнекового конвеєра 5 комбінованого робочого органу 2, м; $\vartheta^*_{ш.к} = \vartheta_{ш.к} k_{\vartheta_{ш.к}} = \frac{T_{ш.к}\omega_{ш.к}k_{\vartheta_{ш.к}}}{2\pi} = \frac{T_{ш.к}k_{\vartheta_{ш.к}}}{2\pi}\frac{d\varphi_{ш.к}}{dt}$, де $\vartheta_{ш.к}$ – теоретична швидкість осьового переміщення витків шнекового конвеєра (м/с); $k_{\vartheta_{ш.к}}$ – коефіцієнт, який враховує зниження $\vartheta^*_{ш.к}$ відносно $\vartheta_{ш.к}$; $T_{ш.к}$ – крок шнекового конвеєра (м); $\omega_{ш.к} = d\varphi_{ш.к}/dt$ – кутова швидкість шнекового конвеєра (рад/с); $\varphi_{ш.к}$ – кут повороту шнекового конвеєра, рад.;

- $S_q = H_q = L_г \sin\alpha_г \lambda_г$, де $H_q$ – висота переміщення (скочування) вороху від точки його контакту з робочою гілкою очисної гірки 3 до точки контакту з шнеком 12 комбінованого робочого органу 4, $L_г$ – довжина робочої гілки очисної гірки, м; $\alpha_г$ – кут нахилу очисної гірки до горизонту, град.; $\lambda_г$ – коефіцієнт, який враховує пропорційність висоти переміщення $H_q$ вороху відносно довжини $L_г$ робочої гілки; $\vartheta^*_q = \vartheta_п - \vartheta_q = \sqrt{2gH_q} - r_б\omega_г = \sqrt{2gL_г \sin\alpha_г \lambda_г} - r_б\frac{d\varphi_б}{dt}$, де $\vartheta_п$ – швидкість вільного скочування, м/с; $\vartheta_q$ – швидкість руху робочої гілки очисної гірки. м/с; $g$ – прискорення вільного падіння, м/с$^2$; $r_б$ – радіус приводного барабана гірки, м; $\omega_б$ – кутова швидкість барабана, рад/с; $\varphi_б$ – кут повороту барабана, рад.;

- $S_{p4} = l_ш$, де $l_ш$ – довжина гвинтової лінії шнека 12 комбінованого робочого органу 4, м; $\vartheta^*_ш = \vartheta_ш k_{\vartheta_ш} = \frac{T_ш\omega_ш k_{\vartheta_ш}}{2\pi} = \frac{T_ш k_{\vartheta_ш}}{2\pi}\frac{d\varphi_ш}{dt}$, де $\vartheta_ш$ – теоретична швидкість осьового переміщення витків шнека (м/с); $k_{\vartheta_ш}$ – коефіцієнт, який враховує зниження $\vartheta^*_ш$ відносно $\vartheta_ш$; $T_ш$ – крок шнека (м); $\omega_ш = d\varphi_ш/dt$ – кутова швидкість шнека (рад/с); $\varphi_ш$ – кут повороту шнека комбінованого робочого органу 4, рад.

Підставивши відповідні значення $S_т$, $S_{p2}$, $S_q$, $S_{p4}$ та $\vartheta^*_т$, $\vartheta^*_{ш.к}$ $\vartheta_q$; $\vartheta^*_ш$ в (3.32) і (3.24)-(3.31), отримаємо:

$$\mu_{зд}^{(Z)}\left(c_i,t_z\right)=1-\frac{\sum_{i=1}^{N_k} dw_{в.д}^{(Z)}\left(\dfrac{l_m}{r_з k_{ϑ}\dfrac{d\varphi_з}{dt}}\right)/dt_z}{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d\left[\Pi_{ЧК}\left(t\right)+Q_{Дi}\left(t\right)\right]/dt\right)\mu_{зд}\left(c_i,t\right)};\qquad (3.33)$$

$$\mu_{зд}^{(P2)}\left(c_i,t_{p2}\right)=1-\frac{\sum_{i=1}^{N_k} dw_{в.д}^{(P2)}\left(\dfrac{2\pi l_{ш.к}}{T_{ш.к}k_{ϑ_{ш.к}}\dfrac{d\varphi_{ш.к}}{dt}}\right)/dt_{p2}}{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d\left[\Pi_{ЧК}\left(t_{p2}\right)+Q_{Дi}^{(P2)}\left(t_{p2}\right)\right]/dt_{p2}\right)};\qquad (3.34)$$

$$\mu_{зд}^{(G)}\left(c_i,t_q\right)=1-\frac{\sum_{i=1}^{N_k} dw_{в.д}^{(G)}\left(\dfrac{\sqrt{L_г\sin\alpha_г\lambda_г}}{\sqrt{2g}-r_б\dfrac{d\varphi_б}{dt}}\right)/dt_q}{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d\left[\Pi_{ЧК}\left(t_q\right)+Q_{Дi}^{(G)}\left(t_q\right)\right]/dt_q\right)};\qquad (3.35)$$

$$\mu_{зд}^{(P4)}\left(c_i,t_{p4}\right)=1-\frac{\sum_{i=1}^{N_k} dw_{в.д}^{(P4)}\left(\dfrac{2\pi l_ш}{T_ш k_{ϑ_ш}\dfrac{d\varphi_ш}{dt}}\right)/dt_{p4}}{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d\left[\Pi_{ЧК}\left(t_{p4}\right)+Q_{Дi}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)\right]/dt_{p4}\right)};\qquad (3.36)$$

Підставивши значення складових відповідних коефіцієнтів сепарації вороху та його часу перебування на робочих поверхнях ОТТМ з (3.33)-(3.35) у залежності (3.25), одержимо [224, 267]:

$$\sum_{i=1}^{N_k} dQ_{Bi}^{(P2)}\left(t_z\right)/dt_Z=\left(\sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{ЧКi}\left(t_z\right)/dt_z\right)+\left(\sum_{i=1}^{N_k} dQ_{Дi}^{(Z)}\left(t_z\right)/dt_z\right)\times$$

$$\times\left[1-\frac{\sum_{i=1}^{N_k} dw_{в.д}^{(Z)}\left(l_m/r_з k_{ϑ_m}\dfrac{d\varphi_з}{dt}\right)/dt_z}{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d\left[\Pi_{ЧК}\left(t_к\right)+Q_{Дi}\left(t_к\right)\right]/dt_к\right)}\right];\qquad (3.37)$$

$$\sum_{i=1}^{N_k} dQ_{Bi}^{(G)}\left(t_{p2}\right)/dt_{p2} = \left(\sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{ЧКi}\left(t_{p2}\right)/dt_{p2}\right) + \left(\sum_{i=1}^{N_k} dQ_{Дi}^{(P2)}\left(t_{p2}\right)/dt_{p2}\right) \times$$

$$\times\left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_k} dw_{в.д}^{(P2)}\left(2\pi l_{ш.к}/T_{ш.к}k_{\vartheta_{ш.к}}\dfrac{d\varphi_{ш.к}}{dt}\right)/dt_{p2}}{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d\left[\Pi_{ЧК}\left(t_{p2}\right) + Q_{Дi}^{(P2)}\left(t_{p2}\right)\right]/dt_{p2}\right)}\right] \quad ; \quad (3.38)$$

$$\sum_{i=1}^{N_k} dQ_{Bi}^{(P4)}/dt_q = \left(\sum_{i=1}^{N_k} d\Pi_{ЧКi}\left(t_{p2}\right)/dt_{p2}\right) + \left(\sum_{i=1}^{N_k} dQ_{Дi}^{(P2)}\left(t_q\right)/dt_q\right) \times$$

$$\times\left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_k} dw_{в.д}^{(G)}\left(\sqrt{L_г \sin\alpha_г \lambda_г}/\sqrt{2g} - r_б\dfrac{d\varphi_б}{dt}\right)/dt_q}{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d\left[\Pi_{ЧК}\left(t_q\right) + Q_{Дi}^{(G)}\left(t_q\right)\right]/dt_q\right)}\right] \quad . \quad (3.39)$$

Із урахуванням (3.36) залежність (3.27) запишемо у вигляді

$$\sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\Pi_{Bi}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)}{dt_{p4}} = \sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\Pi_{ЧК}\left(t_{p4}\right)}{dt_{p4}} + \left[\begin{array}{l}\displaystyle\sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\left[Q_{в.гр}^{(P4)}\left(t_{p4}\right) + Q_{н.г}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)\right]}{dt_{p4}} + \\ \displaystyle+\sum_{i=1}^{N_k} \frac{d\left[Q_{в.р}^{(P4)}\left(t_{p4}\right) + Q_{з.г}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)\right]}{dt_{p4}}\end{array}\right] \times \quad . \quad (3.40)$$

$$\times\left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_k} dw_{в.д}^{(P4)}\left(2\pi l_ш/T_ш k_{\vartheta_ш}\dfrac{d\varphi_ш}{dt}\right)/dt_{p4}}{\left(\sum_{i=1}^{N_k} d\left[\Pi_{ЧК}\left(t_{p4}\right) + Q_{Дi}^{(P4)}\left(t_{p4}\right)\right]/dt_{p4}\right)}\right]$$

Розроблена математична модель (3.40) 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.

Співставлення значення масової подачі вороху з ОТТМ із подачею вороху з копачів модуля викопування коренеплодів до завантажувального транспортера ОТТМ регламентує технологічну ефективність роботи ОТТМ.

## 3.2. Детермінована математична модель переміщення вороху похилим транспортером

Одним із резервів удосконалення очисних робочих органів коренезбиральних машин, є інтенсифікація процесу сепарації домішок з максимальним відділенням від коренеплодів грунту, який налипнув на коренеплодах і пов'язаної гички, яка залишається на головках коренеплодів після зрізування основного масиву гички.

Процес інтенсифікації відокремлення домішок від коренеплодів може здійснюватися за рахунок застосування у технологічній схемі очищувачів активних робочих органів, які забезпечують додатковий динамічний вплив на складові частини структурних компонентів домішок [268, 269].

Ефективність відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів, або показники якості роботи ОТТМ (рис. 2.7, рис. 3.1) значно залежать не тільки від фізико-механічних характеристик домішок, установлених значень основних параметрів і режимів роботи комбінованого робочого органу 3 – 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 [270].

Критеріями, що характеризують технологічний процес роботи ОТТМ, є кількісні показники ступеня пошкодження коренеплодів та відділення структурних компонентів домішок із урахуванням можливих втрат коренеплодів [271]. У першому наближенні зазначені показники у прямому співвідношенні залежать від ефективності роботи похилого скребкового транспортера 1 (рис. 3.1), який регламентує кінематичні та динамічні показники переміщення коренеплодів та домішок з нього на похилу прямоточну гірку 2.

Для дослідження процесу завантаження гірки та розроблення передумов інтенсифікації відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів, проведено аналіз перебування компонентів вороху на похилому транспортері та розроблення детермінованої математичної моделі руху вороху (коренеплодів і домішок) робочими поверхнями похилого транспортера [270].

Схема для розрахунку руху компонентів вороху похилим транспортером представлена на рис. 3.4.

Компоненти вороху 3 (коренеплоди та домішки, рис. 3.4) надходять на робочу гілку 2 похилого транспортера 1, заповнюють простір між скребками 4 та переміщуються робочою гілкою до вихідної зони.

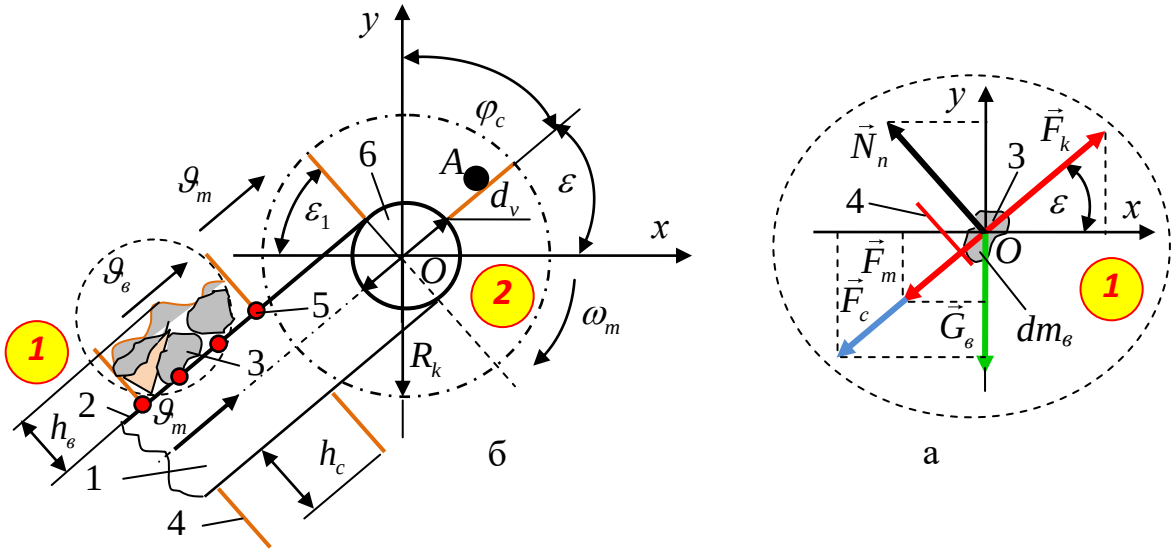



Рисунок 3.4 – Схема до розрахунку руху складових компонентів вороху: 1 – похилий транспортер; 2 – робоча гілка; 3 – компонент вороху; 4 – скребок; 5 – пруток похилого транспортера; 6 – зірочка приводного вала

Формалізуємо об’єкт дослідження за такими критеріями:

- приймаємо об’єкт дослідження у вигляді стандартного пруткового транспортера, який застосовується у сучасних коренезбиральних машинах [1];

- згідно з [1] приймаємо умову, що компоненти вороху 3 (рис. 3.4), які надходять до похилого транспортера 1 розміщуються на поверхні прутків 5 робочої гілки 2 між скребками 4 в одиничний шар – максимальні умови просіювання вільних домішок у зазор між прутками 5;

- приймаємо положення, що компоненти вороху 3 переміщуються по робочій гілці 2 з постійною швидкістю $\vartheta_в = const$, при цьому швидкість руху робочої гілки також є постійною – $\vartheta_m = 0{,}5\omega_m d_v = const$, де: $\omega_m$ – кутова швидкість приводного вала 6, рад/с; $d_v$ – діаметр ведучої зірочки 6 приводного вала, м;

- моделюємо процес переміщення компонентів вороху 3 під час його сходження з поверхні скребка 4 до очисної гірки 2 (рис. 2.7) одним суцільним нерозривним потоком [272];

- припускаємо, що висота $h_в$ одиничного шару компонентів вороху 3 не перевищує висоту $h_c$ скребка 4 – усунення скочування вороху вниз.

Для моделювання першої ((***1***), рис. 3.4) стадії, або процесу переміщення компонента вороху (у подальшому – компонента) до вихідної зони, або до початку його сходження з скребка похилого транспортера приймаємо постулат, що компонент елементарною масою $dm_в$ переміщується скребком похилого транспортера у просторі системи координат $xOy$ на елементарну відстань $dx/\cos\varepsilon$, де $\varepsilon$ – кут встановлення похилого транспортера відносно осі $Ox$, град.

На елементарну масу $dm_в$ компонента діють такі сили, рис. 3.4а, б: сила ваги $G_в = m_в g$ (Н) компонента 3; сила тиску $\vec{F}_c = dm_в g \eta_c f_c$ (Н) компонента 3 на бокову стінку скребка 4; сила тертя $F_m = N_n f_m$ (Н) компонента 3 по прутках 5; сила переміщення $F_в = dm_в a_в$ (Н) компонента 3 вздовж осьової лінії похилого транспортера 1; сила нормальної реакції $N_n$ (Н) прутка 4 на компонент 3.

Нехай у початковий момент часу попадання компонента на поверхню прутків його швидкість дорівнює нулю, тобто $t_0 = 0$, $\vartheta_{0в} = 0$.

При цьому, набута робоча поступальна швидкість $\vartheta_в$ переміщення елементарної маси $dm_в$ компонента робочою гілкою транспортера за деякий час руху $t$ з урахуванням наявних чинників (запізнення руху елементарної маси $dm_в$ компонента за рахунок ковзання, часткового зсунення вниз, коливання прутків тощо) дорівнює $\vartheta_в = \vartheta_m k_\vartheta$, де $k_\vartheta$ – коефіцієнт, який враховує час запізнення руху елементарної маси $dm_k$ компонента під кутом до горизонту [273].

Рівняння рівноваги сил, які діють на елементарну масу компонента $dm_в$ на осі $Oy$ і $Ox$ під час елементарного переміщенні $dx$, мають вигляд (рис. 3.4)

$$\begin{cases} N_n \cos\varepsilon - G_в + F_в \sin\varepsilon - F_m \sin\varepsilon - F_c \sin\varepsilon = 0_{Oy} \\ F_в \cos\varepsilon - N_n \cos\varepsilon - F_m \cos\varepsilon - F_c \cos\varepsilon = 0_{Ox} \end{cases}; \quad (3.41)$$

$$\begin{cases} N_n \cos\varepsilon - (dm_в)g + (dm_в)a_в \sin\varepsilon - N_n f_m \sin\varepsilon - \eta_c (dm_в) g f_c \sin\varepsilon = 0_{Oy} \\ (dm_в)a_в \cos\varepsilon - N_n \cos\varepsilon - N_n f_m \cos\varepsilon - \eta_c (dm_в) g f_c \cos\varepsilon = 0_{Ox} \end{cases}, \quad (3.42)$$

де $g$ – прискорення сили тяжіння, м/с$^2$;

$a_в = (d\vartheta_в / dt_в)k_\vartheta$ – прискорення компонента вороху, м/с$^2$;

$f_m$ – коефіцієнт тертя компонента вороху по поверхні прутка;

$\eta_c$ – коефіцієнт бокового тиску компонента вороху на скребок [274];

$f_c$ – коефіцієнт внутрішнього тертя.

Згідно з [275] – коефіцієнт бокового тиску $\eta_c$ компонента вороху на скребок визначається за формулою

$$\eta_c = \left( \frac{1,2 + tg\varepsilon}{1 + 2tg^2\varepsilon} \right) \psi, \quad (3.43)$$

де $\psi$ = 0,6…0,8 – емпіричний коефіцієнт [276].

Для розроблення рівняння руху елементарної маси $dm_в$ компонента вороху робочою гілкою похилого транспортера скористаємося системою рівнянь (3.42) і рівнянням (3.43):

- замінимо у другому рівнянні системи (3.42) значення сили нормальної реакції $N_n$ на її вираз, який визначено із першого рівняння;

- також у друге рівняння (3.41) підставимо значення $\eta_c$ з (3.43).

При цьому після перетворення та спрощення залежності (додаток В.1.2), отримано диференціальне рівняння руху компонента на елементарному шляху $dx$ з початкового стану, за якого $\vartheta_{0в} = 0$, до набуття компонентом робочої поступальної швидкості руху $\vartheta_в = \vartheta_m k_\vartheta$ за час переміщення $t_в = t + \tau$, де $\tau$ – час запізнення руху компонента відносно теоретичного часу $t$ його переміщення на елементарному шляху $dx$, тобто

$$\frac{d^2x}{d\left(t+\tau\right)^2}=\frac{d\vartheta_в}{d\left(t+\tau\right)}=\frac{g\left(\cos\varepsilon+\sin\varepsilon\right)}{\cos\varepsilon-f_m\sin\varepsilon}\times$$
$$\times\left[\left(\frac{2tg^2\varepsilon+tg\varepsilon+2,2}{\left(1+2tg^2\varepsilon\right)\left(\cos\varepsilon-f_m\sin\varepsilon\right)}\right)\psi f_c\left[\left(1-f_m\right)\sin\varepsilon\right]+1\right]. \quad (3.44)$$

Виключивши з рівняння (3.44) час $d\left(t+\tau\right)=dx/\vartheta_в$, отримаємо залежність для визначення шляху за якого компонент вороху набуває робочої поступальної швидкості руху $\vartheta_в=\vartheta_m k_\vartheta$, який буде рівнозначний шляху ковзання компонента, або мінімально-необхідній робочій довжині $l_{m.\min}$ (м) похилого транспортера, при цьому маємо:

$$\frac{d^2x}{d^2x/\vartheta_в^2}=\frac{d\vartheta_в}{dx/\vartheta_в}=\frac{g\left(\cos\varepsilon+\sin\varepsilon\right)}{\cos\varepsilon-f_m\sin\varepsilon}\times$$
$$\times\left[\left(\frac{2tg^2\varepsilon+tg\varepsilon+2,2}{\left(1+2tg^2\varepsilon\right)\left(\cos\varepsilon-f_m\sin\varepsilon\right)}\right)\psi f_c\left[\left(1-f_m\right)\sin\varepsilon\right]+1\right]; \quad (3.45)$$

$$\vartheta_в d\vartheta_в=\frac{g\left(\cos\varepsilon+\sin\varepsilon\right)}{\cos\varepsilon-f_m\sin\varepsilon}\times$$
$$\times\left[\left(\frac{2tg^2\varepsilon+tg\varepsilon+2,2}{\left(1+2tg^2\varepsilon\right)\left(\cos\varepsilon-f_m\sin\varepsilon\right)}\right)\psi f_c\left[\left(1-f_m\right)\sin\varepsilon\right]+1\right]dx, \quad (3.46)$$

або після інтегрування правої частини рівняння (3.46) в межах від $\vartheta_{0в}=0$ до $\vartheta_в=\vartheta_m k_\vartheta$, а лівої частини – від 0 до $l_{m.\min}$, отримаємо:

$$\int_{\vartheta_{0в}}^{\vartheta_m k_\vartheta}\vartheta_в d\vartheta_в=$$
$$=\int_0^{l_{m.\min}}\frac{g\left(\cos\varepsilon+\sin\varepsilon\right)}{\cos\varepsilon-f_m\sin\varepsilon}\left[\left(\frac{2tg^2\varepsilon+tg\varepsilon+2,2}{\left(1+2tg^2\varepsilon\right)\left(\cos\varepsilon-f_m\sin\varepsilon\right)}\right)\psi f_c\left[\left(1-f_m\right)\sin\varepsilon\right]+1\right]dx; \quad (3.47)$$

$$\vartheta_m^2k_\vartheta^2=2l_{m.\min}\frac{g\left(\cos\varepsilon+\sin\varepsilon\right)}{\cos\varepsilon-f_m\sin\varepsilon}\left[\left(\frac{2tg^2\varepsilon+tg\varepsilon+2,2}{\left(1+2tg^2\varepsilon\right)\left(\cos\varepsilon-f_m\sin\varepsilon\right)}\right)\psi f_c\left[\left(1-f_m\right)\sin\varepsilon\right]+1\right]; \quad (3.48)$$

$$l_{m.\min}=\frac{\vartheta_m^2 k_\vartheta^2}{2\dfrac{g\left(\cos\varepsilon+\sin\varepsilon\right)}{\cos\varepsilon-f_m\sin\varepsilon}\left[\left(\dfrac{2tg^2\varepsilon+tg\varepsilon+2,2}{\left(1+2tg^2\varepsilon\right)\left(\cos\varepsilon-f_m\sin\varepsilon\right)}\right)\psi f_c\left[\left(1-f_m\right)\sin\varepsilon\right]+1\right]}. \quad (3.49)$$

Відомо [1, 277], що значення висоти $h_в$ одиничного шару компонентів вороху, який переміщується прутковим похилим транспортером обмежується граничною висотою $h_{\max}$, яка регламентується умовою не скочування, або не сковзання вороху з поверхні робочої гілки, яка встановлена під деяким кутом до горизонту.

При цьому гранична висота $h_{\max}$ одиничного шару вороху визначається за формулою:

$$h_{\max}=B_m\frac{k_з-tg\varepsilon}{\eta_c f_m};\ k_з=\psi\left(f_m+\frac{\tau_0}{h_c\rho_в g}\right), \quad (3.50)$$

де $B_m$ – ширина пруткового транспортера, м;

$k_з$ – коефіцієнт зчеплення компонента з прутками транспортера;

$\tau_0$ – початковий опір зсуву, Н/м$^2$;

$\rho_в$ – об’ємна маса компонента вороху, кг/м$^3$.

На основі (3.43), (3.50) та $f_m=tg\varepsilon$ [275], отримано залежність для визначення допустимої граничної висоти одиничного шару компонентів, які розташовуються на робочій гільці похилого транспортера

$$h_{\max}=B_m\frac{\left(1+2tg^2\varepsilon\right)\left[\psi\left(tg\varepsilon+\dfrac{\tau_0}{h_c\rho_в g}\right)-tg\varepsilon\right]}{\left(1,2+tg\varepsilon\right)\psi tg\varepsilon}, \quad (3.51)$$

де порядок виведення залежності (3.51) наведено у додатку В.2.2.

Для визначення необхідної теоретичної швидкості руху робочої гілки похилого транспортера $\vartheta_m$ застосуємо відому формулу продуктивності пруткового скребкового транспортера, який розташований під певним кутом до горизонту.

Згідно з [278] продуктивність роботи $d\Pi_m / dt$ (кг/с) транспортних машин безперервної дії визначається за формулою

$$\frac{d\Pi_m}{dt} = F_k \vartheta_m k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з, \tag{3.52}$$

де $F_k = B_m h_{\max}$ – площа поперечного перерізу одиничного шару вантажу, м$^2$;

$k_\varepsilon$ – коефіцієнт кута нахилу транспортера до горизонту;

$\xi_з$ – коефіцієнт заповнення об'ємного простору робочої гілки завантажувального транспортера.

Технологічна ефективність роботи ОТТМ у першу чергу та в першому наближенні залежить від ефективності роботи похилого транспортера, або виконання умови, за якої продуктивність похилого пруткового транспортера $d\Pi_m / dt$ буде більша або рівна секундній подачі складових компонентів вороху $d\Pi_B / dt$, який надходить із попередньої транспортно-технологічної системи коренезбиральної машини, тобто $d\Pi_m / dt \geq d\Pi_B / dt$.

Тоді, згідно з (3.51), (3.52) та умови оптимізації $\frac{d\Pi_m}{dt} \geq \frac{d\Pi_B}{dt}$ маємо

$$\frac{d\Pi_m}{dt} = \frac{\left(1+2tg^2\varepsilon\right)\left[\psi\left(tg\varepsilon + \frac{\tau_0}{h_c \rho_в g}\right) - tg\varepsilon\right]}{\left(1,2+tg\varepsilon\right)\psi tg\varepsilon} B_m^2 \vartheta_m k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з \geq \frac{d\Pi_в}{dt}, \tag{3.53}$$

або у нашому випадку згідно з рівнянням (2.41), або рівнянням (2.42) необхідне виконання умови, відповідно:

$$\begin{aligned} B_m h_{\max} \vartheta_m k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з \geq{}& \frac{2\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_k^2 \left(1-\lambda_{вk}\right) N_k \left(\frac{D_k}{2\sin\left(0,5\varphi_k\right)} - h_k\right) + \\ &+ \frac{a_\vartheta}{t} \rho_г \lambda_{вг} N_k \left[\frac{D_\partial^2 \sin\gamma_\partial}{4} \arccos\left(2h_\partial / D_\partial\right) - \frac{h_\partial D_\partial}{2}\right] - \\ &- \frac{2\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_n^2 N_k \left(\frac{d_k}{2\sin\left(0,5\varphi_k\right)} - h_n\right) + 2\frac{da_\vartheta}{dt} \lambda_p N_k \sin\gamma_\partial \sqrt{h_\partial\left(D_\partial - h_\partial\right)} B_г \left(\mu+\eta\right) \end{aligned} \tag{3.54}$$

$$B_m h_{\max} \vartheta_m k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з \geq B_k \frac{da_\vartheta}{dt} b_м \left(1-\lambda_{вк}\right) N_k +$$

$$+\frac{a_\vartheta}{t}\rho_г \lambda_{вг} N_k \left[\frac{D_\partial^2 \sin\gamma_\partial}{4}\arccos\left(2h_\partial / D_\partial\right) - \frac{h_\partial D_\partial}{2}\right] - \quad . \qquad (3.55)$$

$$-B_k \frac{da_\vartheta}{dt} b_м N_k K_{m_n/m_K} + 2\frac{da_\vartheta}{dt}\lambda_p N_k \sin\gamma_\partial \sqrt{h_\partial\left(D_\partial - h_\partial\right)} B_г \left(\mu+\eta\right)$$

Із рівнянь (3.54) і (3.55) визначено необхідну швидкість руху $\vartheta_m$ робочої гілки похилого транспортера ОТТМ, тобто:

- залежно від геометричних розмірів диска та біологічних параметрів коренеплодів

$$\vartheta_m \geq \frac{1}{B_m h_{\max} k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з} \left[\begin{array}{l} \frac{2\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_k^2 \left(1-\lambda_{вк}\right) N_k \left(\frac{D_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_k\right) + \\ +\frac{a_\vartheta}{t}\rho_г \lambda_{вг} N_k \left[\frac{D_\partial^2 \sin\gamma_\partial}{4}\arccos\left(2h_\partial / D_\partial\right) - \frac{h_\partial D_\partial}{2}\right] - \\ -\frac{2\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_n^2 N_k \left(\frac{d_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_n\right) + \\ +2\frac{da_\vartheta}{dt}\lambda_p N_k \sin\gamma_\partial \sqrt{h_\partial\left(D_\partial - h_\partial\right)} B_г \left(\mu+\eta\right) \end{array}\right]; \quad (3.56)$$

- залежно від біологічної урожайності коренеплодів і гички

$$\vartheta_m \geq \frac{1}{B_m h_{\max} k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з} \left[\begin{array}{l} B_k \frac{da_\vartheta}{dt} b_м \left(1-\lambda_{вк}\right) N_k + \\ +\frac{a_\vartheta}{t}\rho_г \lambda_{вг} N_k \left[\frac{D_\partial^2 \sin\gamma_\partial}{4}\arccos\left(2h_\partial / D_\partial\right) - \frac{h_\partial D_\partial}{2}\right] - \\ -B_k \frac{da_\vartheta}{dt} b_м N_k K_{m_n/m_K} + 2\frac{da_\vartheta}{dt}\lambda_p N_k \sin\gamma_\partial \sqrt{h_\partial\left(D_\partial - h_\partial\right)} B_г \left(\mu+\eta\right) \end{array}\right]. \quad (3.57)$$

Підставивши значення $h_{\max}$ з (3.51) у рівняння (3.56) та (3.57), отримаємо кінцеві залежності для визначення необхідної поступальної швидкості $\vartheta_m$ робочої гілки похилого транспортера, за якої буде забезпечуватися не тільки його технологічна ефективність роботи, а й працездатність функціонування всього ОТТМ

- залежно від геометричних розмірів диска та коренеплодів

$$\vartheta_m \geq \frac{1,2+tg\varepsilon}{B_m^2\psi k_\vartheta \rho_k k_\varepsilon \xi_з \left(1+2tg^2\varepsilon+\frac{\tau_0}{h_c\rho_k g tg\varepsilon}+2tg\varepsilon\frac{\tau_0}{h_c\rho_k g}-\frac{1}{\psi}\right)}\times$$

$$\times\left[\begin{array}{l}\frac{2\pi\rho_k}{3t}q_k^{(1)}h_k^2\left(1-\lambda_{вк}\right)N_k\left(\frac{D_k}{2\sin\left(0,5\varphi_k\right)}-h_k\right)+\frac{a_\vartheta}{t}\rho_г\lambda_{вг}N_k\times \\ \times\left[\frac{D_д^2\sin\gamma_д}{4}\arccos\left(2h_д/D_д\right)-\frac{h_д D_д}{2}\right]-\frac{2\pi\rho_k}{3t}q_k^{(1)}h_n^2N_k\left(\frac{d_k}{2\sin\left(0,5\varphi_k\right)}-h_n\right)+ \\ +2\frac{da_\vartheta}{dt}\lambda_p N_k\sin\gamma_д\sqrt{h_д\left(D_д-h_д\right)}B_г\left(\mu+\eta\right)\end{array}\right]; \quad (3.58)$$

- залежно від біологічної урожайності коренеплодів і гички

$$\vartheta_m \geq \frac{1,2+tg\varepsilon}{B_m^2\psi k_\vartheta \rho_k k_\varepsilon \xi_з \left(1+2tg^2\varepsilon+\frac{\tau_0}{h_c\rho_k g tg\varepsilon}+2tg\varepsilon\frac{\tau_0}{h_c\rho_k g}-\frac{1}{\psi}\right)}\times$$

$$\times\left[\begin{array}{l}B_k\frac{da_\vartheta}{dt}b_м\left(1-\lambda_{вк}\right)N_k+\frac{a_\vartheta}{t}\rho_г\lambda_{вг}N_k\left[\frac{D_д^2\sin\gamma_д}{4}\arccos\left(2h_д/D_д\right)-\frac{h_д D_д}{2}\right]- \\ -B_k\frac{da_\vartheta}{dt}b_м N_k K_{m_п/m_К}+2\frac{da_\vartheta}{dt}\lambda_p N_k\sin\gamma_д\sqrt{h_д\left(D_д-h_д\right)}B_г\left(\mu+\eta\right)\end{array}\right]. \quad (3.59)$$

З рівняння (3.53) визначаємо висоту скребка $h_c$ похилого транспортера, при цьому маємо

$$h_c=\frac{\tau_0\left(1+2tg^2\varepsilon\right)}{\left[\frac{d\Pi_m}{dt}\frac{\left(1,2+tg\varepsilon\right)}{B_m^2\vartheta_m k_\vartheta k_\varepsilon \xi_з}-\rho_в\left(1+2tg^2\varepsilon\right)\left(1+\frac{1}{\psi}\right)\right]gtg\varepsilon}, \quad (3.60)$$

де порядок виведення рівняння (3.60) наведено у додатку В.3.2.

На рис. 3.5а наведено залежність для визначення робочої швидкості руху похилого транспортера $\vartheta_m$ за умови раціонального функціонування похилого транспортера в першому наближенні та яку побудовано за наступною виведеною формулою

$$\vartheta_m \geq \frac{d\Pi_m}{dt} / \frac{\left(1+2tg^2\varepsilon\right)\left[\psi\left(tg\varepsilon+\dfrac{\tau_0}{h_c\rho_в g}\right)-tg\varepsilon\right]}{\left(1,2+tg\varepsilon\right)\psi tg\varepsilon} B_m^2 k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з, \qquad (3.61)$$

яку визначено з залежності (3.53).

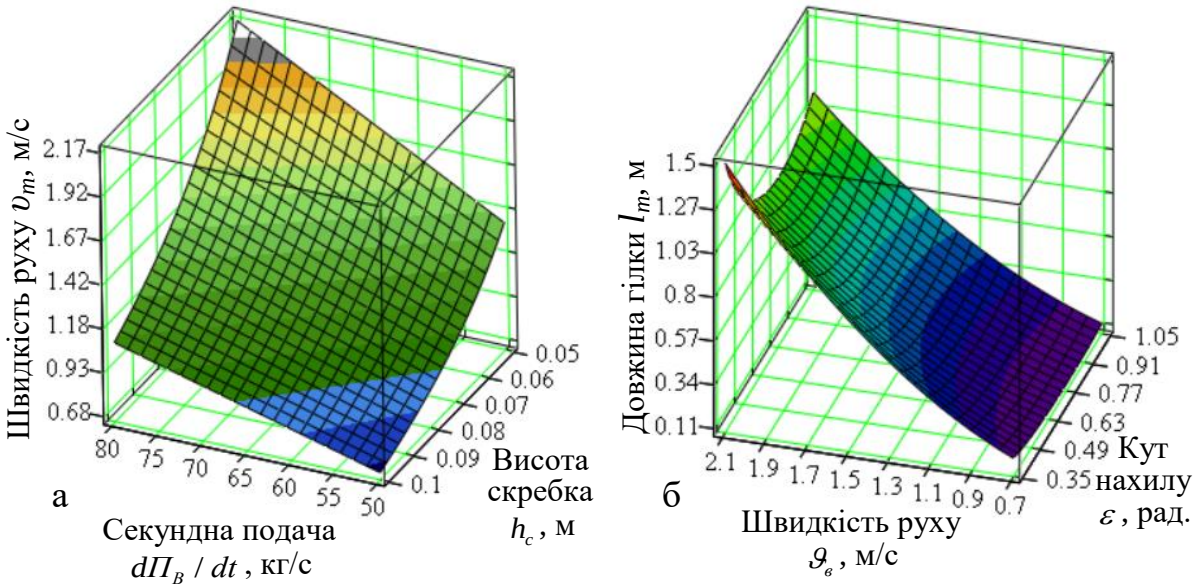



Рисунок 3.5 – Функціональна залежність зміни: а – робочої швидкості руху похилого транспортера як функція $\vartheta_m \geq f\left(d\Pi / dt, h_c\right)$; б – мінімально-необхідної довжини робочої гілки похилого транспортера як функція $l_{m.\min} \geq f\left(\vartheta_m, \varepsilon\right)$, $B_m = 0{,}9$ м

На рис. 3.5б наведено залежність для визначення мінімально-необхідної робочої довжини $l_{m.\min}$ робочої гілки похилого транспортера, або шляху за якого компонент вороху набуває робочої поступальної швидкості руху (переміщення) від $\vartheta_{0в} = 0$ до $\vartheta_в = \vartheta_m k_\vartheta$. При цьому довжина $l_{m.\min}$ буде рівнозначна шляху ковзання компонента вороху, яку побудовано згідно з рівнянням (3.49).

Можна констатувати, що в першому наближенні для забезпечення умови раціонального функціонування похилого транспортера згідно з (3.53), або зміни секундної подачі вороху $d\Pi_B / dt$ до похилого транспортера в межах від 50 до 80 кг/с швидкість руху похилого транспортера повинна знаходитися в межах від 0,7 до 2,1 м/с за зміни висоти скребка від 0,05 до 0,1 м (рис. 3.5а).

При цьому, мінімально-необхідна робоча довжина $l_{m.\min}$ похилого транспортера, за якої буде забезпечуватися технологічна стійкість роботи, повинна бути більша або рівна 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 0,7 до 1,9 м/с, рис. 3.5б.

Для узгодження основних параметрів похилого транспортера, за яких відбуватиметься раціональне функціонування ОТТМ у першому наближенні, побудовано номограму, яку наведено на рис. 3.6.

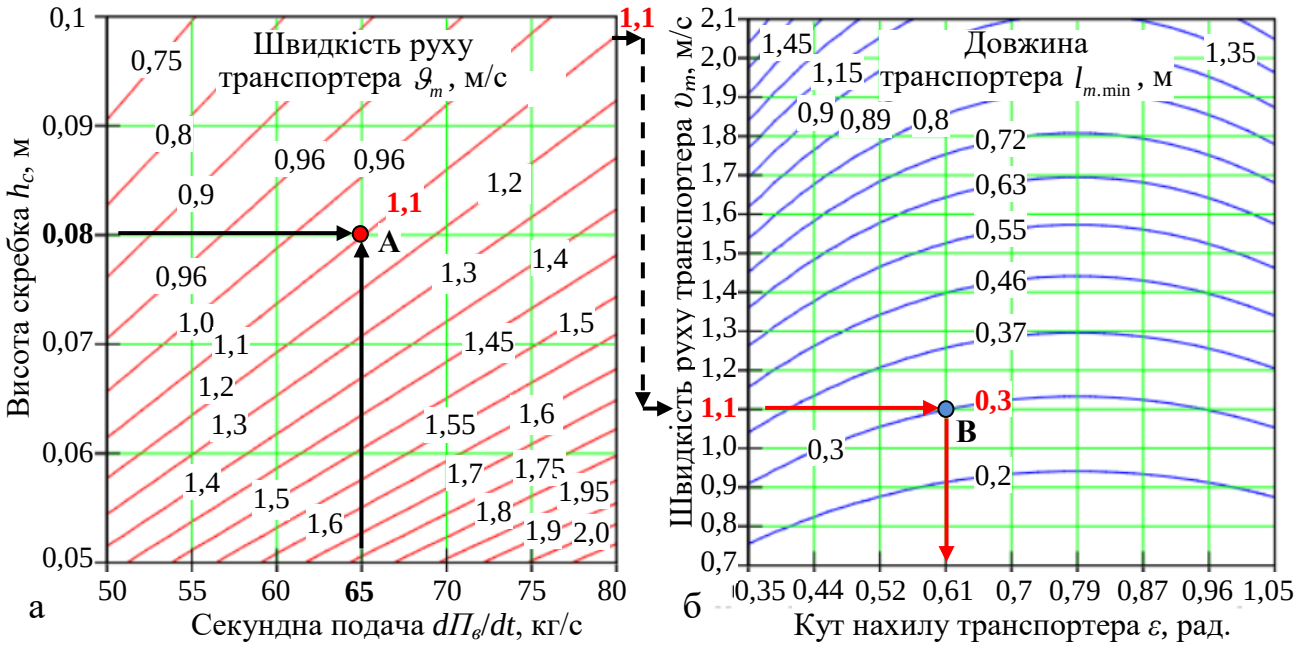



Рисунок 3.6 – Номограма для визначення основних параметрів завантажувального транспортера: а – залежність $\vartheta_m \geq f\left(d\Pi_B / dt; h_c\right)$; б – залежність $l_m \geq f\left(\vartheta_m; \varepsilon\right)$

Порядок визначення основних параметрів завантажувального транспортера в першому наближенні є наступним.

1. Наприклад, секундна подача компонентів вороху до похилого транспортера становить $d\Pi_B / dt$ = 65 кг/с (рис. 3.6а), а висота скребка стандартного скребкового транспортера рівна $h_c$ = 0,08 м [277, 278].

Тоді на пересічені ліній (точка А), проведених з відповідних значень координатних осей секундної подачі та висоти скребка отримуємо значення швидкості руху похилого транспортера $\vartheta_m \geq$ 1,1 м/с.

2. На рис. 3.6б знаходимо координатне значення швидкості руху похилого транспортера рівне $\vartheta_m$ = 1,1 м/с та проводимо пряму лінію до пересічення з першою лінією залежності $l_m \geq f\left(\vartheta_m, \varepsilon\right)$, яка відповідає значенню довжини ковзання, або значенню мінімально-необхідної довжини транспортера $l_m \geq$ 0,85 м.

З точки пересічення цих ліній (точка В) проводимо пряму лінію до пересічення із координатою кута нахилу $\varepsilon$ транспортера до горизонту, при цьому координатне значення кута нахилу транспортера до горизонту дорівнює $\varepsilon$ = 0,61 рад., або приблизно $\varepsilon$ = 35 град.

Крім того у другому наближенні умову багатостадійної оптимізації конструктивно-кінематичних параметрів похилого транспортера для забезпечення раціонального функціонування робочих органів ОТТМ, яку запропоновано акад. Л. Погорілим та яка реалізується за принципом Р. Беллмана, або принципом оптимальності [167] на основі функції та рівняння Беллмана, яке являє собою рекурентне відношення, що зв'язує стани системи, можна сформулювати таким чином:

- на 1-й стадії (рис. 3.4) першої ділянки (***1***): пропускна здатність $\frac{dW_{1m}}{dt}$ першої ділянки (***1***) робочої гілки похилого транспортера 1 (рис. 3.1) повинна бути більшою або рівною секундній подачі компонентів вороху, які надходять від МВК з урахуванням фізичної кількості відокремлюваних структурних компонентів домішок від коренеплодів на шляху переміщення вороху робочою гілкою (***1***) ділянки похилого транспортера;

- на завершальній (***k***)-ї стадії першої ділянки ***(1)***: пропускна здатність $\frac{dW_{km}}{dt}$ *k*-ї ділянки (***k***) робочої гілки похилого транспортера 1 (рис. 3.1) повинна бути більшою або рівна секундній подачі компонентів вороху, які надходять від попередньої (***k-1***) ділянки із урахуванням фізичної (масової) кількості відокремлюваних структурних компонентів домішок від коренеплодів на шляху переміщення вороху робочою гілкою ділянки (***k-1***) похилого транспортера.

При цьому умову оптимізації раціонального функціонування похилого транспортера та ОТТМ загалом записано у вигляді системи диференціальних виразів

$$\left.\begin{array}{l}
\dfrac{dW_{1m}}{dt_1}=\sum\limits_{i=1}^{N_k}\dfrac{d\Pi_{ЧКi}}{dt}+\sum\limits_{i=1}^{N_k}\dfrac{d\Pi_{Дi}}{dt}-\sum\limits_{j=1}^{4}\dfrac{d\Delta\Pi_{1iB.Д}}{dt_1}\geq\sum\limits_{i=1}^{N_k}\dfrac{d\Pi_{Bi}}{dt};\\
\sum\limits_{j=1}^{4}\dfrac{d\Delta\Pi_{1iB.Д}}{d\left(t_1\right)}=f_1(x_1,x_2,...,x_i)\rightarrow\max;\\
\dfrac{dW_{2m}}{dt_2}=\sum\limits_{i=1}^{N_k}\dfrac{d\Pi_{ЧКi}}{dt}+\sum\limits_{i=1}^{N_k}\dfrac{d\Pi_{1Дi}}{dt_1}-\sum\limits_{j=1}^{4}\dfrac{d\Delta\Pi_{2iB.Д}}{d\left(t_2\right)}\geq\sum\limits_{i=1}^{N_k}\dfrac{d\Pi_{1Bi}}{dt_1};\\
\sum\limits_{j=1}^{4}\dfrac{d\Delta\Pi_{2iB.Д}}{d\left(t_2\right)}=f_2(x_1,x_2,...,x_i)\rightarrow\max;\\
.....;\\
\dfrac{dW_{km}}{dt_1}=\sum\limits_{i=1}^{N_k}\dfrac{d\Pi_{ЧКi}}{dt}+\sum\limits_{i=1}^{N_k}\dfrac{d\Pi_{(k-1)Дi}}{dt_{(k-1)}}-\sum\limits_{j=1}^{4}\dfrac{d\Delta\Pi_{kiB.Д}}{d\left(t_k\right)}\geq\sum\limits_{i=1}^{N_k}\dfrac{d\Pi_{kBi}}{dt_k};\\
\sum\limits_{j=1}^{4}\dfrac{d\Delta\Pi_{kiB.Д}}{d\left(t_k\right)}=f_k(x_1,x_2,...,x_i)\rightarrow\max
\end{array}\right\},\qquad(3.62)$$

де $dW_{1m}/dt_1$, $dW_{2m}/dt_2$,…, $dW_{km}/dt_k$ – пропускна здатність 1, 2,…,*k*-ї ділянки робочої гілки похилого транспортера, кг/с;

$\sum\limits_{i=1}^{N_k}d\Pi_{1Bi}/dt_1$, $\sum\limits_{i=1}^{N_k}d\Pi_{2Bi}/dt_2,\ldots,\sum\limits_{i=1}^{N_k}d\Pi_{kBi}/dt_k$; $\sum\limits_{i=1}^{N_k}d\Pi_{Дi}/dt$, $\sum\limits_{i=1}^{N_k}d\Pi_{1Дi}/dt_1,\ldots,\sum\limits_{i=1}^{N_k}d\Pi_{(k-1)Дi}/dt_{(k-1)}$ – відповідно, секундна подача вороху та домішок, відповідно, з першої ділянки (***1***) до другої ділянки (***2***), з другої ділянки (***2***) до ділянки (***k-1***), з ділянки (***k-1***) до ***k***-ї ділянки робочої гілки похилого транспортера, кг/с;

$\sum\limits_{i=1}^{N_k}d\Pi_{ЧКi}/dt=const$ – секундна подача коренеплодів з МВК до 1, 2,…,*k*-ї ділянки робочої гілки похилого транспортера за прийнятої умови, кг/с;

$\sum\limits_{j=1}^{4}d\Delta\Pi_{1iB.Д}/dt_1$, $\sum\limits_{j=1}^{4}d\Delta\Pi_{2iB.Д}/dt_2,\ldots,\sum\limits_{j=1}^{4}d\Delta\Pi_{kiB.Д}/dt_k$ – секундна кількість відокремлених структурних компонентів домішок від коренеплодів відповідно,

1, 2,…, *k*-ю ділянкою робочої гілки похилого транспортера, кг/с;

$x_1$, $x_2$,… $x_i$ – невизначені параметри робочих органів похилого транспортера.

Приймаємо положення, що пропускна здатність будь-якого транспортуючого технічного пристрою неперервної дії, є за своєю технологічною суттю продуктивністю роботи цього транспортуючого технічного пристрою.

Тоді, враховуючи рівняння (3.40) систему диференціальних рівнянь (3.62) можна записати у вигляді

$$\left.\begin{array}{l} Q_{1mв} = Q_k + Q_{\partial} - \Delta Q_{1в.\partial} \geq Q_в;\ \ \Delta Q_{1в.\partial} = f_1(x_1, x_2, ..., x_i) \to \max; \\ Q_{2m} = Q_k + Q_{1\partial} - \Delta Q_{2в.\partial} \geq Q_{1в};\ \ \Delta Q_{2в.\partial} = f_2(x_1, x_2, ..., x_i) \to \max; \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots; \\ Q_{km} = Q_k + Q_{(k-1)\partial} - \Delta Q_{кв.\partial} \geq Q_{(k-1)в};\ \ \Delta Q_{кв.\partial} = f_k(x_1, x_2, ..., x_i) \to \max \end{array}\right\}, \qquad (3.63)$$

або

$$\left.\begin{array}{l} Q_{1m} = Q_k + Q_{\partial}\left(1 - \mu_{в.\partial}^{(1)}\right) \geq Q_в; \\ Q_{2m} = Q_k + Q_{1\partial}\left(1 - \mu_{в.\partial}^{(2)}\right) \geq Q_{1в}; \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots; \\ Q_{km} = Q_k + Q_{(k-1)\partial}\left(1 - \mu_{в.\partial}^{(k)}\right) \geq Q_{(k-1)в} \end{array}\right\}, \qquad (3.64)$$

де $\Delta Q_{1в.\partial}$, $\Delta Q_{2в.\partial}, \ldots, \Delta Q_{кв.\partial}$ – секундна кількість відокремлених компонентів домішок відповідно, 1, 2,…,*k*-ю ділянкою робочої гілки похилого транспортера, кг/с;

$\ldots . \mu_{в.\partial}^{(1)}$, $\mu_{в.\partial}^{(2)}, \ldots, \mu_{в.\partial}^{(k)}$ – коефіцієнт, який регламентує ступінь відокремлених компонентів домішок відповідно, 1, 2,…,*k*-ю ділянкою робочої гілки похилого транспортера.

Також для подальшому проведення досліджень необхідно врахувати наявні рівняння, які було встановлено на основі відомих залежностей і які отримано під час дослідження секундної подачі вороху, або:

- для визначення продуктивності похилого транспортера (3.52);

- секундної подачі чистих коренеплодів (2.23) і (2.24);

- секундної подачі домішок (2.39) і (2.40);

Тоді систему рівнянь (3.64) можна записати у вигляді:

- залежно від геометричних параметрів сферичного диска та розмірних агробіологічних параметрів коренеплодів

$$\left.\begin{array}{l}
B_m h_{1\max} \vartheta_{1m} k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з = \left[\dfrac{2\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_k^2 \left(1-\lambda_{вk}\right) N_k \left(\dfrac{D_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_k\right)\right] + \\
+\left[\begin{array}{l}\dfrac{a_\vartheta}{4t}\rho_г \lambda_{вг} N_k \left[D_д^2 \sin\gamma_д \arccos\left(2h_д / D_д\right) - h_д D_д\right] - \\ -\dfrac{\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_n^2 N_k \left(\dfrac{d_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_n\right) + \vartheta_M \lambda_p N_k \sin\gamma_д \sqrt{h_д\left(D_д - h_д\right)} B_г \left(\mu+\eta\right)\end{array}\right] \times \\
\times 2\left(1-\mu_{в.д}^{(1)}\right) \ge Q_в; \\
B_m h_{2\max} \vartheta_{2m} k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з = \left[\dfrac{2\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_k^2 \left(1-\lambda_{вk}\right) N_k \left(\dfrac{D_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_k\right)\right] + \\
+\left[\begin{array}{l}\dfrac{a_\vartheta}{4t}\rho_г \lambda_{вг} N_k \left[D_д^2 \sin\gamma_д \arccos\left(2h_д / D_д\right) - h_д D_д\right] - \\ -\dfrac{\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_n^2 N_k \left(\dfrac{d_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_n\right) + \vartheta_M \lambda_p N_k \sin\gamma_д \sqrt{h_д\left(D_д - h_д\right)} B_г \left(\mu+\eta\right)\end{array}\right] \times \\
\times 2\left(1-\mu_{в.д}^{(2)}\right)\left(1-\mu_{в.д}^{(1)}\right) \ge Q_{1в}; \\
\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots; \\
B_m h_{k\max} \vartheta_{km} k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з = \left[\dfrac{2\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_k^2 \left(1-\lambda_{вk}\right) N_k \left(\dfrac{D_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_k\right)\right] + \\
+\left[\begin{array}{l}\dfrac{a_\vartheta}{4t}\rho_г \lambda_{вг} N_k \left[D_д^2 \sin\gamma_д \arccos\left(2h_д / D_д\right) - h_д D_д\right] - \\ -\dfrac{\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_n^2 N_k \left(\dfrac{d_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_n\right) + \vartheta_M \lambda_p N_k \sin\gamma_д \sqrt{h_д\left(D_д - h_д\right)} B_г \left(\mu+\eta\right)\end{array}\right] \times \\
\times 2\left(1-\mu_{в.д}^{(k)}\right)\left(1-\mu_{в.д}^{(2)}\right)\left(1-\mu_{в.д}^{(1)}\right) \ge Q_{(k-1)в}
\end{array}\right\}. \quad (3.65)$$

- залежно від агробіологічних характеристик коренеплодів (біологічної урожайності коренеплодів і гички)

$$\left.\begin{array}{l}
B_m h_{1\max} \vartheta_{1m} k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з = B_k \vartheta_M b_м \left(1-\lambda_{вk}\right) N_k + \\
+\left[\begin{array}{l} \dfrac{a_\vartheta}{t}\rho_г \lambda_{вг} N_k \left[\dfrac{D_\partial^2 \sin\gamma_\partial}{4}\arccos\left(2h_\partial / D_\partial\right) - \dfrac{h_\partial D_\partial}{2}\right] - \\ -B_k \vartheta_M b_м N_k K_{m_n/m_K} + 2\vartheta_M \lambda_p N_k \sin\gamma_\partial \sqrt{h_\partial\left(D_\partial - h_\partial\right)} B_г\left(\mu+\eta\right)\end{array}\right]\times \\
\times 2\left(1-\mu_{в.\partial}^{(1)}\right) \ge Q_в; \\
B_m h_{2\max} \vartheta_{2m} k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з = B_k \vartheta_M b_м \left(1-\lambda_{вk}\right) N_k + \\
+\left[\begin{array}{l} \dfrac{a_\vartheta}{t}\rho_г \lambda_{вг} N_k \left[\dfrac{D_\partial^2 \sin\gamma_\partial}{4}\arccos\left(2h_\partial / D_\partial\right) - \dfrac{h_\partial D_\partial}{2}\right] - \\ -B_k \vartheta_M b_м N_k K_{m_n/m_K} + 2\vartheta_M \lambda_p N_k \sin\gamma_\partial \sqrt{h_\partial\left(D_\partial - h_\partial\right)} B_г\left(\mu+\eta\right)\end{array}\right]\times \\
\times 2\left(1-\mu_{в.\partial}^{(2)}\right)\left(1-\mu_{в.\partial}^{(1)}\right) \ge Q_{1в}; \\
\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots; \\
B_m h_{k\max} \vartheta_{km} k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з = B_k \vartheta_M b_м \left(1-\lambda_{вk}\right) N_k + \\
+\left[\begin{array}{l} \dfrac{a_\vartheta}{t}\rho_г \lambda_{вг} N_k \left[\dfrac{D_\partial^2 \sin\gamma_\partial}{4}\arccos\left(2h_\partial / D_\partial\right) - \dfrac{h_\partial D_\partial}{2}\right] - \\ -B_k \vartheta_M b_м N_k K_{m_n/m_K} + 2\vartheta_M \lambda_p N_k \sin\gamma_\partial \sqrt{h_\partial\left(D_\partial - h_\partial\right)} B_г\left(\mu+\eta\right)\end{array}\right]\times \\
\times 2\left(1-\mu_{в.\partial}^{(k)}\right)\left(1-\mu_{в.\partial}^{(2)}\right)\left(1-\mu_{в.\partial}^{(1)}\right) \ge Q_{(k-1)в}
\end{array}\right\}. \qquad (3.66)$$

З кожного рівняння системи (3.65) і (3.66) визначаємо необхідну робочу швидкість руху кожної 1, 2,…, *k*-ї ділянки похилого транспортера:

- залежно від геометричних параметрів диска та коренеплодів:

$$\vartheta_{1m} \ge \left[\frac{2\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_k^2 \left(1-\lambda_{вk}\right) N_k \left(\frac{D_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_k\right)\right] + \\
+\left[\begin{array}{l} \dfrac{a_\vartheta}{4t}\rho_г \lambda_{вг} D_\partial N_k \left[D_\partial \sin\gamma_\partial \arccos\left(2h_\partial / D_\partial\right) - h_\partial\right] - \\ -\dfrac{\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_n^2 N_k \left(\dfrac{d_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_n\right) + \\ +\vartheta_M \lambda_p N_k \sin\gamma_\partial \sqrt{h_\partial\left(D_\partial - h_\partial\right)} B_г\left(\mu+\eta\right)\end{array}\right]\times; \qquad (3.67)$$

$$\times \frac{2\left(1-\mu_{в.\partial}^{(1)}\right)}{B_m h_{1\max} k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з}$$

$$\vartheta_{2m} \geq \left[ \frac{2\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_k^2 \left(1-\lambda_{вк}\right) N_k \left( \frac{D_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_k \right) \right] +$$

$$+ \left[ \begin{array}{l} \frac{a_\vartheta}{4t} \rho_г \lambda_{вг} D_\partial N_k \left[ D_\partial \sin\gamma_\partial \arccos\left(2h_\partial / D_\partial\right) - h_\partial \right] - \\ - \frac{\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_n^2 N_k \left( \frac{d_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_n \right) + \\ + \vartheta_M \lambda_p N_k \sin\gamma_\partial \sqrt{h_\partial \left(D_\partial - h_\partial\right)} B_г \left(\mu+\eta\right) \end{array} \right] \times; \qquad (3.68)$$

$$\times \frac{2\left(1-\mu_{в.\partial}^{(1)}\right)\left(1-\mu_{в.\partial}^{(2)}\right)}{B_m h_{2\max} k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з}$$

$$\vartheta_{km} \geq \left[ \frac{2\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_k^2 \left(1-\lambda_{вк}\right) N_k \left( \frac{D_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_k \right) \right] +$$

$$+ \left[ \begin{array}{l} \frac{a_\vartheta}{4t} \rho_г \lambda_{вг} D_\partial N_k \left[ D_\partial \sin\gamma_\partial \arccos\left(2h_\partial / D_\partial\right) - h_\partial \right] - \\ - \frac{\pi\rho_k}{3t} q_k^{(1)} h_n^2 N_k \left( \frac{d_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_n \right) + \\ + \vartheta_M \lambda_p N_k \sin\gamma_\partial \sqrt{h_\partial \left(D_\partial - h_\partial\right)} B_г \left(\mu+\eta\right) \end{array} \right] \times; \qquad (3.69)$$

$$\times \frac{2\left(1-\mu_{в.\partial}^{(1)}\right)\left(1-\mu_{в.\partial}^{(2)}\right)\left(1-\mu_{в.\partial}^{(k)}\right)}{B_m h_{k\max} k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з}$$

- залежно від агробіологічних характеристик крупних коренеплодів (біологічної урожайності коренеплодів і гички):

$$\vartheta_{1m} \geq B_k \vartheta_M b_м \left(1-\lambda_{вк}\right) N_k +$$

$$+ \left[ \begin{array}{l} \frac{a_\vartheta}{t} \rho_г \lambda_{вг} N_k \left[ \frac{D_\partial^2 \sin\gamma_\partial}{4} \arccos\left(2h_\partial / D_\partial\right) - \frac{h_\partial D_\partial}{2} \right] - \\ - B_k \vartheta_M b_м N_k K_{m_n/m_K} + 2\vartheta_M \lambda_p N_k \sin\gamma_\partial \sqrt{h_\partial \left(D_\partial - h_\partial\right)} B_г \left(\mu+\eta\right) \end{array} \right] \times; \quad (3.70)$$

$$\times \frac{2\left(1-\mu_{в.\partial}^{(1)}\right)}{B_m h_{1\max} k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з}$$

$$\vartheta_{2m} \geq B_k \vartheta_M b_м \left(1-\lambda_{вк}\right) N_k +$$
$$+\left[\begin{array}{l} \dfrac{a_\vartheta}{t}\rho_г \lambda_{вг} N_k \left[\dfrac{D_\partial^2 \sin\gamma_\partial}{4}\arccos\left(2h_\partial / D_\partial\right) - \dfrac{h_\partial D_\partial}{2}\right] - \\ -B_k \vartheta_M b_м N_k K_{m_n/m_K} + 2\vartheta_M \lambda_p N_k \sin\gamma_\partial \sqrt{h_\partial\left(D_\partial - h_\partial\right)} B_г \left(\mu+\eta\right) \end{array}\right] \times; \quad (3.71)$$
$$\times \frac{2\left(1-\mu_{в.\partial}^{(1)}\right)\left(1-\mu_{в.\partial}^{(2)}\right)}{B_m h_{2\max} k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з}$$

$$\vartheta_{km} \geq B_k \vartheta_M b_м \left(1-\lambda_{вк}\right) N_k +$$
$$+\left[\begin{array}{l} \dfrac{a_\vartheta}{t}\rho_г \lambda_{вг} N_k \left[\dfrac{D_\partial^2 \sin\gamma_\partial}{4}\arccos\left(2h_\partial / D_\partial\right) - \dfrac{h_\partial D_\partial}{2}\right] - \\ -B_k \vartheta_M b_м N_k K_{m_n/m_K} + 2\vartheta_M \lambda_p N_k \sin\gamma_\partial \sqrt{h_\partial\left(D_\partial - h_\partial\right)} B_г \left(\mu+\eta\right) \end{array}\right] \times. \quad (3.72)$$
$$\times \frac{2\left(1-\mu_{в.\partial}^{(1)}\right)\left(1-\mu_{в.\partial}^{(2)}\right)\left(1-\mu_{в.\partial}^{(k)}\right)}{B_m h_{k\max} k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з}$$

Для проведення практичної оптимізації параметрів робочих органів похилого транспортера в другому наближенні та для конкретних умов роботи ОТТМ скористаємося проведеним аналізом початкових умов, які викладено у підрозділі 2.3 другого розділу роботи.

Встановлено, що за швидкості руху коренезбиральної машини в межах від 1,6 до 2,0 м/с:

- секундна подача чистих коренеплодів до першої ділянки (***1***) похилого транспортера знаходиться в середній межах від 8 до 15 кг/с за зміни діаметра коренеплодів від 0,15 до 0,2 м і довжини коренеплодів 0,2 м;

- секундна подача чистих коренеплодів до першої ділянки (***1***) похилого транспортера знаходиться в середній межах від 10 до 15 кг/с за зміни урожайності коренеплодів від 1,5 до 2,5 кг/м$^2$ (150-250 ц/га) і швидкості руху коренезбиральної машини 1,6 м/с;

- секундна подача домішок до першої ділянки (***1***) похилого транспортера знаходиться в середній межах від 40 до 60 кг/с за зміни діаметра сферичного диска від 0,4 до 0,46 м і довжини коренеплодів 0,15 і глибини його ходу 0,09 м.

- секундна подача домішок до першої ділянки (***1***) похилого транспортера знаходиться в середній межах від 30 до 40 кг/с за зміни урожайності гички від 0,6 до 1,2 кг/ м$^2$ (60-120 ц/га) і урожайності коренеплодів 2,5 кг/м$^2$, або 250 ц/га.

На рис. 3.7 наведено графічну інтерпретацію залежності зміни необхідної робочої швидкості руху кожної 1, 2,…,*k*-ї ділянки робочої гілки похилого транспортера як функція $\vartheta_{im} = f_\vartheta(Q_\partial, \mu_{в.\partial}^{(i)})$.

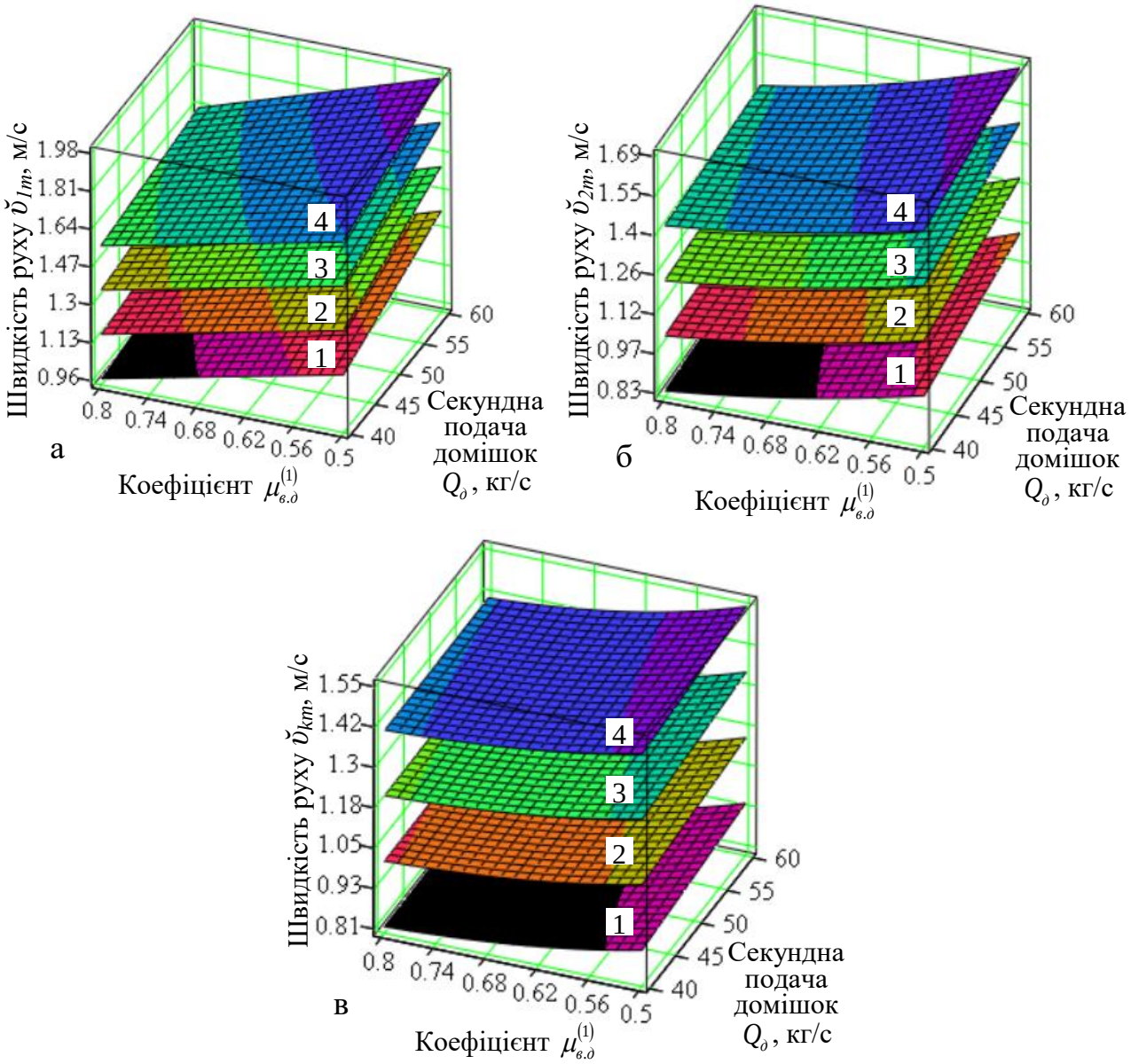



Рисунок 3.7 – Залежність зміни робочої швидкості руху кожної 1, 2,…,*k*-ї ділянки робочої гілки похилого транспортера як функція: а – $\vartheta_{1m} = f_\vartheta(Q_\partial, \mu_{в.\partial}^{(1)})$; б – $\vartheta_{2m} = f_\vartheta(Q_\partial, \mu_{в.\partial}^{(2)})$; в – $\vartheta_{km} = f_\vartheta(Q_\partial, \mu_{в.\partial}^{(k)})$; 1, 2, 3, 4 – відповідно, секундна подача коренеплодів $Q_k$ = 8, 10, 12, 14 кг/с

У межах зміни секундної подачі вороху $Q_в$ від 40 до 60 кг/с швидкість руху будь-якої *k*-ї ділянки робочої гілки похилого транспортера збільшується, приблизно в 2 рази та повинна бути більше або рівною: 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 $\mu_{в.д}^{(i)}$ від 0,5 до 0,8 призводить до зменшення необхідної швидкості руху відповідної 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.

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

На основі порівняльного аналізу швидкостей руху робочої гілки похилого транспортера в першому та другому наближенні необхідно акцентувати, що робочі швидкості руху похилого транспортера в другому наближенні (з урахуванням впливу кількості відокремлених структурних компонентів домішок кожною *k*-ю ділянкою робочої гілки) та в першому наближенні практично ідентичні, або рівні між собою.

Для проведення оптимізації з визначення необхідної кутової швидкості $\omega_{im}$ (рад/с) приводного вала похилого транспортера застосуємо систему рівнянь (3.63) і (3.64). При цьому $\max\left(\min\omega_{im}\right)\to\min$.

З урахуванням (3.40), отримаємо

$$\left.\begin{array}{l} 0{,}5B_m h_{1\max}\omega_{1m}d_v k_g \rho_в k_\varepsilon \xi_з = Q_k + Q_д\left(1-\mu_{в.д}^{(1)}\right);\ \ \omega_{1m} = f_1(x_1,x_2,...,x_i)\to\min; \\ 0{,}5B_m h_{1\max}\omega_{2m}d_v k_g \rho_в k_\varepsilon \xi_з = Q_k + Q_{1д}\left(1-\mu_{в.д}^{(2)}\right);\ \ \omega_{2m} = f_2(x_1,x_2,...,x_i)\to\min; \\ .....; \\ 0{,}5B_m h_{k\max}\omega_{km}d_v k_g \rho_в k_\varepsilon \xi_з = Q_k + Q_{(k-1)д}\left(1-\mu_{в.д}^{(k)}\right);\ \ \omega_{km} = f_k(x_1,x_2,...,x_i)\to\min; \end{array}\right\}, \quad (3.73)$$

де $d_v$ – зовнішній діаметр зірочки приводного вала, м.

З кожного рівняння системи (3.73) визначаємо необхідну кутову швидкість приводного вала кожної 1, 2,…, *k*-ї ділянки похилого транспортера

$$\left.\begin{array}{l} \omega_{1m} \geq 2\dfrac{Q_k + Q_\partial\left(1-\mu_{в.\partial}^{(1)}\right)}{B_m h_{1\max} d_v k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з}; \\ \omega_{2m} \geq 2\dfrac{Q_k + Q_{1\partial}\left(1-\mu_{в.\partial}^{(2)}\right)}{B_m h_{2\max} d_v k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з}; \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots; \\ \omega_{km} \geq 2\dfrac{Q_k + Q_{(k-1)\partial}\left(1-\mu_{в.\partial}^{(k)}\right)}{B_m h_{k\max} d_v k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з}; \end{array}\right\}. \qquad (3.74)$$

На рис. 3.8 наведено графічну інтерпретацію залежності зміни необхідної кутової швидкості кожної 1, 2,…, *k*-ї ділянки робочої гілки похилого транспортера як функція $\omega_{im} = f_\omega(Q_\partial, \mu_{в.\partial}^{(i)})$.

У загальному, на основі аналізу графічних моделей, які характеризують функціональну зміну необхідної кутової швидкості кожної 1, 2,…, *k*-ї ділянки робочої гілки похилого транспортера (рис. 3.8) можна констатувати, що межа зміни необхідної кутової швидкості $\omega_{im}$ кожної ділянки похилого транспортера знаходиться від 6,5 до 12,5 рад/с залежно від:

- зміни секундної подачі загальних домішок $Q_\partial$ у межах зміни від 40 до 60 кг/с;

- зміни відповідної секундної подачі чистих коренеплодів $Q_к$ = 8, 10, 12 і 14 кг/с і зміни відповідного коефіцієнта сепарації $\mu_{в.\partial}^{(i)}$ загальних домішок у межах від 0,5 до 0,8.

Застосувавши ідентичний графо-аналітичний аналіз, який описує оптимізацію необхідної робочої швидкості руху 1, 2,…, *k*-ї ділянки робочої гілки похилого транспортера та побудувавши номограму, ідентичну рис. 3.6, визначають необхідну кутову швидкість кожної 1, 2,…, *k*-ї ділянки робочої гілки похилого транспортера із урахуванням загальної подачі вороху до похилого транспортера.

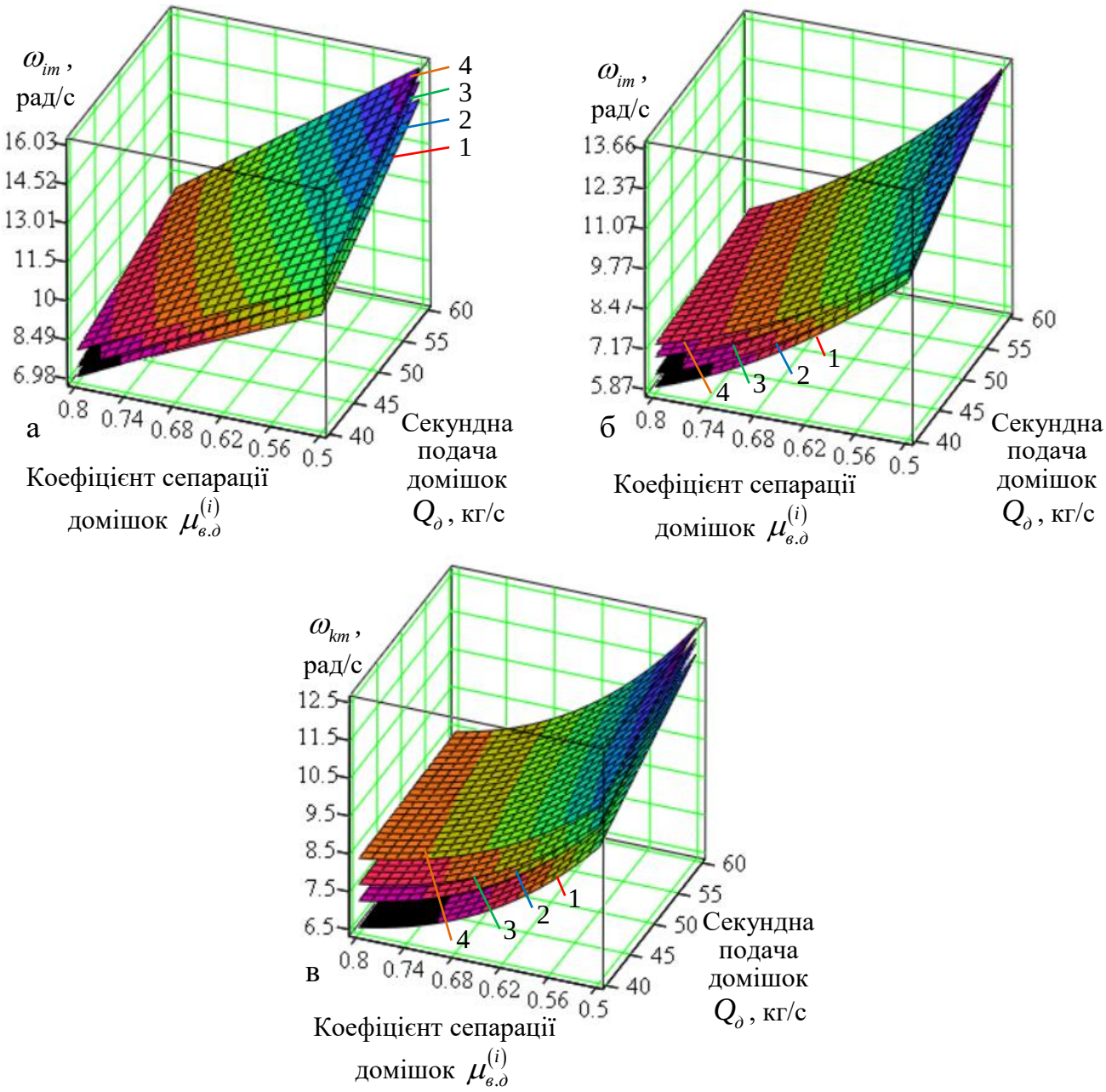



Рисунок 3.8 – Залежність зміни необхідної кутової швидкості 1, 2,…,*k*-ї ділянки робочої гілки похилого транспортера як функція $\omega_{km} = f_{\omega}(Q_д, \mu_{в.д}^{(k)})$: а, б, в – відповідно, першої (***1***), другої (***2***), (*k*-ї ) ділянки; 1, 2, 3, 4 – відповідно, $Q_к$ = 8, 10, 12, 14 кг/с

На початковому етапі другої (***2***) стадії (рис. 3.4) процесу роботи похилого транспортера, яка регламентує переміщення компонента вороху на очисну гірку, розглянемо статичне положення компонента вороху (у подальшому – компонента), що лежить на поверхні, яка належить скребку похилого транспортера у точці $A$.

Сходження компонента з поверхні скребка залежить від кута повороту $\varphi_c$ скребка, який є функціонально залежний від кутової швидкості $\omega_m$ та часу $t$ свого повороту, при цьому можна записати, що $\varphi_c = f(\omega_m) = f(d\varphi_c / dt)$.

Для цього повернемо систему координат $xOy$ (рис. 3.4) за годинниковою стрілкою на кут $\varepsilon$ так, щоб вісь $Oy$ збігалася з напрямком руху компонента по робочій поверхні скребка, або вздовж його, тобто вибираємо відносну систему координат $A'n\tau$, рис. 3.9.

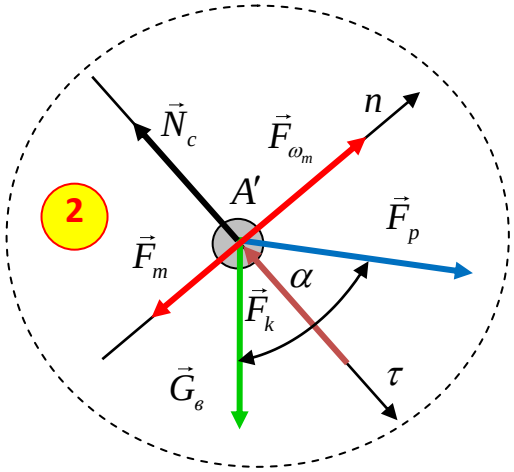



Рисунок 3.9 – Схема сил, які діють на компонент

Результуюча сила $F_p$ (Н), яка діє на компонент, складається з геометричної (векторної) суми всіх сил, які діють у процесі переміщення компонента скребком транспортера, тобто $\vec{F}_p = \sum_{i=1}^{n} F_i$: вектора сили тяжіння компонента $\vec{G}_в = m_в \vec{g}$ (Н); вектор сили нормальної реакції $N_c = F_m f_m$ скребка, Н, де $F_m$, $f_m$ – сила тертя (Н) та коефіцієнт тертя компонента по скребку; вектора переносної відцентрової сили інерції $\vec{F}_{\omega_m} = V_k \rho_в \vec{\omega}_m^2 \cdot OA$ (Н); вектора сили тертя $\vec{F}_m$ компонента по скребку (Н), вектора коріолісової сили, Н [279]:

$$\sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i = \vec{G}_в + \vec{F}_{\omega_m} + \vec{F}_m + \vec{F}_k, \qquad (3.76)$$

або

$$\sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i = V_k \rho_в \vec{g} \cos\varepsilon + V_k \rho_в \vec{\omega}_m^2 \cdot OA + \vec{N}_c f_m + 2V_k \rho_в \vec{\omega}_m^2 \vec{\vartheta}_A, \qquad (3.77)$$

де $V_k$ – об'єм компонента, м$^3$;

$OA = R_k = 0{,}5d_v + h_c$ – відстань від центра $O$ (рис. 3.4) обертання приводного вала транспортера до центра тяжіння компонента (точка $A$), м, де $h_c$ – радіус вихідного торця та висота скребка, м.

Спроектуємо вектор результуючої сили $\vec{F}_p$ на осі $Ox$, $Oy$ системи координат $xOy$, яка пов'язана з рухом збиральної машини, при цьому приймаємо, що вектор сили $\vec{F}_p$ спрямований під кутом $\alpha$ до напрямку вектора сили тяжіння $\vec{G}_в$ компонента [278, 280]:

$$\sum_{i=1}^{n} F_{iX} = F_p \sin\alpha = V_k \rho_в \left(0{,}5d_v + h_c\right)\left(\frac{d\varphi_c}{dt}\right)^2 \sin\varphi_c - 2V_k \rho_в \left(\frac{d\varphi_c}{dt}\right)^2 \left(0{,}5d_v + h_c\right)\cos\varepsilon + \\ + V_k \rho_в g \cos^2\varepsilon - 2V_k \rho_в \left(0{,}5d_v + h_c\right)\left(\frac{d\varphi_c}{dt}\right)^2 \cos\varepsilon = 0 \quad ; \text{(3.78)}$$

$$\sum_{i=1}^{n} F_{iY} = F_p \cos\alpha = V_k \rho_в \left(0{,}5d_v + h_c\right)\left(\frac{d\varphi_c}{dt}\right)^2 \cos\varphi_c + 2V_k \rho_в \left(\frac{d\varphi_c}{dt}\right)^2 \left(0{,}5d_v + h_c\right)\sin\varepsilon - \\ - V_k \rho_в g \cos\varepsilon \sin\varepsilon + 2V_k \rho_в \left(0{,}5d_v + h_c\right)\left(\frac{d\varphi_c}{dt}\right)^2 \sin\varepsilon - V_k \rho_в g = 0 \quad , \text{(3.79)}$$

де $\varphi_c$ – кут повороту скребка, рад.

З рівняння (3.78) і (3.79) знаходимо вираз визначення складових векторів по осі $Ox$ і $Oy$ загального прискорення $a_k$ компонента:

$$\frac{d\vartheta_{kX}}{dt} = \left(0{,}5d_v + h_c\right)\left(\frac{d\varphi_c}{dt}\right)^2 \frac{\sin\varphi_c}{\sin\alpha} - \\ -4\left(\frac{d\varphi_c}{dt}\right)^2 \left(0{,}5d_v + h_c\right)\frac{\cos\varepsilon}{\sin\alpha} + \frac{g\cos^2\varepsilon}{\sin\alpha} \quad ; \quad (3.80)$$

$$\frac{d\vartheta_{kY}}{dt} = \left(0{,}5d_v + h_c\right)\left(\frac{d\varphi_c}{dt}\right)^2 \frac{\cos\varphi_c}{\cos\alpha} + \\ +4\left(\frac{d\varphi_c}{dt}\right)^2 \left(0{,}5d_v + h_c\right)\frac{\sin\varepsilon}{\cos\alpha} - \frac{g\cos\varepsilon\sin\varepsilon}{\cos\alpha} - \frac{g}{\cos\alpha} \quad . \quad (3.81)$$

Тоді прискорення компонента, відповідно до рівнянь (3.80) та (3.81) після математичних викладок (перетворення та спрощення), дорівнюватиме

$$\frac{d\vartheta_k}{dt} = a_k = \frac{1}{\sin\alpha}\sqrt{\begin{array}{l}\left(0{,}5d_v + h_c\right)^2\left(\frac{d\varphi_c}{dt}\right)^4\left(a^2 + b^2 tg^2\alpha\right) + 2\left(0{,}5d_v + h_c\right)\left(\frac{d\varphi_c}{dt}\right)^2 \times \\ \times\left(ag\cos^2\varepsilon - bgc\cdot tg^2\alpha\right) + g^2\left(\cos^4\varepsilon + c^2 tg^2\alpha\right)\end{array}}, \quad (3.82)$$

де $a = \sin\varphi_c - 4\cos\varepsilon$; $b = \cos\varphi_c + 4\sin\varepsilon$; $c = \cos\varepsilon\sin\varepsilon + 1$.

Для знаходження рівняння траєкторії руху компонента після його сходження зі скребка транспортера до очисної гірки відносно координат $xOy$ двічі обчислимо похідну виразу (3.82) [280, 281]:

$$\frac{dS_k}{dt} = \vartheta_k = \frac{1}{\cos\alpha}\sqrt{\begin{array}{l}4\left(0{,}5d_v + h_c\right)^2\left(\frac{d\varphi_c}{dt}\right)^2\left(a + \frac{b}{\cos^4\alpha}\right) + \\ +4gt\left[\begin{array}{l}\left(0{,}5d_v + h_c\right)\left(\frac{d\varphi_c}{dt}\right)\left(-b\sin^2\varepsilon - \frac{a\sin\varepsilon\cos\varepsilon}{\cos^4\alpha}\cdot\right) + \\ +0{,}5\left(\sin^4\varepsilon + \frac{c}{\cos^2\alpha}\right)\end{array}\right]\end{array}}; \quad (3.83)$$

$$S_k = -\frac{1}{\sin\alpha}\sqrt{\begin{array}{l}8\left(0{,}5d_v + h_c\right)^2\left(\frac{d\varphi_c}{dt}dt\right)\left(b - \frac{a}{\sin^4\alpha}\right) + \\ +2gt^2\left[\begin{array}{l}\left(0{,}5d_v + h_c\right)\left(a\cos^2\varepsilon + \frac{b\sin\varepsilon\cos\varepsilon}{\sin^4\alpha}\cdot\right) + \\ +0{,}5\left(\cos^4\varepsilon - \frac{\sin\varepsilon\cos\varepsilon}{\sin^2\alpha}\right)\end{array}\right]\end{array}}. \quad (3.84)$$

Вираз (3.84) є детермінованою математичною моделлю, яка характеризує траєкторію переміщення компонентів вороху після їхнього сходження зі скребка похилого транспортера залежно від його конструктивно-кінематичних параметрів.

Крім того, модель (3.84) регламентує передумови для проведення подальшого аналізу руху компонентів (переміщення компонентів) на робочу гілку похилої очисної гірки в аспекті визначення координат точки контакту центра тяжіння компонента з похилою площиною робочої гілки очисної гірки.

Аналіз математичної моделі показує, що траєкторія руху компонента визначається лише кутом повороту скребка транспортера і залежить від кутової швидкості барабана приводного вала похилого транспортера.

Для визначення часу $t$ знаходження компонента на робочій поверхні скребка складено диференціальне рівняння руху компонента по скребку, тобто по осі $A'n$:

$$V_k \rho_в \frac{d^2 n}{dt^2} = F_\omega - F_m - V_k \rho_в g \sin\varepsilon, \tag{3.85}$$

або

$$\frac{d^2 n}{dt^2} = \left(0{,}5 d_v + h_c\right)\left(\frac{d\varphi_c}{dt}\right)^2 \left(1 - 2 f_m\right) + g\left(f_m \cos\varepsilon + \sin\varepsilon\right). \tag{3.86}$$

Диференціальне рівняння (3.86) дозволяє отримати значення відносного переміщення компонентів (коренеплодів і домішок) скребком похилого транспортера в момент відриву від нього і тим самим провести оптимізацію параметрів самого скребка.

Таким чином, дослідження кінематичних та динамічних характеристик руху коренеплодів по робочій поверхні похилого транспортера та передачі їх на робочу гілку похилої гірки, є наступним етапом розвитку методики та методології аналізу процесів функціонування транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин.

Наведені теоретичні викладення характеризують аналітичний аналіз процесу руху коренеплодів і домішок по скребку похилого транспортера, а розроблені математичні моделі, є передумовами для оптимізації конструктивно-кінематичних параметрів очисних транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин.

Проте, зважаючи на конструктивну особливість розміщення робочих органів ОТТМ необхідно зазначити, що прикінцеві раціональні параметри похилого транспортера також будуть залежати від переміщення компонентів вороху на третьому етапі, або переходу компонентів з похилого транспортера до робочої поверхні очисної гірки. Результати дослідження дальності польоту коренеплодів наведено в додатку В.4.

### 3.3. Висновки до розділу

3.3.1. Запропоновано метод розроблення математичної моделі (3.17), яка функціонально описує поетапний процес відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів залежно від часу $t_{jq}$ знаходження складових компонентів домішок на кожній *q*-й ділянці кожного *j*-го робочого органу транспортно-очисних систем вороху коренезбиральних машин.

3.3.2. Встановлено, що мінімально-необхідна робоча довжина $l_{m.\min}$ похилого транспортера, яка забезпечує технологічну стійкість роботи, повинна бути більша або рівна 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.

3.3.3. Встановлено, що за швидкості руху коренезбиральної машини в межах від 1,6 до 2,0 м/с 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 рівною 0,2 м, а секундна подача домішок знаходиться в середній межах від 30 до 40 кг/с за зміни урожайності гички від 0,6 до 1,2 кг/ м$^2$ (60-120 ц/га) і урожайності коренеплодів 2,5 кг/м$^2$, або 250 ц/га.

3.3.4. У межах зміни секундної подачі коренеплодів $Q_k$ 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 рівною: 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.

3.3.5.Збільшення коефіцієнта сепарації домішок $\mu_{в.д}^{(i)}$ від 0,5 до 0,8 призводить до зменшення швидкості руху *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.

3.3.6. Встановлено, що дальність польоту коренеплодів 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.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях [49, 61, 79, 224, 262, 267, 268, 270, 271, 279, 281].

# РОЗДІЛ 4
# МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ КОМБІНОВАНОГО РОБОЧОГО ОРГАНУ ОТТМ

## 4.1. Математична модель функціонального процесу динамічної взаємодії очисних елементів з налиплим грунтом

Підвищення інтенсивності відокремлення структурних компонентів домішок може досягатися на основі поглибленого аналізу механіко-технологічних принципів взаємодії складових технічної системи "робочий орган-компонент домішок-коренеплід", або методологічних принципів урахування агрофізичних і фізико-механічних властивостей коренеплодів й структурних компонентів домішок [1, 6, 52, 181].

Цей процес взаємодії в значній мірі визначає критерії впливу робочих органів ОТТМ на об'єкт дослідження (коренеплоди та домішки) та дозволяє оптимізувати максимально-допустимі межі динамічної дії на пріоритетні складові компоненти вороху. У нашому випадку такими визначальними компонентами вороху, є коренеплоди та налиплий грунт на поверхні тіла коренеплодів [47, 67, 156, 162, 184].

У цьому контексті моделювання процесу взаємодії очисних елементів із налиплим грунтом проведено на основі дослідження можливих деформацій очисних елементів [282 – 284], які виникають у результаті їх контакту з поверхнею налиплого грунту та дії на них сили тиску шарів коренеплодів із налиплим грунтом, які скочуються з робочої гілки очисної гірки.

Для аналізу процесу взаємодії очисних пружних елементів, які закріплено на барабані приводного вала комбінованого очисного робочого органу ОТТМ з налиплим грунтом на коренеплодах розглянемо схему, яку наведено на рис. 4.1.

Для цього кожний пружний очисний елемент 12 (рис. 2.9), який закріплено радіально на барабані приводного вала 6 комбінованого робочого органу 3 розглянуто у вигляді одиничного пружного стрижня 3 (рис. 4.1) [285].

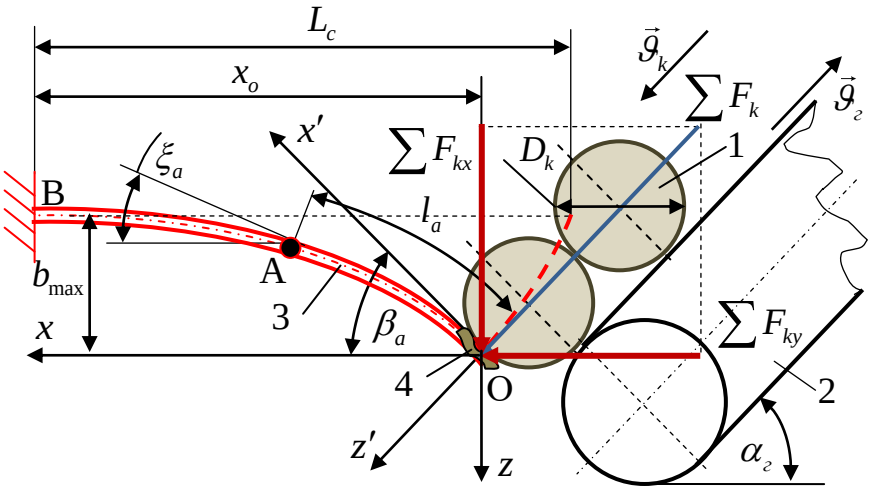



Рисунок 4.1 – Схема взаємодії одиничного пружного очисного елемента з налиплим грунтом на поверхні тіла коренеплоду: 1 – коренеплід з налиплим грунтом; 2 – очисна гірка; 3 – пружний очисний елемент; 4 – налиплий грунт

Одиничний тонкий пружний стрижень знаходиться під дією сумарної стискаючої сили $\sum F_k$, що виникає у результаті тиску коренеплодів 1, які скочуються по робочій поверхні очисної гірки 2 (рис. 2.9) одинокими шарами один за одним до системи шнеків 4 і 5 комбінованого робочого органу 3 ОТТМ.

Вибираємо систему координат *xOz* (рис. 4.1), початком відліку якої є точка *O*, або початкова точка контакту тіла коренеплоду 1 з вільним кінцем пружного очисного елемента 3. Вісь *Oz* направимо вертикально вниз, а вісь *Ox* – вздовж пружного очисного елемента.

На основі теореми Лагранжа-Діріхле [286, 287] про мінімум енергії рівноважного стану консервативної системи можна прийняти положення, за якого під час дії очисних пружних елементів, які обертаються та діють на масу коренеплодів, останні розташовують так, що їх поздовжня вісь паралельна поздовжній осі барабана приводного вала.

При цьому диференціальне рівняння пружної лінії стрижня записано у вигляді

$$-z\sum F_k = EJ\frac{d\xi_a}{dl_a}, \text{ або } z = -\frac{EJ}{\sum F_k}\frac{d\xi_a}{dl_a}, \tag{4.1}$$

де $\sum F_k$ – сумарна сила контакту пружного стрижня з поверхнею тіла коренеплоду, Н;

$E$ – модуль пружності матеріалу пружного стрижня, Па;

$J$ – геометричний осьовий момент інерції пружного стрижня, м$^4$;

$\frac{d\xi_a}{dl_a}$ – миттєве значення кривини осьової лінії зігнутого стрижня у точці $A$, рад./м;

$\xi_a$ – кут між дотичною до пружної лінії стрижня і віссю $Ox$, рад.;

$l_a$ – криволінійна абсциса миттєвої точки $A$, довжина якої рівна лінії від точки $A$ до вільного кінця стрижня, м.

При цьому, маємо, що $dz / dl_a = \sin\xi_a$.

Підставивши в вираз $dz / dl_c = \sin\xi_a$ значення z із (4.1), отримаємо

$$-\sum F_k \sin\xi_a = \frac{EJ}{\sum F_k}\frac{d^2\xi_a}{dl_a^2}. \tag{4.2}$$

Враховуючи, що на вільному кінці пружного стрижня кут $\xi_a = \beta_a$, а також те, що кривина $d\xi_a / dl_a = 0$, помножимо праву та ліву частину (4.2) на $2d\xi_a / dl_a$.

Після інтегрування отриманого виразу маємо

$$\sum F_k\left(\cos\xi_a - \cos\beta_a\right) = \frac{EJ}{\sum F_k}\left(\frac{d\xi_a}{dl_a}\right)^2. \tag{4.3}$$

Для визначення довжини дуги зігнутого пружного стрижня виконаємо інтегрування виразу (4.3) методом розділення перемінних, позначивши вираз $\sum F_k / EJ = \Theta$.

Тоді отримаємо

$$l_a = \frac{1}{2\Theta}\int_0^{\beta_a}\frac{d\xi_a}{\sqrt{\sin^2\left(0{,}5\beta_a\right) - \sin^2\left(0{,}5\xi_a\right)}}. \tag{4.4}$$

Позначимо в (4.4) $\sin\left(0{,}5\beta_a\right) = q$ та введемо відносно кута $\xi_a$ нову переміну $\psi$, яка пов'язана з $\xi_a$ рівнянням $\sin\left(0{,}5\xi_a\right) = q\sin\psi = \sin\left(0{,}5\beta_a\right)\sin\psi$, запишемо інтегральний вираз для визначення довжини стрижня $L_c$ [288]

$$L_c = \frac{1}{\Theta}\int_0^{\pi/2} \frac{d\psi}{\sqrt{1-q^2\sin^2\psi}} = \frac{1}{\Theta}\Phi\left(q^2\right), \tag{4.5}$$

де $\Phi\left(q^2\right)$ – повний еліптичний інтеграл Лежандра першого роду, записаний у нормальній формі [289 ].

Визначення переміщення вільного кінця та розрахунку прогину пружного стрижня відповідно, у вертикальному $Oz$ та горизонтальному $Ox$ напрямку проведемо таким чином:

- у першому випадку визначення переміщення вільного кінця стрижня у вертикальному $Oz$ напрямку, є наступним:

- вирішимо рівняння (4.4) відносно $z$, яке визначається відношенням $dz = \sin\xi_a dl_a$

$$b_{\max} = 2q/\Theta;\ 1/\Theta = l_a/\Theta\left(q^2\right), \tag{4.6}$$

де $1/\Theta$ визначено з рівняння (4.5);

- у другому випадку розрахунок прогину пружного стрижня у горизонтальному $Ox$ напрямку, є наступним:

- приймаючи, що $dx/dl_a = const$ та застосовуючи рівняння (4.2) виразимо $dx_o$ через $dl_a$

$$dx_o = -\cos\xi_a dl_a = \sqrt{2}\cos\xi_a\left(d\frac{\xi_a}{\Theta}\right)\sqrt{\cos\xi_a - \cos\beta_a}\,. \tag{4.7}$$

Виконавши інтегрування (4.7), отримаємо

$$x_0 = -\int_0^{\beta_a}\cos\xi_a dl_a + C\,, \tag{4.8}$$

де $C = L_c$ – постійна інтегрування, за якого у виразі постійна інтегрування $C$ визначається із граничних умов на кінці пружного стрижня: $x_o\Big|_{\beta_a=0} = L_c$.

Тоді вираз (4.8) набуде вигляду

$$x_o = L_c - \int_0^{\beta}\cos\xi dl_c\,, \tag{4.9}$$

або

$$x_o = L_c - \frac{1}{\Theta}\int_0^{\beta_a} \frac{\cos\xi_a dl_a}{\sqrt{2}\sqrt{\cos\xi_a - \cos\beta_a}}. \quad (4.10)$$

Виразивши праву частину (4.10) через еліптичні інтеграли Лежандра у нормальній формі та враховуючи, що $\cos\beta_a = 1 - 2\sin\left(0{,}5\beta_a\right)$, маємо

$$x_o = L_c - \frac{1}{\Theta}\int_0^{x_o} \frac{\cos\xi_a dl_a}{\sqrt{\sin^2\left(0{,}5\beta_a\right) - \sin^2\left(0{,}5\xi_a\right)}}. \quad (4.11)$$

Введемо нову перемінну інтегрування $t_k$, яка пов'язана з відповідною зміною кута $\xi_a$ за прийнятих умов $\sin\left(0{,}5\beta_a\right) = q$ і $\sin\left(0{,}5\xi_a\right) = \sin\left(0{,}5\beta_a\right)\sin t_k$.

Тоді підінтегральний вираз (4.1) приймає вигляд

$$\frac{\left(1 - 2q^2\sin^2\beta_a\right)}{\sqrt{1 - 2q^2\sin^2 t_k}} dt_k, \quad (4.12)$$

або після перетворення (4.12), отримаємо

$$\frac{\cos\xi_a \cdot d\xi_a}{\sqrt{\sin^2\left(0{,}5\beta_a\right) - \sin^2\left(0{,}5\xi_a\right)}} = 2\left(2\sqrt{1 - q^2\sin^2 t_k} - \frac{1}{\sqrt{1 - q^2\sin^2 t_k}}\right) dt_k. \quad (4.13)$$

Тому

$$x_o = L_c - \frac{2}{\Theta}\int_{t_k(0)}^{t_k(\beta_a)} \sqrt{1 - q^2\sin^2 t_k}\, dt_k + \int_{t_k(0)}^{t_k(\beta_a)} \frac{1}{\sqrt{1 - q^2\sin^2 t_k}} dt_k. \quad (4.14)$$

Перший інтеграл (4.14) $\frac{2}{\Theta}\int_{t_k(0)}^{t_k(\beta_a)} \sqrt{1 - q^2\sin^2 t_k}\, dt_k$ є неповним еліптичним інтегралом 2-го роду, який записано у нормальній формі Лежандра.

Другий інтеграл (4.14) $\int_{t_k(0)}^{t_k(\beta_a)} \frac{1}{\sqrt{1 - q^2\sin^2 t_k}} dt_k$ є неповним еліптичним інтегралом 1-го роду, який також записано у нормальній формі Лежандра.

Для подальшого рішення інтегрального виразу (4.14) визначимо межі інтегрування відносно $t_k$: із відношення $\sin t_k = \sin\left(0{,}5\xi_a\right)/\sin\left(0{,}5\beta_a\right)$ маємо, що за $\xi_a = 0$, $sint_k = 0$, або $t_k = 0$; за $\xi_a = \beta_a$, $sint_k = 1$.

Таким чином маємо, що

$$t_k = \arcsin\left[\frac{\sin\left(0{,}5\xi_a\right)}{\sin\left(0{,}5\beta_a\right)}\right] = \pi/2. \tag{4.15}$$

Тоді вираз для визначення $x_o$ буде мати вигляд

$$x_o = L_c - \frac{2}{\Theta}\int_0^{\pi/2}\sqrt{1-q^2\sin^2 t_k}\,dt_k + \int_0^{\pi/2}\frac{1}{\sqrt{1-q^2\sin^2 t_k}}\,dt_k. \tag{4.16}$$

Рішення інтегрального виразу (4.16) матиме вигляд

$$x_o = L_c - \frac{1}{\Theta}\left[2\mathrm{E}\left(q^2\right) - \Phi\left(q^2\right)\right], \tag{4.17}$$

де $\mathrm{E}\left(q^2\right)$ – повний еліптичний інтеграл Лежандра 2-го роду записаний в нормальній формі [289].

Підставивши значення $1/\Theta$ із залежності (4.6) у залежність (4.16) визначено переміщення вільного кінця пружного стрижня у горизонтальному $Ox$ напрямку

$$x_o = 2L_c\left[\frac{1-\mathrm{E}\left(q^2\right)}{\Phi\left(q^2\right)}\right]. \tag{4.18}$$

Отримана аналітична залежність дозволяє розраховувати деформацію пружних очисних елементів залежно від сили тиску коренеплодів із налиплим грунтом, що є підґрунтям для подальшого обгрунтування розмірних конструктивних параметрів пружних очисних елементів і кінематичних параметрів приводного вала комбінованого робочого органу ОТТМ.

Реалізацію отриманих моделей, які дозволяють проводити оптимізацію параметрів очисних пружних елементів розглянемо таким чином.

Відомо, що сила тиску одиночного шару коренеплодів, які скочуються по похилій поверхні стінки трапецевидного бункера, або в нашому випадку ця сила адекватна сумарній силі $\sum F_k$ контакту пружного стрижня з поверхнею тіла останнього нижнього коренеплоду (або сумарній стискаючій силі $\sum F_k$, яка деформує очисний пружний елемент) знаходиться в межах 4…18 Н [290] та залежить від кількості коренеплодів, які одночасно тиснуть на очисний пружний елемент.

Тоді згідно з проведеними розрахунками моделей (4.17), (4.18) побудовано графічну інтерпретацію переміщення $x_o$ та кута відхилення $\beta_a$ вільного кінця пружного стрижня (пружного елемента) різної довжини $L_c$ у горизонтальному $Ox$ напрямку залежно від його стискаючої сили $\sum F_k$, рис. 4.2 (діаметр пружного елемента 2 мм, матеріал – капрон марки А).

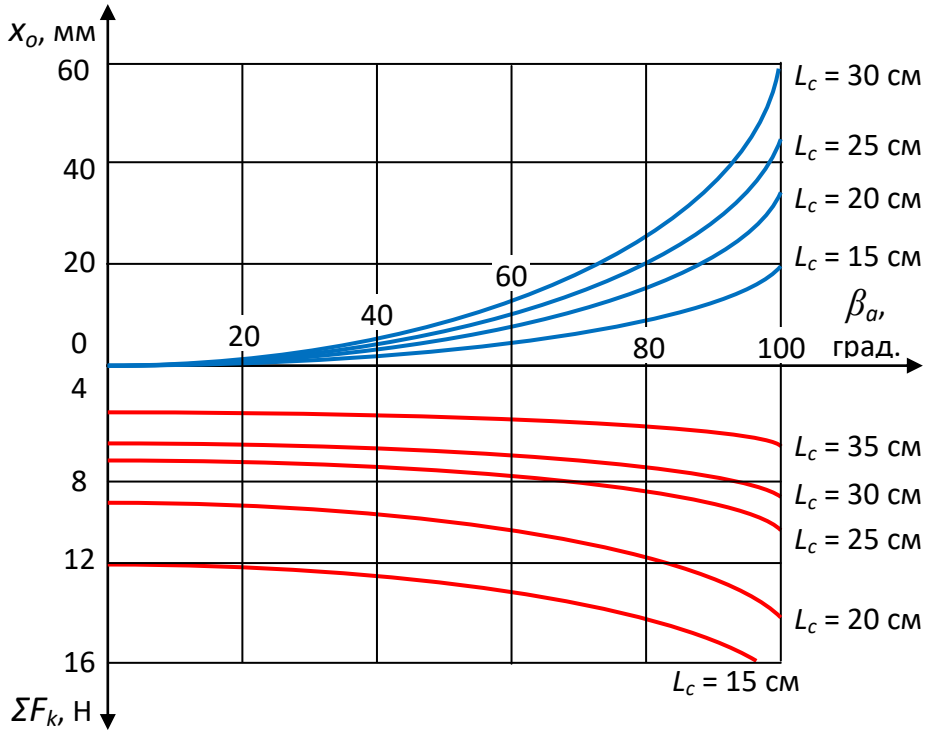



Рисунок 4.2 – Номограма для визначення переміщення та кута відхилення вільного кінця очисного пружного елемента від сумарної стискаючої сили

Застосовуючи побудовану номограму визначають основні параметри очисного пружного стрижня комбінованого робочого органу ОТТМ.

Результати розроблення математичної моделі процесу взаємодії коренеплодів з рифом шнека наведено у додатку Г.1.

## 4.2. Математична модель функціонального процесу відокремлення налиплого грунту з коренеплодів

Складність очищення коренеплодів від структурних компонентів домішок, які викопуються робочими органами МВК із грунтово-коренеплідного середовища, функціонально пов’язана з необхідністю значного (4...8 кг/погонний метр) відділення грунтових і рослинних домішок, які є різними за своїми фізико-механічними властивостями. Вільний стан домішок характеризується пухким грунтом, дрібними (20...50 мм) і великими (до 100 мм) грудками грунту різної вологості та твердості, втраченою гичкою в процесі її зрізання гичкозбиральним модулем, залишками гички на головках коренеплодів. Супутніми домішками, є налиплий на поверхню коренеплодів ґрунт та залишки бадилля на їх головках [1, 49, 75, 137, 224, 295, 297, 298].

Ефективність відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів, або показники якості роботи ОТТМ, суттєво залежать не лише від фізико-механічних характеристик домішок, а й від встановлених значень конструктивно-кінематичних параметрів і режимів роботи системи шнеків 6, 7 (рис. 2.9) і приводного очисного вала 5. Очисний вал 5 утворений пучками пружного ворсу 13, які закріплені на барабані 11.

Основним критерієм, який регулює технологічний процес роботи пучків пружного ворсу 13 у поєднанні з системою круглих шнеків 4, або еліптичних шнеків 14, є кількісні показники ступеня відокремлення вільного і налиплого грунту з урахуванням можливих пошкоджень коренеплодів. Ці складові технологічної ефективності роботи ОТТМ будуть залежати від виду деформації пучків пружного ворсу 13 (або очисних пружних елементів 12), яка виникає під впливом діючих сил у процесі відокремлення налиплих частинок ґрунту з поверхні тіла коренеплодів.

Для розроблення передумов очищення поверхні коренеплодів від налиплого грунту, розглянемо схему взаємодії пружного очисного елемента 5 (рис. 4.3), закріпленого на барабані 4 з тілом коренеплоду 6, або налиплим грунтом 7.

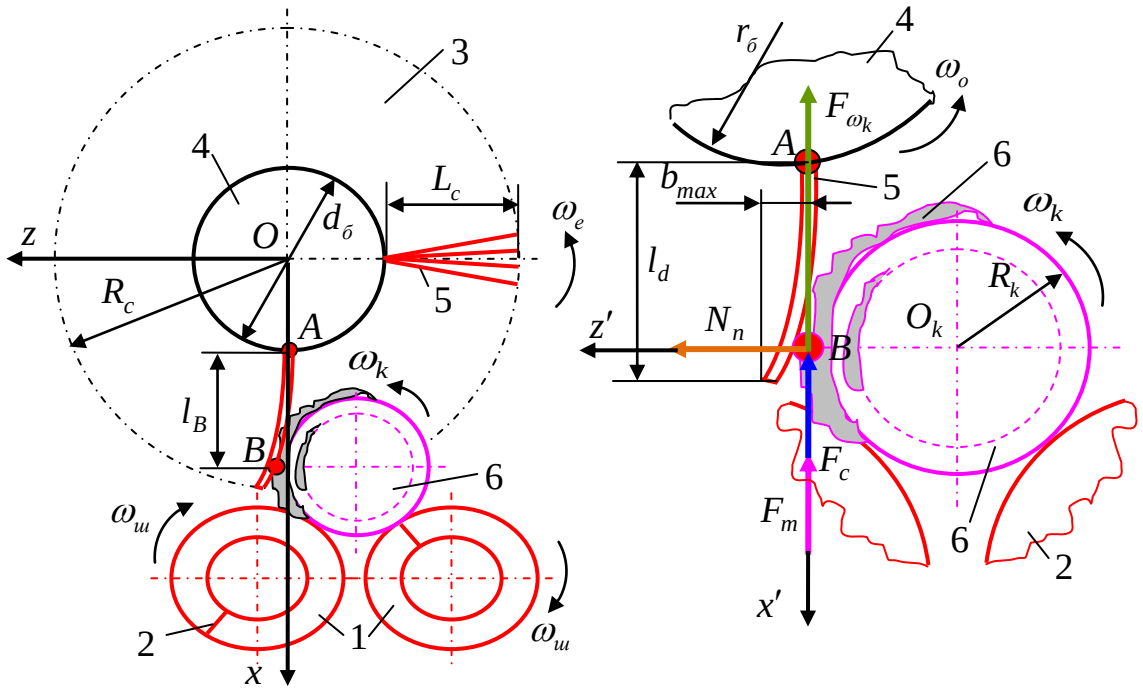



Рисунок 4.3 – Схема взаємодії пружного очисного елемента з налиплим грунтом: 1 – система шнеків; 2 – виток шнека; 3 – приводний вал; 4 – барабан вала; 5 – пружний очисний елемент; 6 – коренеплід; 7 – налиплий грунт

При цьому:

- коренеплід розташовується у робочому руслі між витками 2 шнека 1;

- припускаємо (приймаємо умову), що пружні очисні елементи, які формалізуємо у вигляді пружних стрижнів, працюють в умовах максимально допустимої пружності на чистий вигин (відсутність поперечної сили);

- максимальна поздовжня деформація одиничного пружного стрижня дорівнює $b_{\max}$;

- сила зскрібання $F_c$ більше сили тертя $F_m$ пружного стрижня по ґрунту, тобто, моделюємо умову оптимального зскрібання грунту за відповідного вигину пружного стрижня.

Пружний стрижень 5, довжина якого дорівнює $L_c$ жорстко закріплений у точці $A$, яка віддалена від центра $O$ обертання приводного вала 3, або початку відліку системи координат $Oxyz$ на величину радіуса. Нижній торець стрижня у процесі його обертання з постійною кутовою швидкістю $\omega_o$ щодо центра осі обертання приводного вала описує спіральне коло радіусом $R_c$.

У процесі контакту тіла коренеплоду 6 з робочою поверхнею витка 2 шнека 1 відбувається переміщення коренеплоду вздовж осі обертання шнека та одночасна взаємодія пружних стрижнів 5 з налиплим ґрунтом 7 на поверхні тіла коренеплоду. Ця динамічна взаємодія призводить до зскрібання частинок грунту, що налипнув на поверхню тіла коренеплодів за рахунок обертального руху пружного стрижня.

Відповідно до умов [298] у процесі роботи пристроїв для очищення поверхонь щітковими робочими органами виникають два види опору – ті які пов'язані з явищем «блукання» («рискання») та які виникають внаслідок викривлення внутрішнього шару поверхні, яка очищається стрижнями.

Повний момент опору $M_1$ (Н м) зскрібання для умови одиничної контактної взаємодії пружного стрижня з грунтом, що налипнув на поверхні тіла одиничного коренеплоду визначається за формулою [299]

$$M_1 = 0{,}5 D_B \sum_{i=1}^{n} F_i = \left(0{,}5 d_б + l_B\right) \sum_{i=1}^{n} F_{1ci}\,, \tag{4.19}$$

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 зскрібання налиплого грунту з поверхні тіла одного коренеплоду, Н, $i = 1, 2, \ldots n$;

$d_б$ – діаметр труби барабана, м;

$l_B$ – довжина пружного стрижня в точці контакту $B$, м.

Сумарний (загальний) момент опору (Н м) буде непостійним і залежатиме від безлічі суб'єктивних та об'єктивних факторів – кількості коренеплодів, які схильні до очищення, їх форми та розташування щодо осі обертання пружних стрижнів, агробіологічних характеристик коренеплодів – довжини та діаметра коренеплодів), кількості пружних стрижнів, які беруть участь у зскрібанні налиплого ґрунту, явища «блукання» вільних кінців пружних стрижнів, стану ґрунту та товщини шару налиплого ґрунту тощо [1, 298 – 301].

Для формалізації моделі, що характеризує процес контактної взаємодії пружних стрижнів із поверхнею тіла коренеплодів, приймаємо такі умови.

1. Пружні стрижні взаємодіють по всій поверхні коренеплоду незалежно від його розташування у жолобі робочих русел, утворених системами шнеків:

- по всій довжині коренеплоду $L_k$ (м), коли його поздовжня вісь паралельна або наближена до напрямку осі обертання приводного вала;

- по всьому діаметру коренеплоду $D_k$ (м), коли його поздовжня вісь перпендикулярна або наближена до напрямку осі обертання приводного вала.

2. Гвинтова лінія, по якій закріплені пружні стрижні, утворена набором рівномірно та послідовно розташованих на барабані приводного вала один за одним пучків ворсу з кроком $T_n$ (м), при цьому [302]:

- довжина гвинтової лінії $L_{ic}$ розташування пучків пружного ворсу, що беруть участь у зскрібанні грунту, який налипнув на поверхні одного коренеплоду за його довжиною $L_k$, або по діаметру $D_k$, відповідно, дорівнює

$$L_{1c} = \frac{\pi L_k (R_c + r_б)}{T_n} \cos\left( arctg \frac{T_n}{R_c + r_б} \right) \sum_{i=1}^{n} (X_i - \bar{X})^2 ; \qquad (4.20)$$

$$L_{2c} = \frac{\pi D_k (R_c + r_б)}{T_n} \cos\left( arctg \frac{T_n}{R_c + r_б} \right), \qquad (4.21)$$

де $L_{1c}$ – довжина гвинтової ліні розташування пучків пружного ворсу, що беруть участь у зскрібанні грунту, який налипнув на поверхні одного коренеплоду за його довжиною $L_k$, м;

$L_{2c}$ – довжина гвинтової ліні розташування пучків пружного ворсу, що беруть участь у зскрібанні грунту, який налипнув на поверхні одного коренеплоду по його діаметру $D_k$, м;

$R_c$ – радіус пружного стрижня, м;

$r_б$ – радіус труби барабана приводного вала, м;

$T_n$ – крок гвинтової лінії розташування пучків пружного ворсу, м.

3. Сумарна кількість коренеплодів, які піддаються одночасному очищенню від налиплого ґрунту по всій довжині коренеплоду $\sum q_{L_k}$ (шт.) і по всьому діаметру коренеплоду $\sum q_{D_k}$ (шт.) та загальна кількість коренеплодів $q_k$ (шт.), які знаходяться на поверхні робочих русел і розташовуються в один шар, що є передумовою найбільш ефективного відділення домішок [1], залежить від штучної секундної подачі коренеплодів $W_k$ (шт./с), які надходять з очисної гірки.

4. Загальна кількість коренеплодів $q_k$ (шт.), які знаходяться на поверхні робочих русел, що утворені правою та лівою системи шнеків, дорівнює штучній секундній подачі коренеплодів $W_k$ та яка визначається за формулами:

- згідно з (2.23) відносно геометричних розмірних параметрів коренеплодів;

$$W_k = \frac{d\Pi_{ЧК}}{dt}\frac{1}{m_{kc}^{(1)}} = \frac{2\pi\rho_k}{3tm_{kc}^{(1)}} q_k^{(1)} h_k^2 \left(1-\lambda_{вk}\right) N_k \left( \frac{D_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_k \right); \qquad (4.22)$$

- згідно з (2.24) відносно агробіологічної урожайності коренеплодів

$$W_k = \frac{d\Pi_{ЧК}}{dt}\frac{1}{m_{kc}^{(1)}} = \frac{B_k \vartheta_M b_м \left(1-\lambda_{вk}\right) N_k}{m_{kc}^{(1)}}. \qquad (4.23)$$

де $m_{kc}^{(1)}$ – середня маса одного коренеплоду, кг.

5. Загальна кількість $K_{ic}$ пружних стрижнів, які мають контакт з коренеплодами (шаром налиплого ґрунту) буде дорівнювати

$$K_{ic} = \left[ \left(L_{1c} / T_n\right) \sum q_{L_k} + \left(L_{2c} / T_n\right) \sum q_{D_k} \right] z_c, \qquad (4.24)$$

де $z_c$ – кількість пружних стрижнів в одному пучку пружного ворсу, шт.

Якщо $\sum q_{L_k} = \sum q_{D_k} = 0{,}5 q_k$, тоді загальна кількість пружних стрижнів $K_{ci}$, які мають контакт з коренеплодами за час $t$ згідно з (4.22)-(4.24) визначається за формулою:

- згідно з (4.22), (4.24) та (2.23) відносно геометричних розмірних параметрів коренеплодів

$$K_{1c} = \frac{L_{1c} + L_{2c}}{2T_n} z_c \frac{2\pi\rho_k}{3m_{kc}^{(1)}} q_k^{(1)} h_k^2 \left(1 - \lambda_{вк}\right) N_k \left( \frac{D_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_k \right); \quad (4.25)$$

- згідно з (4.23), (4.24) та (2.24) відносно агробіологічної урожайності коренеплодів

$$K_{2c} = \frac{L_{1c} + L_{2c}}{2T_n} z_c B_k \vartheta_M b_м \left(1 - \lambda_{вк}\right) N_k t. \quad (4.26)$$

Тоді підставивши значення $L_{1c}$ і $L_{2c}$ з (4.20) і (4.21) у формулу відповідно, (4.25) і (4.26) та згідно з (4.24), отримано залежність, яка характеризує повний (сумарний) момент опору $M_{1c}$, $M_{2c}$ (Н м) для загальної кількості пружних стрижнів $K_{1c}$, $K_{2c}$, які беруть участь у зскрібанні налиплого ґрунту з коренеплодів, загальна кількість яких дорівнює $q_k$ [298]:

- залежно від геометричних розмірних параметрів коренеплодів

$$M_{1c} = \frac{\left(r_б + l_B\right)\left(L_k + D_k\right)\left(R_c + r_б\right)}{2T_n tg\left(\pi/4 - 0{,}5\varphi_o\right)} \cos\left[ arctg \frac{\pi D_B tg\left(\pi/4 - 0{,}5\varphi_o\right)}{R_c + r_б} \right] \times$$
$$\times \frac{2\pi\rho_k}{3m_{kc}^{(1)}} q_k^{(1)} h_k^2 \left(1 - \lambda_{вк}\right) N_k z_c \left( \frac{D_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_k \right) \sum_{i=1}^{n} F_{1ci}; \quad (4.27)$$

- залежно від агробіологічної урожайності коренеплодів

$$M_{2c} = \frac{\left(r_б + l_B\right)\left(L_k + D_k\right)\left(R_c + r_б\right)}{2T_n tg\left(\pi/4 - 0{,}5\varphi_o\right)} \frac{t}{m_{kc}^{(1)}} \times$$
$$\times \cos\left[ arctg \frac{\pi D_B tg\left(\pi/4 - 0{,}5\varphi_o\right)}{R_c + r_б} \right] B_k \vartheta_M b_м \left(1 - \lambda_{вк}\right) N_k z_c \sum_{i=1}^{n} F_{2ci}, \quad (4.28)$$

де $\pi/4 - 0{,}5\varphi_o = \beta_o$ – кут підйому гвинтової лінії пружних стрижнів, рад.;

$\varphi_o$ – кут тертя ковзання пружних стрижнів по ґрунту, рад.

Визначення сумарної (результуючої) сили $\sum_{i=1}^{n} F_{1ci}$, $\sum_{i=1}^{n} F_{2ci}$ процесу зскрібання грунту, що налипнув на коренеплодах, проведемо з припущення, що робота пружного стрижня протікає в умовах максимальної допустимої пружності стрижня на чистий вигин.

При цьому максимальна результуюча сила $\sum_{i=1}^{n} F_{1ci.1\max}$, $\sum_{i=1}^{n} F_{2ci.1\max}$ процесу зскрібання налиплого грунту з поверхні тіла коренеплоду одиничним стрижнем буде за умови максимальної допустимої деформації одиничного пружного стрижня на чистий вигин, тобто дорівнюватиме $b_{max}$ (рис. 4.4), а довжина пружного стрижня $l_B$, яка бере участь у роботі (контактує з налиплим грунтом на поверхні тіла коренеплодів) буде максимальною, тобто дорівнює повній конструктивній довжині пружного стрижня $L_c$, який закріплено на барабані приводного вала.

Тоді $l_B = L_c$, а $R_B = r_б + L_c = R_c$.

З урахуванням цього, залежності (4.27) і (4.28) можна записати у вигляді:

- залежно від геометричних розмірних параметрів коренеплодів

$$M_{1c.\max} = \frac{R_c\left(L_k + D_k\right)\left(R_c + r_б\right)}{2T_n tg\left(\pi/4 - 0{,}5\varphi_o\right)} \cos\left[ arctg \frac{\pi D_B tg\left(\pi/4 - 0{,}5\varphi_o\right)}{R_c + r_б} \right] \times$$
$$\times \frac{2\pi\rho_k}{3m_{kc}^{(1)}} q_k^{(1)} h_k^2 \left(1 - \lambda_{вк}\right) N_k z_c \left( \frac{D_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_k \right) \sum_{i=1}^{n} F_{1c.\max} \quad ; \qquad (4.29)$$

$$M_{2c.\max} = \frac{R_c\left(L_k + D_k\right)\left(R_c + r_б\right)}{2T_n tg\left(\pi/4 - 0{,}5\varphi_o\right)} \cos\left[ arctg \frac{\pi D_B tg\left(\pi/4 - 0{,}5\varphi_o\right)}{R_c + r_б} \right] \times$$
$$\times \frac{t}{m_{kc}^{(1)}} B_k \vartheta_M b_м \left(1 - \lambda_{вк}\right) N_k z_c \sum_{i=1}^{n} F_{2i.\max} \quad , \qquad (4.30)$$

З залежностей (4.29) і (4.30) визначаємо $\sum_{i=1}^{n} F_{1ci.\max}$, $\sum_{i=1}^{n} F_{2ci.\max}$, при цьому:

- залежно від геометричних розмірних параметрів коренеплодів

$$\sum_{i=1}^{n} F_{1ci.\max} = \frac{M_{1c.\max} 2T_n tg\left(\pi/4 - 0{,}5\varphi_o\right)}{R_c\left(L_k + D_k\right)\left(R_c + r_б\right)\cos\left[ arctg \frac{\pi D_B tg\left(\pi/4 - 0{,}5\varphi_o\right)}{R_c + r_б} \right]} \times$$
$$\times \left[ \frac{2\pi\rho_k}{3m_{kc}^{(1)}} q_k^{(1)} h_k^2 \left(1 - \lambda_{вк}\right) N_k z_c \left( \frac{D_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_k \right) \right]^{-1} \quad ; \qquad (4.31)$$

- залежно від агробіологічної урожайності коренеплодів

$$\sum_{i=1}^{n} F_{2ci.\max} = \frac{M_{2i.\max} 2T_n tg\left(\pi/4 - 0{,}5\varphi_o\right)}{R_c\left(L_k + D_k\right)\left(R_c + r_б\right)\cos\left[arctg\dfrac{\pi D_B tg\left(\pi/4 - 0{,}5\varphi_o\right)}{R_c + r_б}\right]} \times$$
$$\times\left[\frac{t}{m_{kc}^{(1)}} B_k \vartheta_M b_м \left(1 - \lambda_{вк}\right) N_k z_c\right]^{-1}; \quad (4.32)$$

Крім того, згідно з [299] маємо:

$$\sum_{i=1}^{n} F_{ic.\max} = W_c \frac{\left[\sigma_{ic.\max}\right]}{l_d} = \frac{0{,}1 d_c^3}{l_d}\left[\sigma_{ic.\max}\right], \quad (4.33)$$

де $W_c$ – коефіцієнт витривалості на вигин очисного пружного стрижня, м$^3$ [301];

$d_c$ – діаметр поперечного перерізу очисного пружного стрижня, м;

$\left[\sigma_{ic.\max}\right]$ – допустимі напруження, які виникають в пружному стрижні під час його вигину, Па;

$l_d$ – вільна довжина пружного стрижня, що деформується під час контактної взаємодії з налиплим грунтом, м.

Зіставивши почергово ліву частину рівняння (4.31) та ліву частину рівняння (4.32) з правою частиною рівняння (4.33), отримано залежність, яка характеризує та функціонально описує максимально-допустимі критичні нормальні напруження, що виникають у тілі пружного стрижня під час його контактної взаємодії з налиплим ґрунтом, який знаходиться на поверхні тіла коренеплодів, відповідно:

- залежно від геометричних розмірних параметрів коренеплодів

$$\left[\sigma_{1c.\max}\right] = \frac{20 M_{1c.\max} T_n l_d tg\left(\pi/4 - 0{,}5\varphi_o\right)}{R_c d_c^3\left(L_k + D_k\right)\left(R_c + r_б\right)\cos\left[arctg\dfrac{\pi D_B tg\left(\pi/4 - 0{,}5\varphi_o\right)}{R_c + r_б}\right]} \times$$
$$\times\left[\frac{2\pi\rho_k}{3m_{kc}^{(1)}} q_k^{(1)} h_k^2 \left(1 - \lambda_{вк}\right) N_k z_c \left(\frac{D_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)} - h_k\right)\right]^{-1}; \quad (4.34)$$

- залежно від агробіологічної урожайності коренеплодів

$$\left[\sigma_{2c.\max}\right]=\frac{20M_{2i.\max}T_n l_d tg\left(\pi/4-0{,}5\varphi_o\right)}{R_c d_c^3\left(L_k+D_k\right)\left(R_c+r_б\right)\cos\left[arctg\dfrac{\pi D_B tg\left(\pi/4-0{,}5\varphi_o\right)}{R_c+r_б}\right]}\times$$
$$\times\left[\frac{t}{m_{kc}^{(1)}}B_k\vartheta_M b_м\left(1-\lambda_{вк}\right)N_k z_c\right]^{-1}. \quad (4.35)$$

З урахуванням рівняння (4.19) та (4.34), (4.35), отримано залежність, яка характеризує зміну максимально-допустимої сили $\sum_{k=1}^{n}F_{1ci.\max}$, $\sum_{k=1}^{n}F_{2ci.\max}$ процесу зшкрябування налиплого грунту з поверхні тіла коренеплоду пружними елементами, або математичну модель процесу інтенсифікації відокремлення налиплого грунту з поверхні тіла коренеплоду залежно від зміни конструктивно-кінематичних параметрів ОТТМ, параметрів коренеплоду та фізичних властивостей пружних елементів і їх кількості $K_c$:

- залежно від геометричних розмірних параметрів коренеплодів

$$\sum_{i=1}^{n}F_{1ci.\max}=\frac{\left[\sigma_{1c.\max}\right]R_c d_c^3\left(L_k+D_k\right)\left(R_c+r_б\right)\cos\left[arctg\dfrac{\pi D_B tg\left(\pi/4-0{,}5\varphi_o\right)}{R_c+r_б}\right]}{\dfrac{20\left(0{,}5d_б+l_B\right)T_n l_d tg\left(\pi/4-0{,}5\varphi_o\right)}{\left[\dfrac{2\pi\rho_k}{3m_{kc}^{(1)}}q_k^{(1)}h_k^2\left(1-\lambda_{вк}\right)N_k z_c\left(\dfrac{D_k}{2\sin\left(0{,}5\varphi_k\right)}-h_k\right)\right]}}; \quad (4.36)$$

- залежно від агробіологічної урожайності коренеплодів

$$\sum_{i=1}^{n}F_{2ci.\max}=\frac{\left[\sigma_{1c.\max}\right]R_c d_c^3\left(L_k+D_k\right)\left(R_c+r_б\right)\cos\left[arctg\dfrac{\pi D_B tg\left(\pi/4-0{,}5\varphi_o\right)}{R_c+r_б}\right]}{20\left(0{,}5d_б+l_B\right)T_n l_d tg\left(\pi/4-0{,}5\varphi_o\right)\left[\dfrac{t}{m_{kc}^{(1)}}B_k\vartheta_M b_м\left(1-\lambda_{вк}\right)N_k z_c\right]^{-1}}. \quad (4.37)$$

Тоді, згідно з рис. 4.3, максимальна сумарна (результуюча) сила $\sum_{i=1}^{n}F_{ci.\max}$ процесу зшкрябування налиплого грунту дорівнює сумі всіх сил, які виникають під час контактної взаємодії пружних елементів з поверхнею тіла коренеплоду, які спроектовано на вісь $Ox$, або $Bx'$, тобто

$$\sum_{k=1}^{n}\vec{F}_{ic.\max k}=\left(\vec{F}_{ic.1\max}+\vec{F}_{1\omega_k}+\vec{F}_{1m}\right)K_c\text{, або }\sum_{k=1}^{3}F_{ic.\max k}=\left(F_{ic.\max}+F_{\omega_k}-F_m\right)K_c\text{,}\quad(4.38)$$

де $F_{ic.1\max}$, $F_{1\omega_k}$, $F_{1m}$ – відповідно, максимально допустима сила зшкрябування одиничного коренеплоду, яка діє під час обертання пружних елементів, сила зшкрябування, яка діє під час обертання одиничного коренеплоду з кутовою швидкістю $\omega_k$, сила тертя одиничного коренеплоду, Н.

При цьому відповідні діючі сили, які виникають у процесі контакту пружних елементів з налиплим грунтом на поверхні тіла коренеплоду та безпосередньо з самим тілом коренеплоду згідно з [299, 303, 304] визначаються за формулами

$$F_{\omega_k}=0,25m_{kc}^{(1)}\omega_k^2D_k\text{;}\quad F_m=f_mF_n\text{,}\qquad(4.39)$$

де $D_c$ – діаметр приводного вала, м;

$D_k$ – діаметр коренеплоду, м;

$f_m$ – коефіцієнт тертя матеріалу пружного елементу по грунту;

$F_n$ – нормальна сила натягу (сила реакції) пружного елементу, Н.

Після підстановки значення рівняння (4.39) в (4.36), (4.37) і відповідних перетворень одержано залежність для визначення максимальної результуючої сила $\sum_{i=1}^{n}F_{1ci.\max k}$, $\sum_{i=1}^{n}F_{2ci.\max k}$ процесу відокремлення налиплого грунту з поверхні тіла коренеплодів з умови максимально допустимої пружності очисних елементів на вигин:

- залежно від геометричних розмірних параметрів коренеплодів

$$\sum_{i=1}^{3}F_{1c.\max k}=\frac{\left[\sigma_{1c.\max}\right]R_cd_c^3\left(L_k+D_k\right)(R_c+r_{\text{б}})\Phi+0,25m_k\omega_k^2D_k-f_mF_n}{\left[\dfrac{20\left(0,5d_{\text{б}}+l_B\right)k_eT_nl_dtg\left(\pi/4-0,5\varphi_o\right)}{\dfrac{2\pi\rho_k}{3m_{kc}^{(1)}}q_k^{(1)}h_k^2\left(1-\lambda_{\text{в}k}\right)N_kz_c\left(\dfrac{D_k}{2\sin\left(0,5\varphi_k\right)}-h_k\right)}\right]}\text{;}\quad(4.40)$$

- залежно від агробіологічної урожайності коренеплодів

$$\sum_{i=1}^{3} F_{2ci.\max k} = \frac{\left[\sigma_{1c.\max}\right] R_c d_c^3 \left(L_k + D_k\right)(R_c + r_б)\Phi + 0,25 m_k \omega_k^2 D_k - f_m F_n}{20\left(0,5 d_б + l_B\right) k_e T_n l_d tg\left(\pi/4 - 0,5\varphi_o\right)\left[\frac{t}{m_{kc}^{(1)}} B_k \vartheta_M b_м \left(1-\lambda_{вк}\right) N_k z_c\right]^{-1}}, \quad (4.41)$$

де $\Phi = \cos\left[arctg \frac{\pi D_B tg\left(\pi/4 - 0,5\varphi_o\right)}{R_c + r_б}\right]$.

Тоді, з урахуванням того, що в загальному випадку сила зскрібання стрижнем на вигин визначається згідно [304] за формулою $F_{c.\max} = 0,25 m_e \omega_{e.\max}^2 D_c$, (де $m_e$ – маса пружних елементів, кг; $\omega_{e.\max}$ – максимально допустима кутова швидкість обертання очисних пружних елементів на вигин, рад/с; $D_c$ – діаметр приводного вала, м), визначаємо максимально допустиму кутову швидкість очисних пружних елементів, тобто:

- залежно від геометричних розмірних параметрів коренеплодів

$$\omega_{1e.\max} = \sqrt{\frac{\left\{\left[\sigma_{1c.\max}\right] R_c d_c^3 \left(L_k + D_k\right)(R_c + r_б)\Phi + 0,25 m_k \omega_k^2 D_k - f_m F_n\right\} W_k}{5 m_e D_c \left(0,5 d_б + l_B\right) k_e T_n l_d tg\left(\pi/4 - 0,5\varphi_o\right)}}; \quad (4.42)$$

- залежно від агробіологічної урожайності коренеплодів

$$\omega_{2e.\max} = \sqrt{\frac{\left\{\left[\sigma_{1c.\max}\right] R_c d_c^3 \left(L_k + D_k\right)(R_c + r_б)\Phi + 0,25 m_k \omega_k^2 D_k - f_m F_n\right\} W_{2k}}{5 m_e D_c \left(0,5 d_б + l_B\right) k_e T_n l_d tg\left(\pi/4 - 0,5\varphi_o\right)}}, \quad (4.43)$$

де $W_{1k} = \left[\frac{2\pi\rho_k}{3 m_{kc}^{(1)}} q_k^{(1)} h_k^2 \left(1-\lambda_{вк}\right) N_k z_c \left(\frac{D_k}{2\sin\left(0,5\varphi_k\right)} - h_k\right)\right]$;

$W_{2k} = \left[\frac{t}{m_{kc}^{(1)}} B_k \vartheta_M b_м \left(1-\lambda_{вк}\right) N_k z_c\right]$.

Допустима критична сумарна сила процесу зшкрябування з умови міцності за нормальними напруженнями згідно з [284, 286] визначається за формулою Ейлера

$$\sum_{i=1}^{3} F_{i.max} = \left(\frac{\pi}{\mu}\right)^2 \frac{EI}{l_e^2}, \quad (4.44)$$

а допустимі максимальні напруження згідно з [299] визначаються за формулою

$$\left[\sigma_{e.\max}\right] = \sum_{i=1}^{3} F_{i.\max} \,/\, S_e\,, \tag{4.45}$$

де $\mu = 2$ – коефіцієнт приведення довжини, який залежить від способу закріплення пружного елемента (у нашому випадку нижній кінець жорстко закріплений, а верхній вільний);

$E$ – модуль пружності (Юнга) матеріалу пружного елемента, Н/м$^2$;

$I$ – статичний момент інерції площі поперечного січення пружного елементу круглого профілю, м$^4$;

$S_e = 0,25\pi d_c^2$ – площа поперечного перерізу пружного елемента по якій розподілена сумарна сила, м$^2$.

Підставивши значення (4.44) і (4.45) у рівняння (4.40)-(4.43) та прийнявши, що довжина деформованої частини пружного елемента дорівнює $l_d = l_e = D_c - d_б$, маса пружного елемента $m_e = 0,25\pi d_c^2 L_c \rho_e$, його статичний момент інерції $I = \pi d_e^4 / 32$, маса коренеплоду $m_k = \pi D_k^2 L_k \rho_k / 12$, де $\rho_e$, – об'ємна маса матеріалу очисного пружного елемента, кг/м$^3$, отримаємо кінцеві залежності для визначення максимально допустимої результуючої сили $\sum_{k=1}^{3} F_{1ві.\max}$, $\sum_{k=1}^{3} F_{2ві.\max}$ процесу відокремлення налиплого грунту з поверхні тіла коренеплоду та максимально допустимої кутової швидкості пружних елементів $\omega_{1e.\max}$, $\omega_{2e.\max}$ на вигин:

- залежно від геометричних розмірних параметрів коренеплодів:

$$\sum_{k=1}^{n} F_{1в.\max k} = \frac{\left\{\pi^2 E R_c d_c^3 \left(L_k + D_k\right)(R_c + r_б)\Phi + 0,25 m_k \omega_k^2 D_k - f_m F_n\right\} W_{1k}}{160\mu^2 \left(D_c - d_б\right)^3 \left(0,5 d_б + l_B\right) T_n l_d tg\left(\pi/4 - 0,5\varphi_o\right)}; \tag{4.46}$$

$$\omega_{1e.\max} = \sqrt{\frac{\left\{\pi E R_c d_c^3 \left(L_k + D_k\right)(R_c + r_б)\Phi + 0,25 m_k \omega_k^2 D_k - f_m F_n\right\} W_{1k}}{10 L_c \rho_e D_c \left(0,5 d_б + l_B\right)\left(D_c - d_б\right)^4 T_n l_d tg\left(\pi/4 - 0,5\varphi_o\right)}}; \tag{4.47}$$

- залежно від агробіологічної урожайності коренеплодів

$$\sum_{i=1}^{3} F_{2ei.\max k} = \frac{\left\{\pi^2 E R_c d_c^3 \left(L_k + D_k\right)(R_c + r_б)\Phi + 0{,}25 m_k \omega_k^2 D_k - f_m F_n\right\} W_{2k}}{160\mu^2 \left(D_c - d_б\right)^3 \left(0{,}5 d_б + l_B\right) T_n l_d tg\left(\pi/4 - 0{,}5\varphi_o\right)}; \quad (4.48)$$

$$\omega_{2e.\max} = \sqrt{\frac{\left\{\pi E R_c d_c^3 \left(L_k + D_k\right)(R_c + r_б)\Phi + 0{,}25 m_k \omega_k^2 D_k - f_m F_n\right\} W_{2k}}{10 L_c \rho_e D_c \left(0{,}5 d_б + l_B\right)\left(D_c - d_б\right)^4 T_n l_d tg\left(\pi/4 - 0{,}5\varphi_o\right)}}; \quad (4.49)$$

За початкових умов $E = 1{,}5$ ГПа, $\rho_e = 910$ кг/м$^3$ (матеріал пружних елементів – капрон марки А), $d_б = 0{,}2$ м, $L_k = 0{,}20$ м, $D_k = 0{,}15$ м, $m_k = 1{,}5$ кг; $T_n = 0{,}15$ м, $\rho_k = 550$ кг/м$^3$, $\omega_k = 0{,}2$ рад/с побудовано графічні залежності:

- зміни максимально допустимої результуючої сили $\sum_{k=1}^{3} F_{2c.\max k}$ процесу відокремлення налиплого грунту з поверхні тіла коренеплодів від діаметра $D_c$ приводного вала та діаметра пружних елементів $d_c$ (від геометричних розмірних параметрів коренеплодів), рис. 4.4;

- зміни максимально допустимої кутової швидкості очисних пружних елементів $\omega_{2e.\max}$ на вигин від діаметра $D_c$ приводного вала та діаметра очисних пружних елементів $d_c$ (від геометричних розмірних параметрів коренеплодів), рис. 4.5.

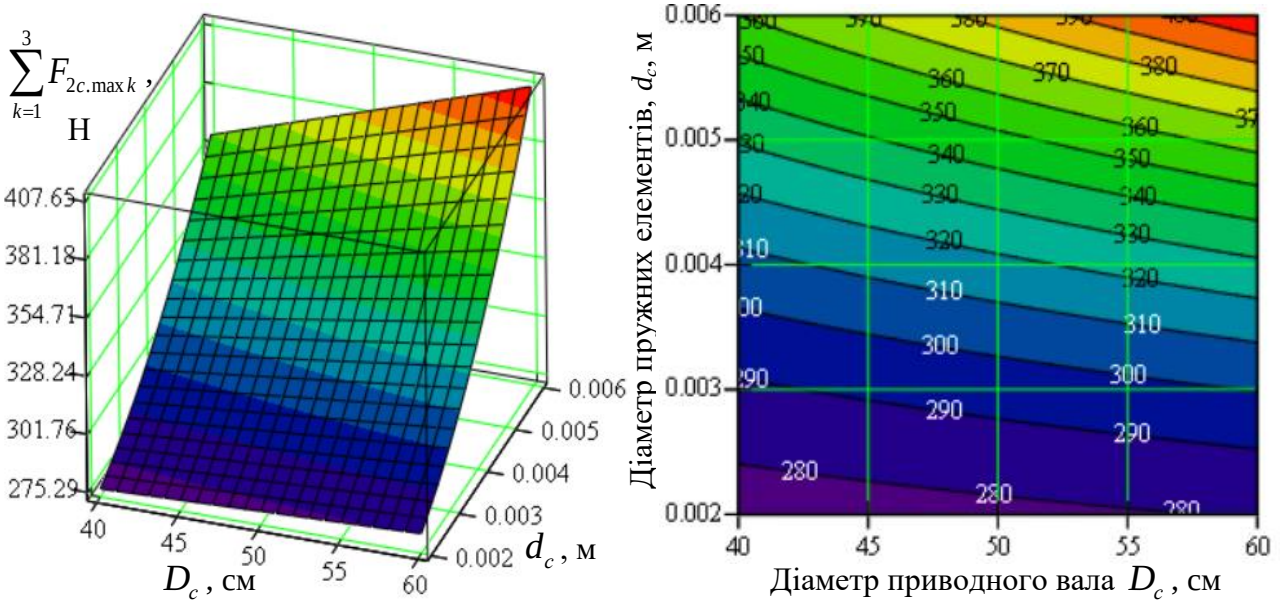



Рисунок 4.4 – Залежність зміни $\sum_{k=1}^{3} F_{2c.\max k} = f_F(D_c; d_c)$

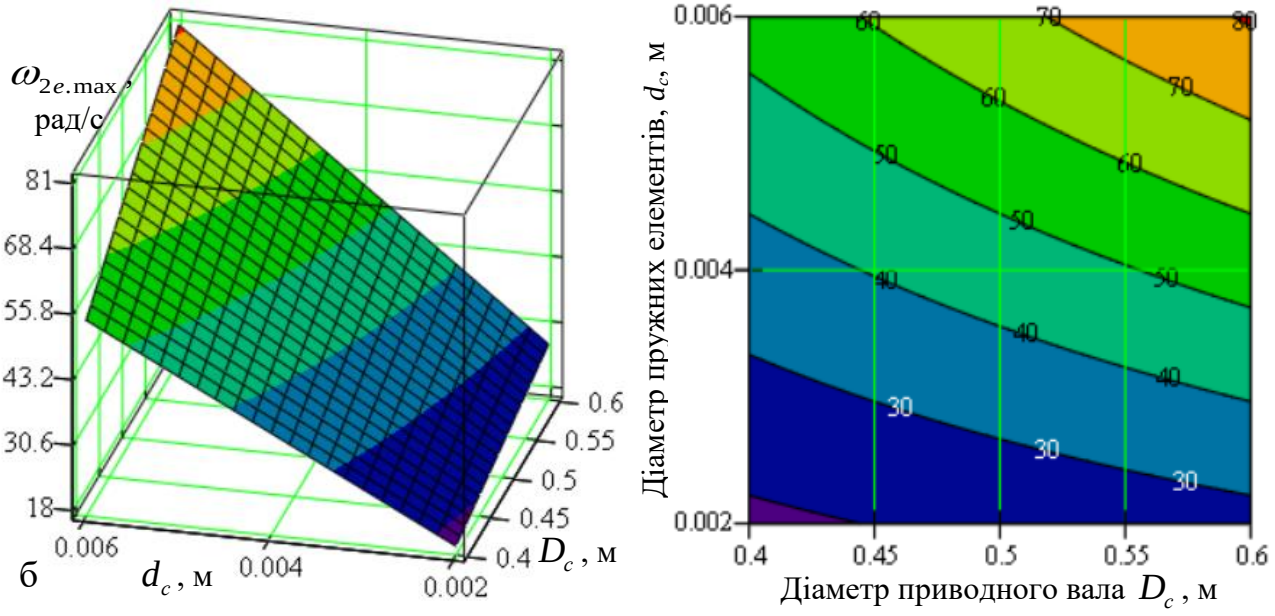



Рисунок 4.5 – Залежність зміни $\omega_{2c.\max} = f_\omega(D_c; d_c)$

Аналіз графічних залежностей (рис. 4.4, 4.5) показує, що з умови забезпечення максимально допустимої пружності на вигин очисних пружних елементів, максимально допустима результуюча сила $\sum_{k=1}^{3} F_{2c.\max k}$ процесу відокремлення налиплого грунту з поверхні тіла коренеплодів за зміни діаметра приводного вала $D_c$ в межах від 0,4 до 0,6 м та діаметра $d_e$ пружних елементів в межах від 2 до 6 мм за значення секундної подачі коренеплодів $W_k = 7{,}0$ кг/с (рис. 2.17) з очисної гірки до очисних пружних елементів, знаходиться в середньому діапазоні 280…400 Н, а максимальні значення допустимої кутової швидкості пружних елементів $\omega_{2e.\max}$ знаходяться в середньому діапазоні 20…80 рад/с.

При цьому існує прямо пропорційна залежність зміни $\sum_{k=1}^{3} F_{2c.\max k}$ і $\omega_{2e.\max}$ – зі збільшенням $D_c$ і $d_e$ значення допустимої кутової швидкості пружних елементів $\omega_{e.\max}$ зменшуються, що також підтверджується характером зміни функціональних залежностей $\sum_{k=1}^{3} F_{2c.\max k} = f_F(D_c)$, $\omega_{2e.\max} = f(D_c)$, які наведено на рис. 4.6.

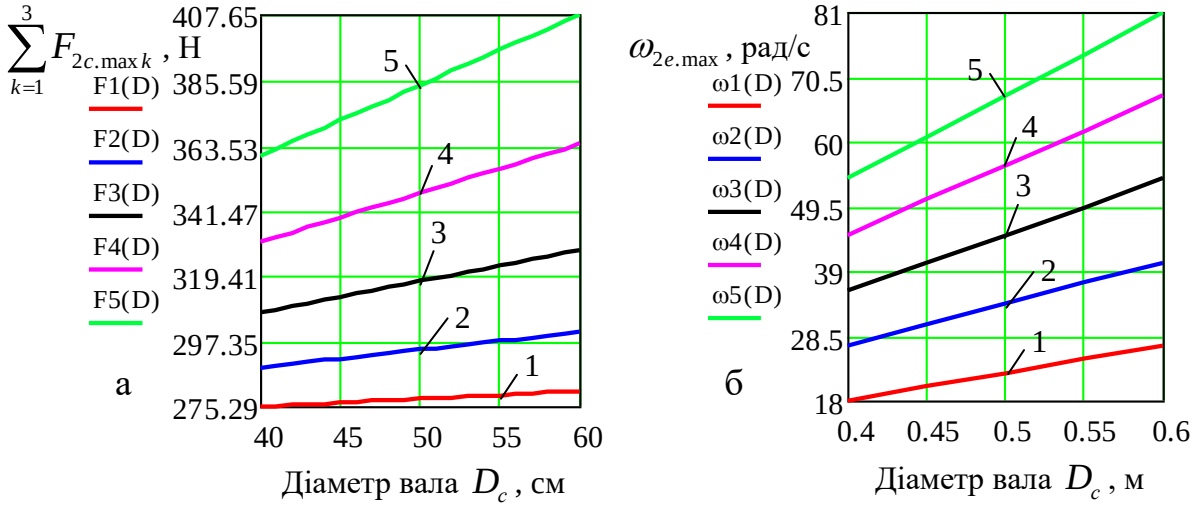



Рисунок 4.6 – Залежність зміни як функція: а – $\sum_{k=1}^{3} F_{2ві.\max k} = f_F(D_c)$; б – $\omega_{2e.\max} = f_\omega(D_c)$; 1, 2, 3, 4, 5 – відповідно, $d_e = 2$; 3; 4; 5; 6 (мм)

Згідно з даними додатка Г.2.3 для визначення та обгрунтування параметрів очисних пружних елементів побудовано діаграмі зміни максимально допустимої частоти обертання очисних пружних елементів, які наведено на рис. 4.7, 4.8.

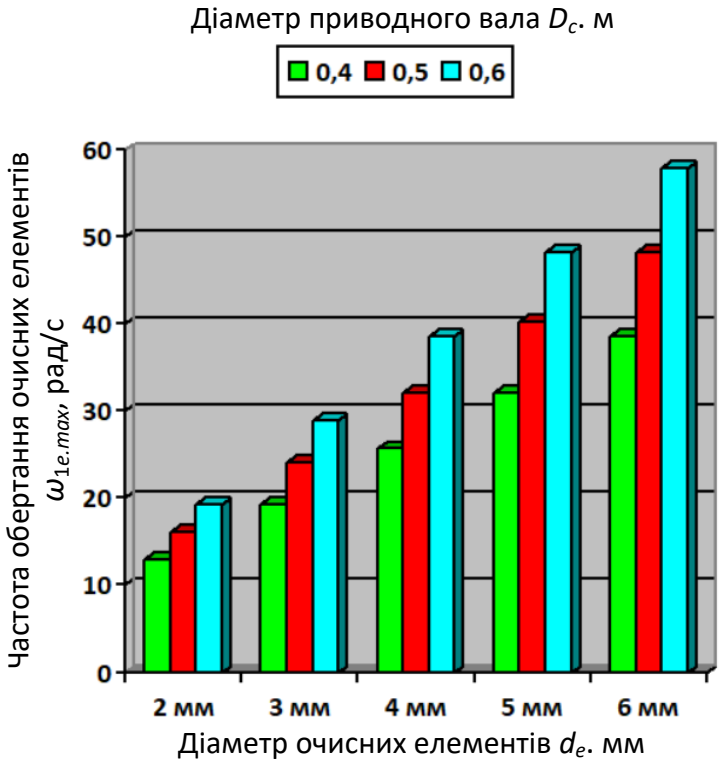



Рисунок 4.7 – Діаграма зміни максимально допустимої частоти обертання очисних пружних елементів за секундної подачі коренеплодів $W_k = 5$ кг/с

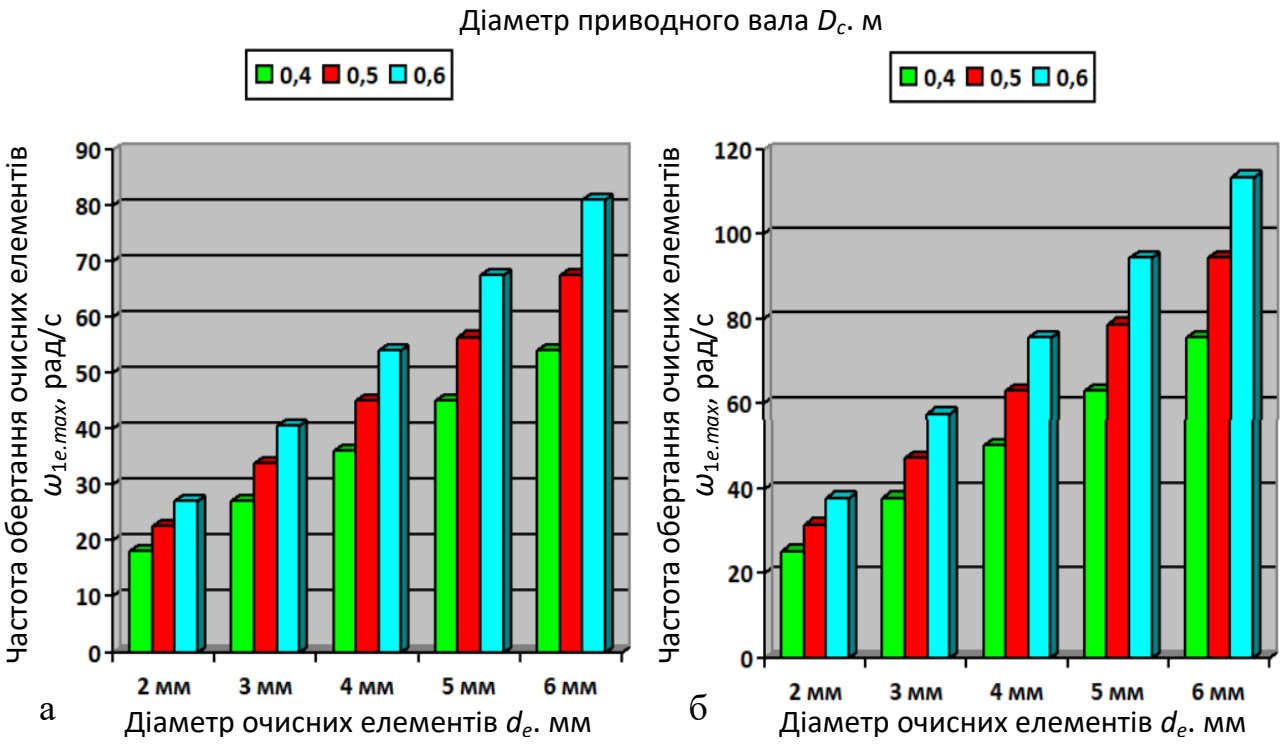



Рисунок 4.8 – Діаграма зміни максимально допустимої частоти обертання очисних пружних елементів за секундної подачі коренеплодів: а – $W_k = 7$ кг/с; б – $W_k = 9$ кг/с

Використовуючи побудовані номограми визначають і встановлюють комбінації параметрів комбінованого робочого органу 3 (рис. 2.9) залежно від значень технологічних показників роботи коренезбиральної машини.

Наприклад, при секундній подачі коренеплодів з модуля викопування коренеплодів до ОТТМ рівній $W_k = 7$ кг/с та прийнятих конструктивних параметрів (діаметра приводного вала рівного $D_c = 0{,}5$ м та діаметра очисних пружних елементів $d_e =$ 4 мм), максимально допустима частота обертання очисних пружних елементів на вигин буде становити 45 рад/с, при $d_e =$ 6 мм – 67,5 рад/с і т.д., рис. 4.8а.

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

Крім того резюмуючи викладене, можна також констатувати, що процес відокремлення налиплого грунту з поверхні тіла коренеплодів пружними очисними елементами розглянуто за статичного положення коренеплоду на поверхнях системи шнеків, тобто без урахування швидкості осьового переміщення коренеплодів вздовж осьової лінії обертання приводного вала.

Подальший аналітичний аналіз такого процесу буде вносити свої певні корективи в прикінцеві значення параметрів комбінованого робочого органу ОТТМ.

### 4.3. Висновки до розділу

4.4.1. Отримана аналітична залежність (4.18) дозволяє розраховувати деформацію пружних очисних елементів залежно від сили тиску коренеплодів з налиплим грунтом і параметри приводного вала ОТТМ.

4.4.2. Встановлено, що 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 грунту з поверхні тіла коренеплодів знаходяться в середніх межах від 280 до 400 Н;

- допустима максимальна кутова швидкість очисних пружних елементів знаходиться в середніх межах від 20 до 80 рад/с.

4.4.3. За секундної подачі коренеплодів з модуля викопування коренеплодів до ОТТМ рівної $W_k = 7$ кг/с, діаметра приводного вала рівного $D_c = 0{,}5$ м та діаметра очисних пружних елементів $d_e =$ 4 мм, максимально допустима частота обертання очисних пружних елементів на вигин буде становити 45 рад/с, при $d_e =$ 6 мм – 67,5 рад/с.

Основні положення розділу опубліковано у наукових працях [47, 75, 137, 224, 285, 291, 293, 295, 297, 298, 300, 303].

# РОЗДІЛ 5
# МЕТОДОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ОЧИСНИХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОДУЛІВ

## 5.1. Програма проведення експериментальних досліджень, характеристика експериментальних установок

Ступінь науково-практичної (виробничої) значущості будь-яких теоретичних моделей характеризується критерієм адекватності описаних нею подій реальному практичному процесу, або ступеня відповідності її аналітичних результатів реальним практичним показникам.

Дані критерії адекватності встановлюються у результаті проведення експериментальних досліджень, реалізація яких відбувається за відповідними розробленими методиками та планами [187, 305].

Програма проведення експериментальних досліджень ОТТМ була такою:

1. Провести експериментальні дослідження з визначення загального коефіцієнта $\mu_{зд}^{(Z)}$ та коефіцієнта сепарації $\mu_{зд}^{(Z_q)}$ загальних домішок $q$-ої ділянки похилого транспортера 1, рис. 3.1.

2. Встановити функціональний характер дальності польоту коренеплодів цикорію із похилого транспортера 1 до очисної гірки 2, рис. 3.1.

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

- ОТТМ (рис. 2.9) на посівах цукрових буряків, рис. 5.1а;
- ОТТМ (рис. 2.10) на посівах кормових буряків, рис. 5.1б;
- ОТТМ на посівах коренеплодів цикорію, рис. 5.1в.

4. Провести порівняльні дослідження показників якості роботи ОТТМ у виробничих умовах.

5. Визначити показники енергетичних витрат процесу роботи ОТТМ під час збирання крупних коренеплодів у складі коренезбиральної машини.

При цьому:

- об’єктом експериментальних досліджень, або об’єктом моделювання технічної системи, є технологічний процес очищення коренеплодів від домішок і очисні транспортно-технологічні модулі коренезбиральних машин;

- предметом експериментальних досліджень, є параметри очисних транспортно-технологічних модулів і їх взаємозв’язок впливу на показники якості відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів.

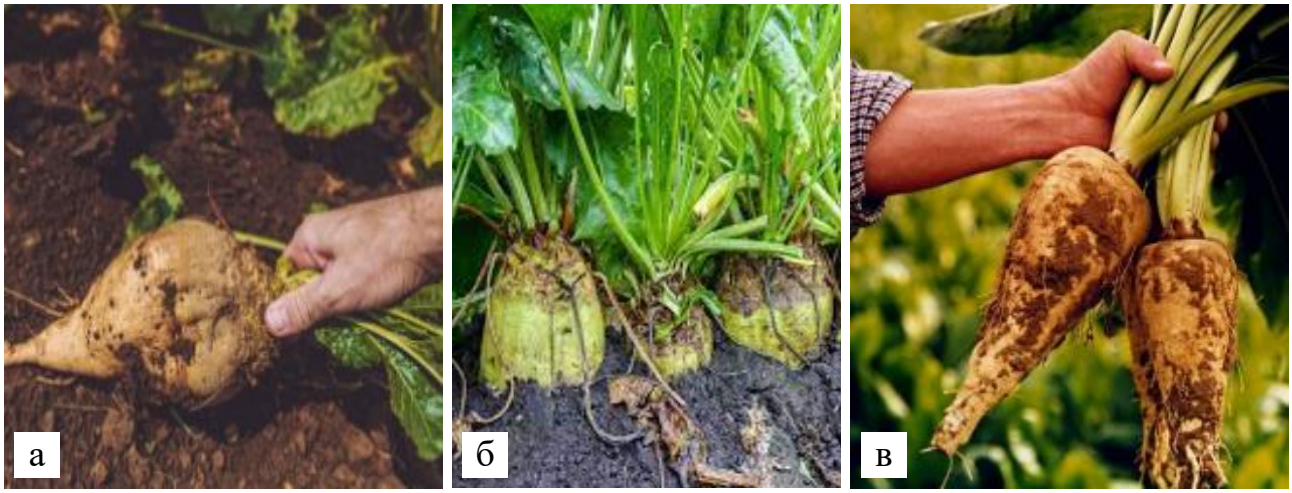



Рисунок 5.1 – Загальний вигляд крупних коренеплодів: а – цукрових буряків; б – кормових буряків; в – коренеплодів цикорію

Будь який об’єкт моделювання, або технічна система, є предметом її вивчення або проведення дослідження (оптимізації) кількості її станів.

Відносно запропонованих ОТТМ ці різні стани, у яких перебуває складна технічна система, характеризують основні властивості й спроможності робочих елементів ОТТМ, структурну схему яких, як об’єкта моделювання, наведено на рис. 5.2, виконаного за методом кібернетичного поняття «чорної скрині [305].

Можливий стан «чорної скрині», або моделі об’єкта ОТТМ, формулюється сукупністю кількості різних значень її входів, тобто змінних вхідних факторів і значень їх рівнів варіювання, або їх зміни.

При цьому сукупність станів об’єкта ОТТМ формує технічну складність станів системи та визначає умови реалізації одного можливого експерименту, а результати експерименту відтворюють математичну модель об’єкта дослідження [187, 305].

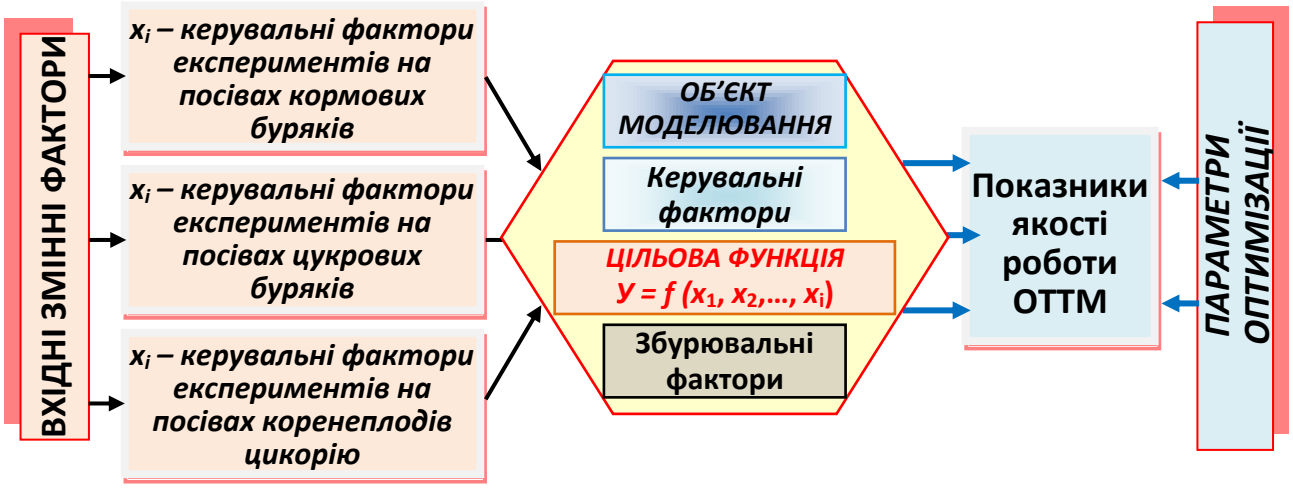



Рисунок 5.2 – Структурна схема реалізації експериментальних досліджень ОТТМ

Для реалізації експериментальних досліджень застосовано:

- для польових експериментальних досліджень з визначення загального коефіцієнта $\mu_{зд}^{(Z)}$ та коефіцієнта сепарації $\mu_{зд}^{(Z_q)}$ загальних домішок $q$-ої ділянки похилого транспортера 1 (рис. 3.1) й показників якості роботи ОТТМ на посівах кормових буряків застосовано відповідно, причіпну трирядну коренезбиральну машину та модернізовану коренезбиральну машину МКК-6А, конструктивну схему яких наведено відповідно, на рис. 5.3а, 5.4а, а загальний вигляд – на рис. 5.3б, 5.4б;

- для встановлення функціонального характеру дальності польоту коренеплодів цикорію із похилого транспортера до очисної гірки застосовано лабораторний стенд, конструктивну схему якого наведено на рис. 5.5а, а загальний вигляд – на рис. 5.5б;

- для польових експериментальних досліджень із визначення показників якості роботи ОТТМ на посівах цукрових буряків застосовано модернізовану причіпну коренезбиральну машину МПК-4, конструктивну схему якої наведено на рис. 5.6а, а загальний вигляд – на рис. 5.6б;

- для польових експериментальних досліджень із визначення показників якості роботи ОТТМ на посівах коренеплодів цикорію застосовано причіпну трирядну коренезбиральну машину, конструктивну схему якої наведено на рис. 5.3а, а загальний вигляд – на рис. 5.3б.

Базовими вузлами трирядної причіпної машини є МВК *I* (рис. 5.3) [69], похилий транспортер 2, ОТТМ *III*, вивантажувальний транспортер 6.

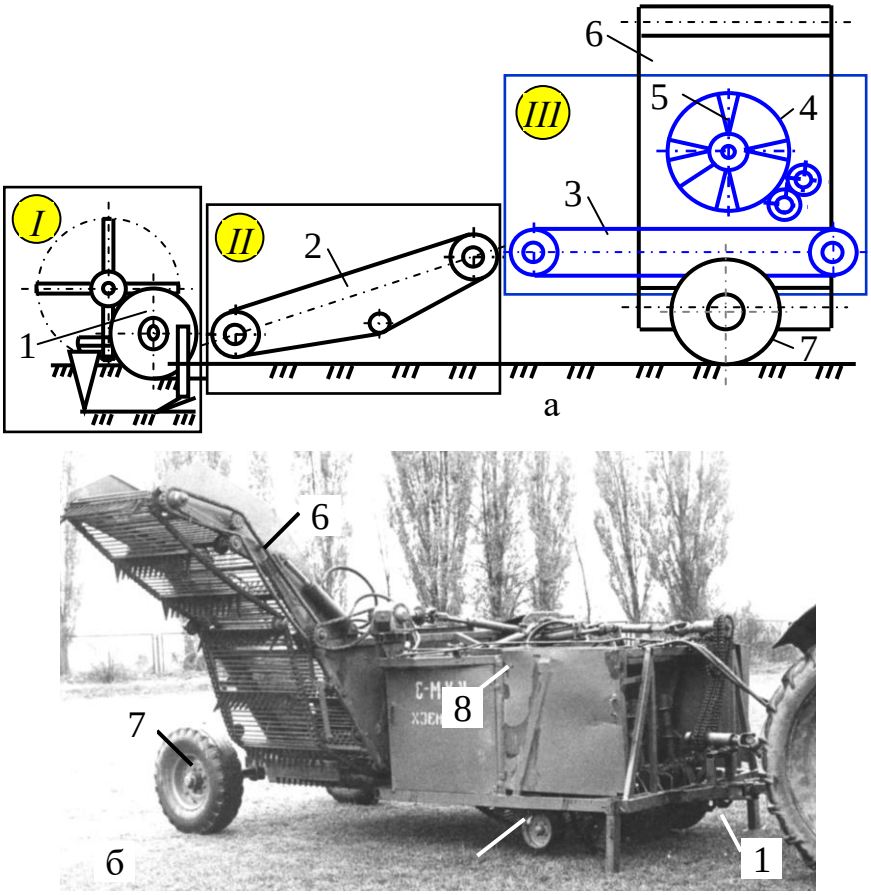
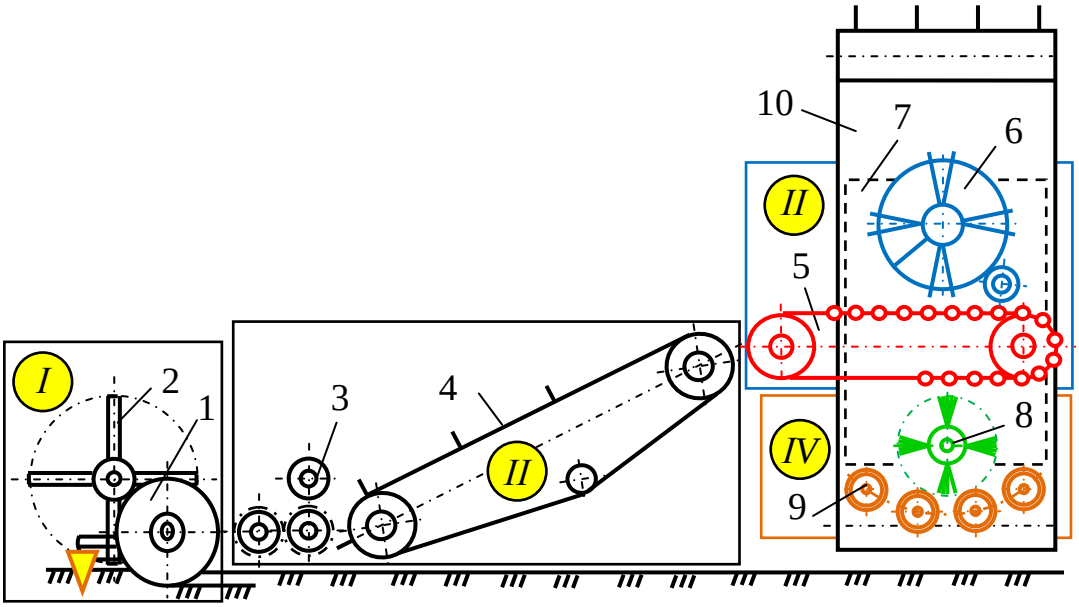



Рисунок 5.3 – Причіпна коренезбиральна машина: а – конструктивна схема; б – загальний вигляд; *I* – МВК; *II* – очисна система; *III* – ОТТМ; 1 – копач; 2, 3 – похилий і горизонтальний транспортер; 4 – шнековий конвеєр; 5 – очисні елементи; 6 – вивантажувальний транспортер; 7 – опорне колесо; 8 – рама

Викопаний однодисковими сферичними копачами 1 (рис. 5.6) ворох надходить до похилого транспортера 2 очисної системи *II*, де відбувається попереднє часткове відокремлення компонентів домішок від коренеплодів. Далі ворох переміщується до горизонтального транспортера 3 ОТТМ *III*.

Подальша робота очисної системи *III* коренезбиральної машини аналогічна процесу роботи ОТТМ, який описано у підрозділі 2.2 другого розділу дисертаційної роботи згідно з рис. 2.10. Очищені коренеплоди вивантажувальним транспортером 5 завантажуються у транспортний засіб і перевозяться до місця призначення.

Технічну характеристику трирядної причіпної коренезбиральної машини наведено в додатку Д.1.1.




а

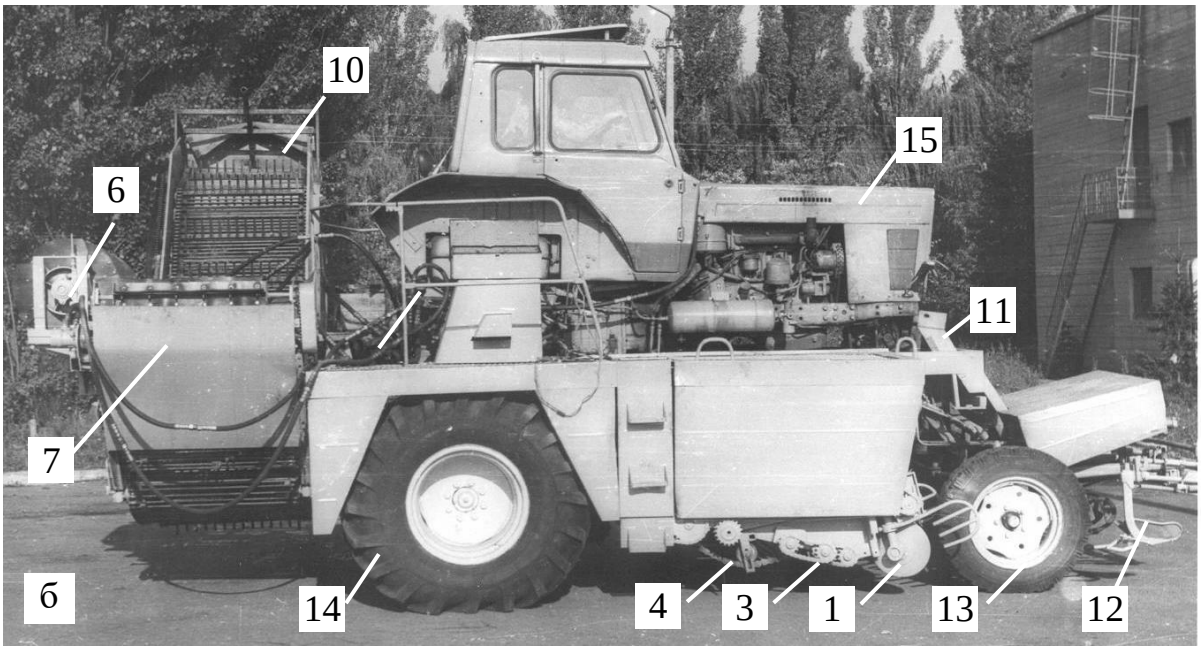



Рисунок 5.4 – Модернізована самохідна коренезбиральна машина МКК-6А: а – конструктивна схема; б – загальний вигляд; *I* – модуль викопування коренеплодів; *II* – очисна система; *III*, *IV* – відповідно, комбінований робочий орган 1 і 2 ОТТМ; 1 – однодисковий копач; 2 – горизонтальний очисний вал; 3 – шнековий очисник; 4 – похилий прутковий транспортер; 5 – горизонтальний прутковий транспортер; 6 – шнековий конвеєр; 7 – очисна гірка; 8 – приводний горизонтальний вал з очисними пружними елементами; 9 – системи очисних шнеків; 10 – вивантажувальний транспортер; 11 – рама; 12 – система керування по рядках; 13 – копіювальне колесо; 14 – опорне колесо; 15 – трактор

Базовими вузлами коренезбиральної машини МКК-6А є МВК *I* (рис. 5.4), очисна система *II*, ОТТМ *III* і *IV*, вивантажувальний транспортер 10.

Викопаний копачами 1 (рис. 5.4) ворох надходить до шнекового звужувача 3, де відбувається просіювання частини компонентів домішок. У подальшому коренеплоди та компоненти домішок переміщуються похилим прутковим транспортером 4 до горизонтального транспортера 5 та шнекового конвеєра 6, де відбувається очищення коренеплодів від домішок.

Подальша робота очисної системи *III*, *IV* коренезбиральної машини аналогічна процесу роботи ОТТМ, який описано у підрозділі 2.2 другого розділу дисертаційної роботи згідно з рис. 2.9 й рис. 2.10. Очищені коренеплоди вивантажувальним транспортером 10 завантажуються в транспортний засіб і перевозяться до місця призначення.

Технічну характеристику коренезбиральної машини МКК-6А наведено в додатку Д.2.1.

Базовими складовими вузлами лабораторного стенда є рама 1 (рис. 5.5а, б), на якій змонтовано похилий транспортер 2, очисна гірка 3, гідравлічна насосна станція 4 з електродвигуном 5 (рис. 5.5в).

Лабораторний стенд призначений для дослідження дальності польоту коренеплодів 1 (рис. 5.5) із похилого транспортера 2 до точки контакту коренеплоду із робочою гілкою очисної гірки 3 у горизонтальній та вертикальній площинах.

Очисну гірку встановлено на рамі лабораторного стенда із можливістю регулювання її кута нахилу в горизонтальній площині й регулювання її закріплення на рамі стенда в двох площинах – горизонтальному та вертикальному положенні відносно точки сходження коренеплодів із скребка похилого транспортера.

Привод похилого транспортера 2 (рис. 5.5) та очисної гірки 3 відбувався гідромоторами 7 і 8, при цьому частоту їх обертання змінювали шляхом подачі об’ємної кількості масла в регулювальні дроселі 9.

Під час руху похилого транспортера 2 коренеплоди 1 переміщуються до його вихідної частини, а далі за рахунок їх зштовхування скребками транспортера летять до робочої поверхні очисної гірки 3.

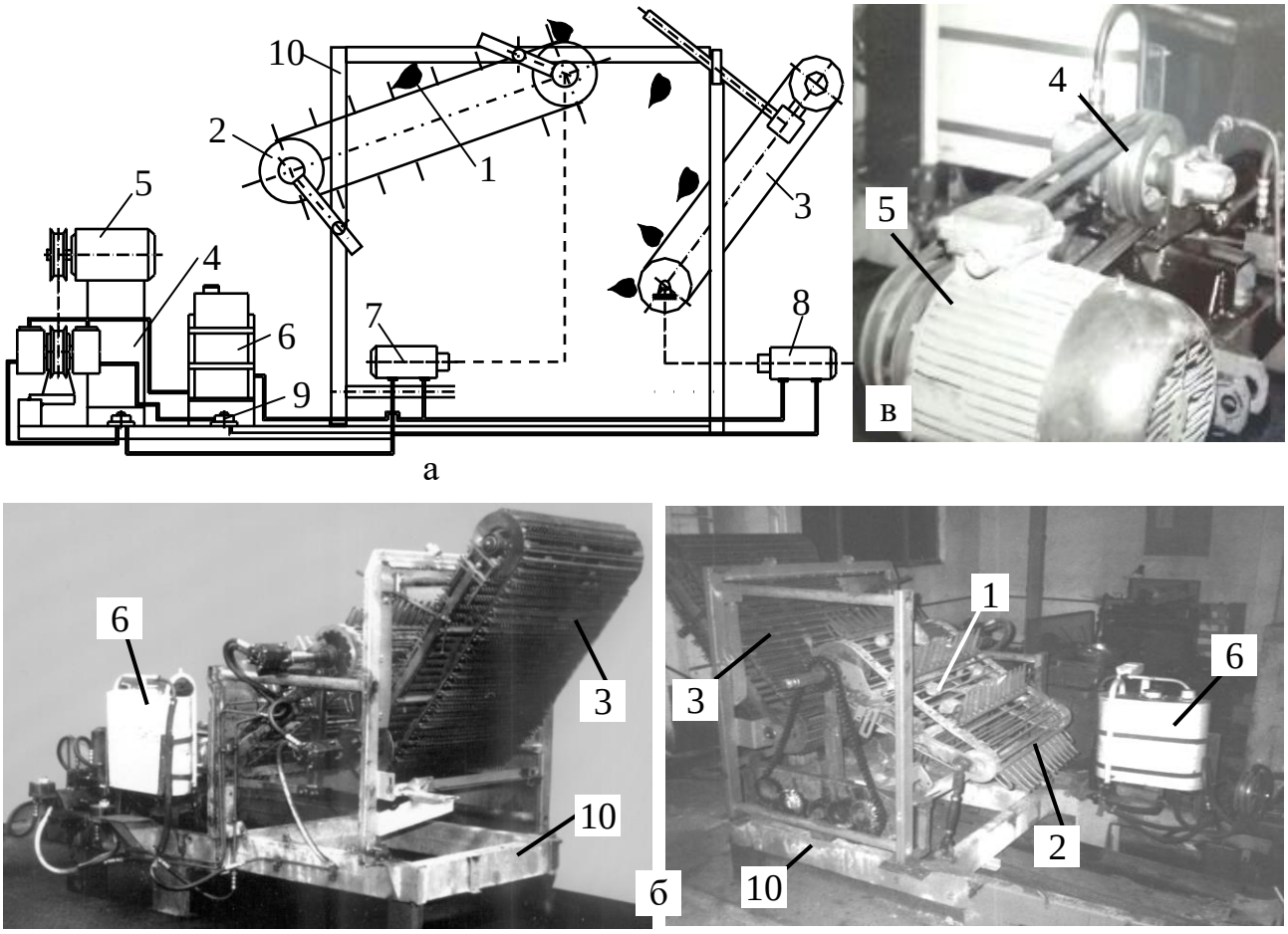
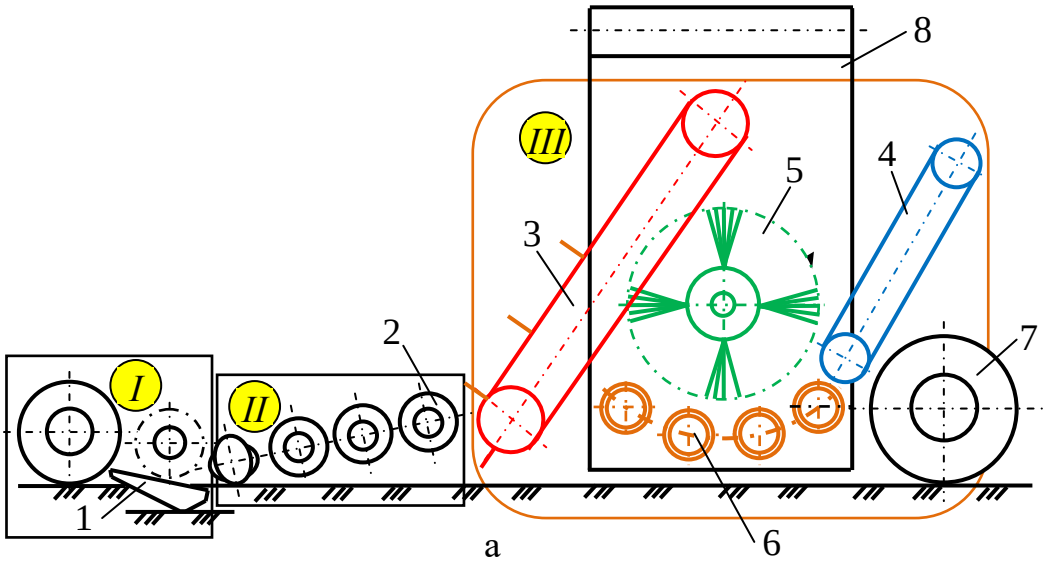



Рисунок 5.5 – Лабораторний стенд для проведення експериментальних досліджень з визначення дальності польоту коренеплоду: а – конструктивна схема; б – загальний вигляд; в – загальний вигляд насосної станції з двигуном; 1 – коренеплід; 2 – похилий транспортер; 3 – очисна гірка; 4 – гідравлічна насосна станція; 5 – електродвигун; 6 – масляний бак; 7, 8 – відповідно, гідромотори приводу похилого скребкового транспортера та приводу очисної гірки; 9 – регулювальний дросель; 10 – рама

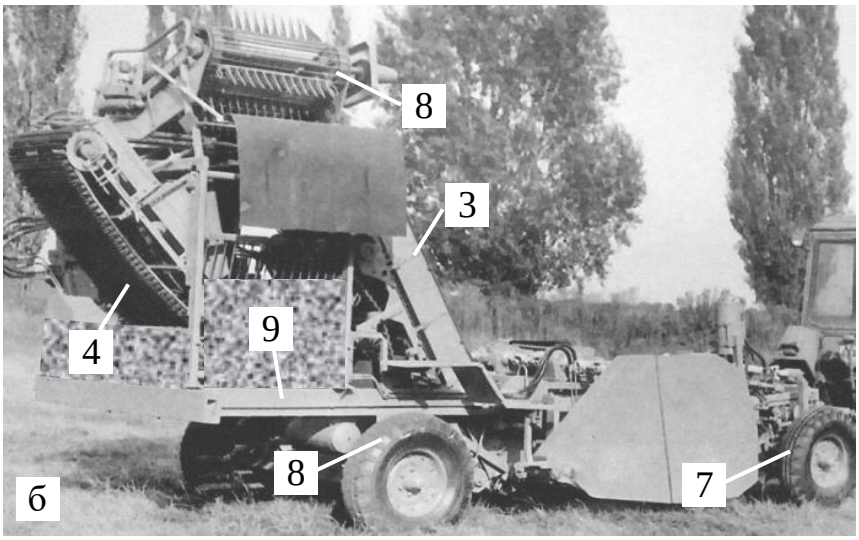
Технічну характеристику лабораторного стенду наведено в додатку Д.3.1.

Базовими вузлами причіпної модернізованої коренезбиральної машини МПК-4 є МВК *I* (рис. 5.6), шнековий очисник *II*, ОТТМ *III*, вивантажувальний транспортер 8, рама 9.

Викопаний вібраційними копачами 1 (рис. 5.6) ворох надходить до шнеків 2 очисної системи *II*, де відбувається звуження потоку коренеплодів і домішок й часткове попереднє відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів.




а




б

Рисунок 5.6 – Модернізована причіпна коренезбиральна машини МПК-4: а – конструктивна схема; б – загальний вигляд; *I* – МВК; *II* – очисна система; *III* – ОТТМ; 1 – вібраційний копач; 2 – шнек; 3 – похилий транспортер; 4 – гірка; 5 – очисний вал; 6 – система шнеків; 7, 8 – опорне колесо; 9 – рама

Далі коренеплоди та компоненти домішок переміщуються до похилого транспортера 3 ОТТМ *III*.

Подальша робота очисної системи *III* коренезбиральної машини аналогічна процесу роботи ОТТМ, який описано в підрозділі 2.2 другого розділу дисертаційної роботи згідно з рис. 2.9. Очищені коренеплоди вивантажувальним транспортером 8 завантажуються в транспортний засіб і перевозяться до місця призначення. Технічну характеристику причіпної коренезбиральної машини МПК-4 наведено в додатку Д.4.1.

## 5.2. Методика проведення експериментів з визначення коефіцієнтів сепарації домішок і дальності польоту коренеплодів

Для визначення загального коефіцієнта $\mu_{зд}^{(Z)}$ та коефіцієнта сепарації $\mu_{зд}^{(Z_q)}$ загальних домішок $q$-ої ділянки (рис. 3.1) похилого транспортера проведено польові експериментальні дослідження процесу роботи причіпної коренезбиральної машини (рис. 5.6) на посівах коренеплодів цикорію сорту «Уманський 99» [66].

Модель реалізації, або реалізацію експериментів з визначення коефіцієнтів сепарації похилого транспортера проведено згідно з розробленою структурною схемою, яку наведено на рис. 5.7. При цьому було застосовано методологію реалізації планованого трифакторного експерименту [305, 306].

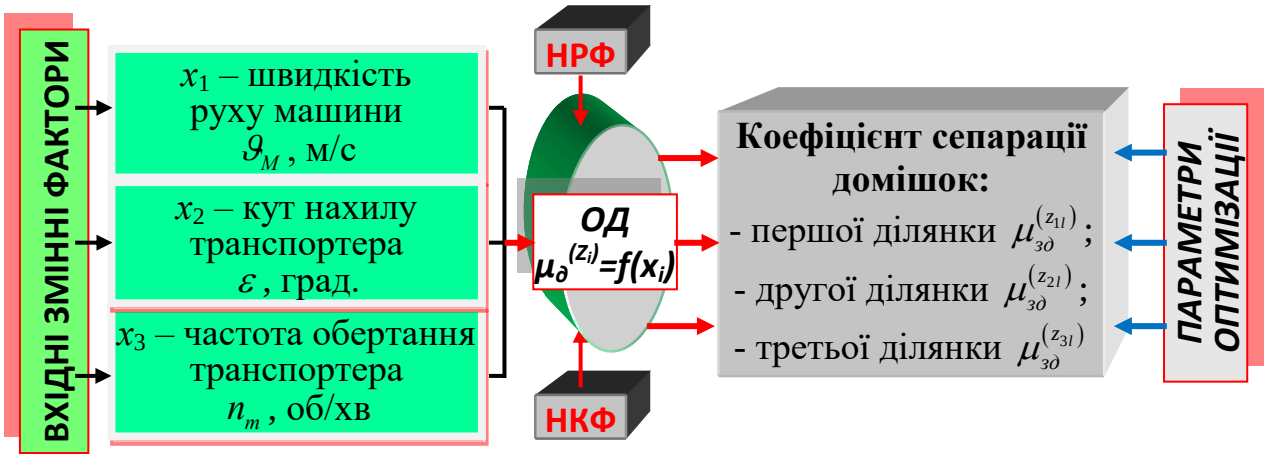



Рисунок 5.7 – Модель реалізації експериментів із визначення коефіцієнтів сепарації похилого транспортера

Згідно з рис. 5.7 вхідними факторами приймали: швидкість руху коренезбиральної машини $\vartheta_M$, яку кодували індексом $x_1$; кут нахилу похилого транспортера $\varepsilon$ відносно горизонтальної площини, який кодували індексом $x_2$; частоту обертання похилого транспортера $n_m$, яку кодували індексом $x_3$.

Рівні зміни (варіювання) факторів наведено у табл. 5.1. При цьому експерименти провели в трикратній повторності, тобто реалізували плановий трифакторний експеримент на трьох рівнях варіювання факторами або планований факторний експеримент типу ПФЕ $3^3$.

Таблиця 5.1 – Фактори та рівні варіювання факторами ПФЕ $3^3$

| Назва фактора | Натуральне позначення | Кодоване позначення / Рівні варіювання | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Нижній | Нульовий | Верхній |
| Швидкість руху машини, км/год | $\vartheta_M$ | -1/5 | 0/6 | +1/7 |
| Кут нахилу транспортера, град. | $\varepsilon$ | -1/10 | 0/20 | +1/30 |
| Частота обертання похилого транспортера, об/хв | $n_m$ | -1/90 | 0/120 | +1/150 |

Експериментальні дослідження із визначення значення загального коефіцієнта $\mu_{зд}^{(z)}$ та коефіцієнта сепарації $\mu_{зд}^{(z_q)}$ загальних домішок кожної ділянки похилого транспортера під час збирання коренеплодів цикорію, реалізовано згідно зі схемою, яку наведено на рис. 5.8.

Умови реалізації експериментів (загальна характеристика посівів залікової ділянки), довжина якої становила 15 м, наведено в додатку Д.5.2.

Порядок проведення експериментальних досліджень був наступним.

Перед початком роботи причіпної трирядної коренезбиральної машини виконували такі види робіт:

- на полі вибирали залікові ділянки трьох рядків посівів коренеплодів цикорію із яких зрізували гичку гичкозбиральною машиною, додаток Д.6.2 [23];

- визначали середню урожайність залікової ділянки коренеплодів цикорію згідно зі стандартною методикою [65, 66, 307];

- визначали вологість типу грунту залікової ділянки вологоміром для грунту моделі 46908 італійської фірми «TR di Turoni & c.Snc» (рис. 5.9) на глибині занурення зонду, яка відповідала глибині залягання коренеплодів цикорію згідно зі методикою [66];

- складали рандомізовану план-матрицю проведення експериментів для ПФЕ $3^3$ із загальною кількістю однієї повторності, яка дорівнювала 27 дослідам, додаток Д.7.2 [308];

- похилий транспортер 2 (рис. 5.6) укорочували згідно з рис. 5.8 та умовно ділили його загальну робочу довжину, яка становила 2,7 м на три рівні ділянки довжиною $l_1 = l_2 = l_3$, під якими розміщували ємності 4 для просіяних домішок;

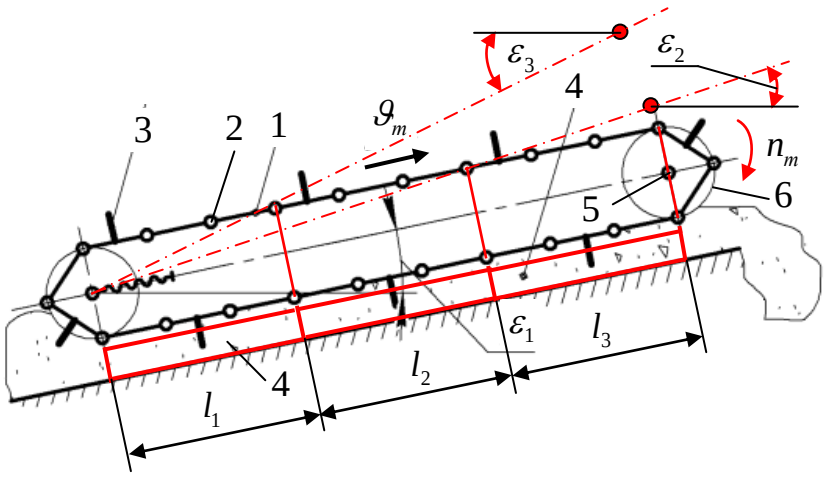



Рисунок 5.8 – Конструктивна схема похилого транспортера під час проведення експериментальних досліджень: 1 – робоча гілка похилого транспортера; 2 – пруток; 3 – скребок; 4 – ємність для домішок; 5 – ведучий вал; 6 – приводна зірочка

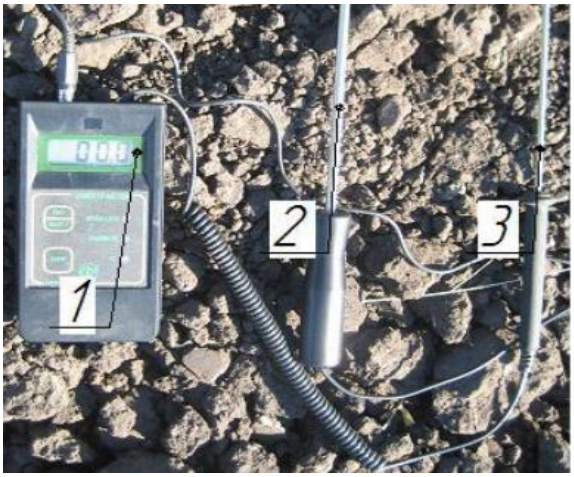



Рисунок 5.9 – Загальний вигляд вологоміра: 1 – блок індикації; 2, 3 – зонд для вимірювання вологості та температури грунту

- встановлювали числові значення рівнів вхідних факторів (табл. 5.1) згідно з план-матрицею або порядкового номера кожного експерименту.

Кут нахилу транспортера в горизонтальній площині ($\varepsilon_2$, $\varepsilon_3$) змінювали шляхом перестановки кронштейна ведучого вала 5 на рамі машини, а частоту обертання ведучого вала похилого транспортера – перестановкою приводної зірочки 6 із відповідною кількістю зубців. При цьому кожен рівень значення швидкості руху транспортера $\vartheta_m$ відповідав відповідному значенню рівня швидкості руху машини $\vartheta_M$ для забезпечення умови стабільності роботи [309].

Експерименти проводили у різні добові проміжки для отримання експериментального масиву даних коефіцієнтів сепарації $\mu_{зд}^{(Z_q)}$ (%) домішок за різної вологості грунту на глибині залягання коренеплодів цикорію.

Під час руху коренезбиральної машини по рядках коренеплодів цикорію залікової ділянки, однодискові сферичні копачі 1 (рис. 5.3) [22] викопували коренеплоди з грунтового середовища, а викопаний ворох надходив далі на похилий транспортер 2. Глибина ходу односторонніх сферичних копачів становила 0,9 м.

Під час переміщення викопаного вороху робочою гілкою 1 (рис. 5.8) похилого транспортера частина структурних компонентів домішок відокремлювалася від коренеплодів і просіювалася через зазори між прутками 2 й падала в ємності 4.

Зібрану масу структурних компонентів просіяних домішок у кожній ємності 4 зважували на терезах із точністю до ± 0,1 кг.

Коефіцієнти сепарації $\mu_{зд}^{(Z_q)}$ (%) домішок похилого транспортера (рис. 5.8) визначено для двох випадків за формулою:

- загального коефіцієнта сепарації $\mu_{зд}^{(Z)}$ (%) домішок похилого транспортера відносно загальної маси викопаного вороху:

$$\mu_{зд}^{(Z)} = \left(m_{зд} / m_{в}\right)100\%; \qquad (5.1)$$

- коефіцієнта сепарації кожної ділянки $l_1$, $l_2$, $l_3$ похилого транспортера відносно маси вороху, яка надходить окремо до неї:

$$\mu_{зд}^{(Z_{l1})} = \frac{m_{1зд}}{m_{в}}100\%; \quad \mu_{зд}^{(Z_{l2})} = \frac{m_{2зд}}{m_{в} - m_{1зд}}100\%; \quad \mu_{зд}^{(Z_{l3})} = \frac{m_{3зд}}{m_{в} - m_{1зд} - m_{2зд}}100\%, \quad (5.2)$$

де $m_{в}$, $m_{зд}$ – маса викопаного копачами вороху та загальна маса відокремлених і просіяних структурних компонентів домішок, кг;

$m_{1зд}$, $m_{2зд}$, $m_{3зд}$ – відповідно, загальна маса просіяних структурних компонентів домішок кожною ділянкою похилого транспортера, кг.

Масу $m_{в}$ викопаного копачами вороху визначали згідно зі відомими результатами експериментальних досліджень, які викладено у [6, 310 – 313].

При цьому враховували швидкість руху машини $\vartheta_M$, біологічну врожайність й вологість грунту на глибині залягання коренеплодів цикорію.

Для визначення дальності польоту $L_{Ae}$ коренеплодів цикорію 7 (рис. 3.8) із похилого транспортера до очисної гірки застосовували лабораторний стенд, схему та загальний вигляд якого наведено на рис. 5.4. Модель реалізації або реалізацію експериментів з визначення дальності польоту коренеплодів провели згідно зі розробленою структурною схемою, яку наведено на рис. 5.10.

При цьому було застосовано методологію реалізації планованого двофакторного експерименту [306, 308].

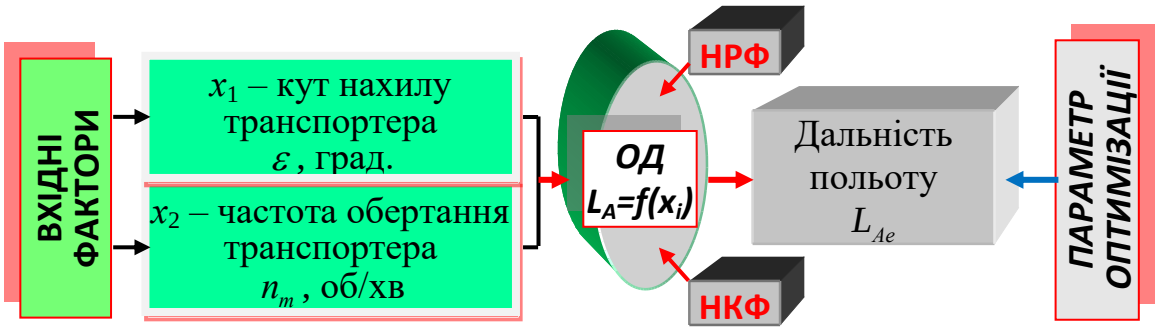



Рисунок 5.10 – Модель реалізації експериментів із визначення дальності польоту коренеплодів цикорію

Згідно з рис. 5.10 вхідними факторами приймали: кут нахилу похилого транспортера $\varepsilon$ відносно горизонтальної площини, який кодували індексом $x_1$; частоту обертання похилого транспортера $n_m$, яку кодували індексом $x_2$.

Рівні зміни (варіювання) факторів наведено у табл. 5.2. При цьому експерименти провели у трикратній повторності, тобто реалізували плановий двофакторний експеримент на трьох рівнях варіювання факторами або планований факторний експеримент типу ПФЕ $2^3$.

Таблиця 5.2 – Фактори та рівні варіювання факторами ПФЕ $2^3$

| Назва фактора | Натуральне позначення | Кодоване позначення / Рівні варіювання | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Нижній | Нульовий | Верхній |
| Кут нахилу транспортера, град. | $\varepsilon$ | -1/20 | 0/30 | +1/40 |
| Частота обертання транспортера, об/хв | $n_m$ | -1/90 | 0/120 | +1/150 |

Значення дальності польоту $L_{Ae}$ коренеплодів цикорію 1 (рис. 5.11) із скребка 3 похилого транспортера 2 до похилої площини 4 (очисної гірки) визначали для трьох значень маси $m_k$ коренеплодів: 0,35; 0,5; 0,65 кг [22].

Порядок проведення експериментальних досліджень був наступним.

Перед початком роботи виконували такі види робіт:

- на робочу поверхню гірки 3 (рис. 3.8) встановлювали похилу площину 4 згідно з рис. 5.11 і додатком Д.8.2 під кутом 55 град., на якій розміщували у шахматному порядку стрижні 5 (цвяхи) діаметром 4 мм;

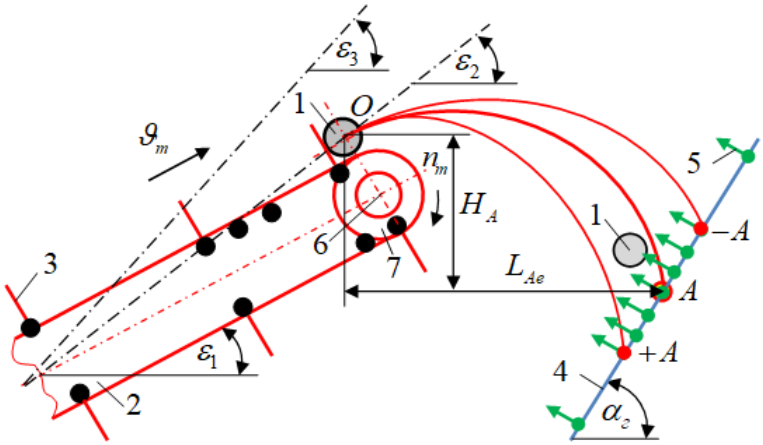



Рисунок 5.11 – Схема реалізації експериментів під час дослідження дальності польоту коренеплодів: 1 – коренеплід; 2 – похилий скребковий транспортер; 3 – скребок; 4 – похила площина; 5 – стрижень; 6 – ведучий вал транспортера; 7 – приводна зірочка

- на полі у період біологічної стиглості вибирали коренеплоди цикорію із яких вручну зрізували гичку та у подальшому зважували чисті коренеплоди на терезах з точністю до ± 0,05 кг;

- складали план-матрицю проведення експериментів для ПФЕ $2^3$ із загальною кількістю однієї повторності рівній 8, додаток Д.9.2 [308];

- встановлювали числові значення рівнів вхідних факторів (табл. 5.2) згідно з план-матрицею порядкового номера кожного експерименту.

Кут нахилу похилого транспортера 2 (рис. 5.4, рис. 5.11) у горизонтальній площині ($\varepsilon_2$, $\varepsilon_3$) змінювали шляхом перестановки кронштейна ведучого вала 6 на рамі лабораторного стенда.

Частоту обертання ведучого вала похилого транспортера встановлювали шляхом регулювання кількості подачі рідини у гідромотор 7 (рис. 5.4) через регулювальні дроселі 9.

Коренепліди цикорію 1 (рис. 5.4, рис. 5.11) відповідної маси переміщуються похилим транспортером 2 до його вихідної частини, а далі скребком 3 (рис. 5.11) зіштовхуються з нього й летять у вільному польоті в напрямку до похилої площини 4 та нанизується на стрижні 5.

Дальність польоту $L_A$ коренеплодів 1 з похилого транспортера до похилої площини 4 вимірювали рулеткою із точністю ± 0,5 см.

Оброблення експериментального масиву даних під час визначення коефіцієнтів сепарації $\mu_{зд}^{(z_q)}$ загальних домішок і дальності польоту $L_{Ae}$ коренеплодів проведено згідно зі загальноприйнятою відомою методикою обробки експериментальних даних [187].

При цьому:

- невідому функціональну залежність $\mu_{зд}^{(z_q)} = f(\vartheta_M; \varepsilon; n_m)$ і $L_{Ae} = f(\varepsilon; n_m)$ для проведення апроксимації експериментального масиву даних знайдено шляхом перебору відомих алгебраїчних функцій за найбільшим значенням коефіцієнта чисельної детермінації $D_i$ відповідної алгебраїчної залежності [187, 314];

- мінливість функції оцінено стандартним відхиленням і коефіцієнтом кореляції [187, 306];

- невідомі коефіцієнти рівняння регресії функціональної залежності $\mu_{зд}^{(z_q)} = f(\vartheta_M; \varepsilon; n_m)$ та $L_{Ae} = f(\varepsilon; n_m)$ визначено за допомогою пакету прикладної комп'ютерної програми Статистика 12 [187, 306];

- адекватність моделі та значимість коефіцієнтів рівняння регресії встановлено за *F*-критерієм Фішера й *t*-критерієм Ст'юдента [187, 314].

Графічну інтерпретацію результатів експериментальних досліджень, або розроблених емпіричних моделей виконували шляхом побудові відповідних 2D та 3D графічних моделей із застосуванням пакетів прикладних програм для персонального комп'ютера.

## 5.3. Методологія реалізації польових експериментальних досліджень очисних транспортно-технологічних модулів

Для проведення польових експериментальних досліджень із визначення функціонального характеру зміни показників якості роботи загальних домішок $ЗД_k$ (шнеки круглого перерізу) та $ЗД_e$ (еліпсні шнеки), маси налиплого грунту на коренеплодах $НГ_k$ (шнеки круглого перерізу) й $НГ_e$ (еліпсні шнеки), пошкодження коренеплодів $ПК_k$ (шнеки круглого перерізу) й $ПК_e$ (еліпсні шнеки)) запропонованих ОТТМ (рис. 2.7, 2.8) відповідно, у складі коренезбиральної машини МКК-6А та МПК-4 було удосконалено:

1. Під час збирання коренеплодів кормових буряків – очисну систему самохідної шестирядної коренезбиральної машини МКК-6А, конструктивна схема та загальний вигляд якої наведено на рис. 5.3.

При цьому конструктивну схему ОТТМ наведено на рис. 2.8, а загальний вигляд ОТТМ – на рис. 5.12, додаток Д.10.3.

2. Під час збирання коренеплодів цукрових буряків – очисну систему причіпної чотирирядної коренезбиральної машини МПК-4, конструктивну схему та загальний вигляд якої наведено на рис. 5.5 [312, 315].

При цьому конструктивну схему ОТТМ наведено на рис. 2.7, а загальний вигляд ОТТМ – на рис. 5.13.

Для проведення польових експериментальних досліджень із визначення функціонального характеру зміни показників якості роботи ОТТМ під час збирання коренеплодів цикорію застосовано трирядну причіпну експериментальну коренезбиральну машину, конструктивну схему та загальний вигляд якої наведено на рис. 5.6.

При цьому конструктивна схема ОТТМ коренезбиральної машини відрізняється від конструктивної схеми ОТТМ, яку наведено на рис. 2.8 відсутністю очисної гірки 2 та комбінованого робочого органу 3, а загальний вигляд ОТТМ, який є аналогом комбінованого конвеєрного очисника 2 (рис. 2.8), наведено на рис. 5.14 [315].

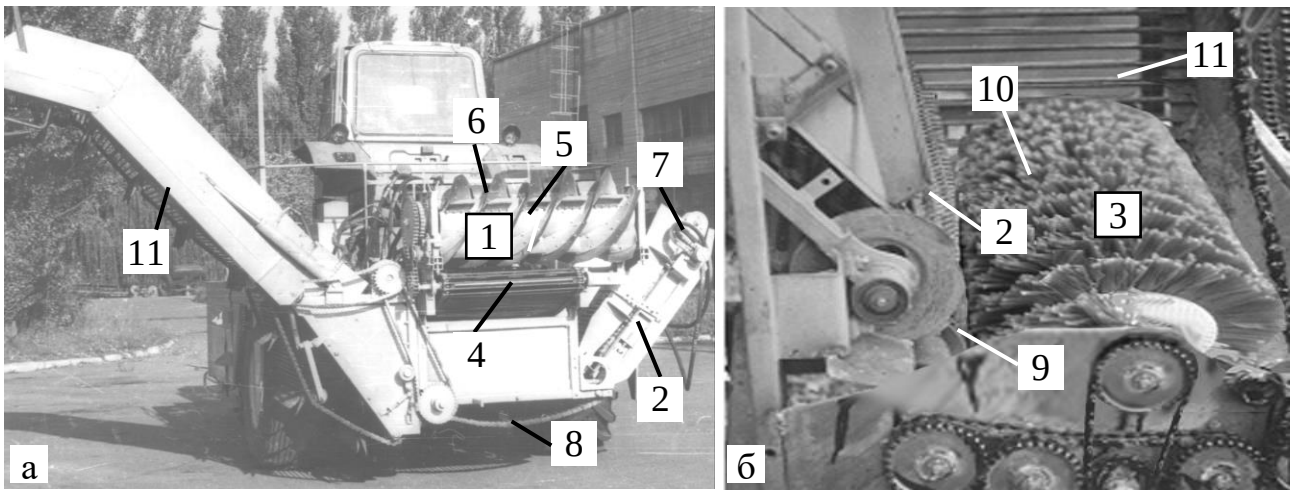



Рисунок 5.12 – Загальний вигляд ОТТМ: а – вигляд ззаду; б – комбінований робочий орган; 1 – комбінований конвеєрний очисник; 2 – очисна пальчикова гірка; 3 – комбінований робочий орган; 4 – горизонтальний транспортер; 5 – шнековий конвеєр; 6 – виток шнека; 7 – гідромотор; 8 – поперечний транспортер (серійний); 9 – шнек; 10 – очисний вал з пружними елементами; 11 – вивантажувальний транспортер

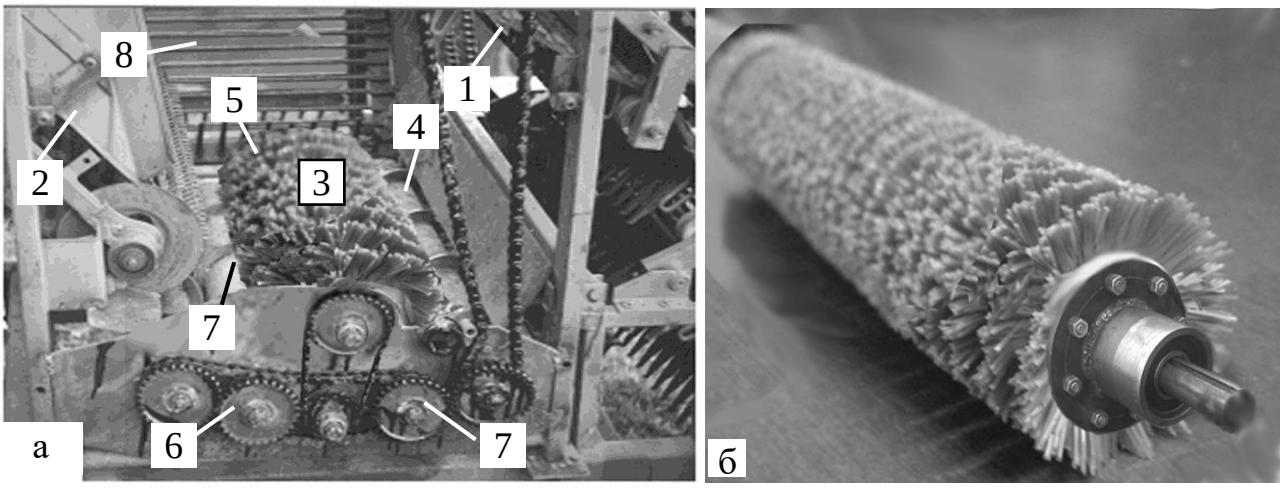



Рисунок 5.13 – Загальний вигляд: а – ОТТМ; б – очисного вала з пружними елементами: 1 – похилий скребковий транспортер; 2 – очисна гірка; 3 – комбінований робочий орган; 4 – шнек; 5 – очисний вал; 6, 7 – права та ліва системи шнеків; 8 – вивантажувальний транспортер

Модель реалізації або реалізацію експериментів із визначення функціонального характеру зміни показників якості роботи ОТТМ (рис. 5.12, 5.13) під час збирання кормових і цукрових буряків проведено згідно зі розробленою структурною схемою, яку наведено на рис. 5.15.

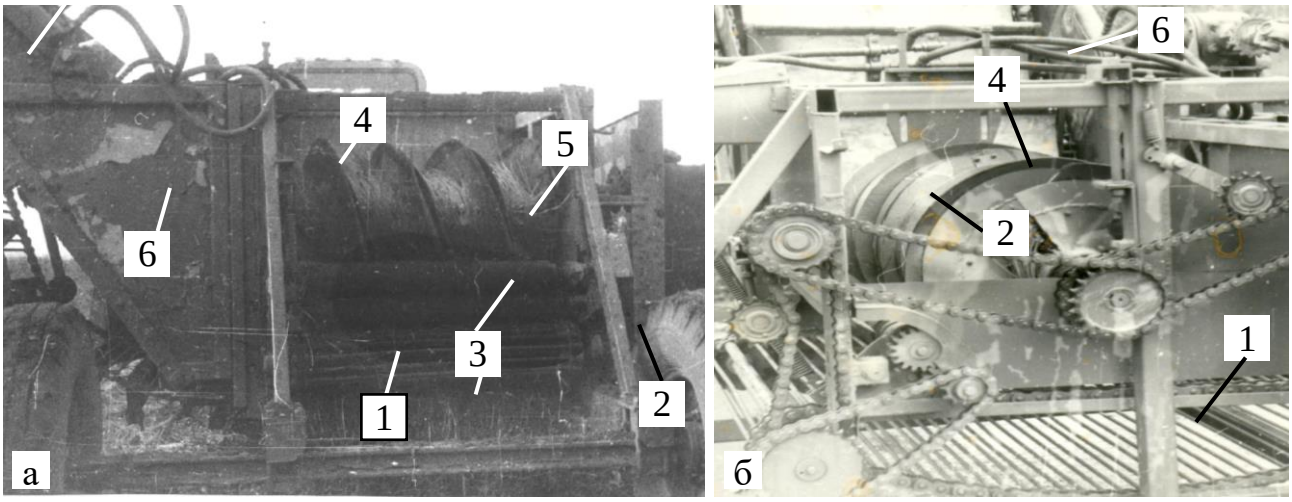



Рисунок 5.14 – Загальний вигляд ОТТМ: а – вигляд ззаду; б – вигляд збоку: 1 – горизонтальний транспортер; 2 – шнековий конвеєр; 3 – відкидний валець; 4 – виток шнека; 5 – пружні очисні елементи; 6 – вивантажувальний транспортер

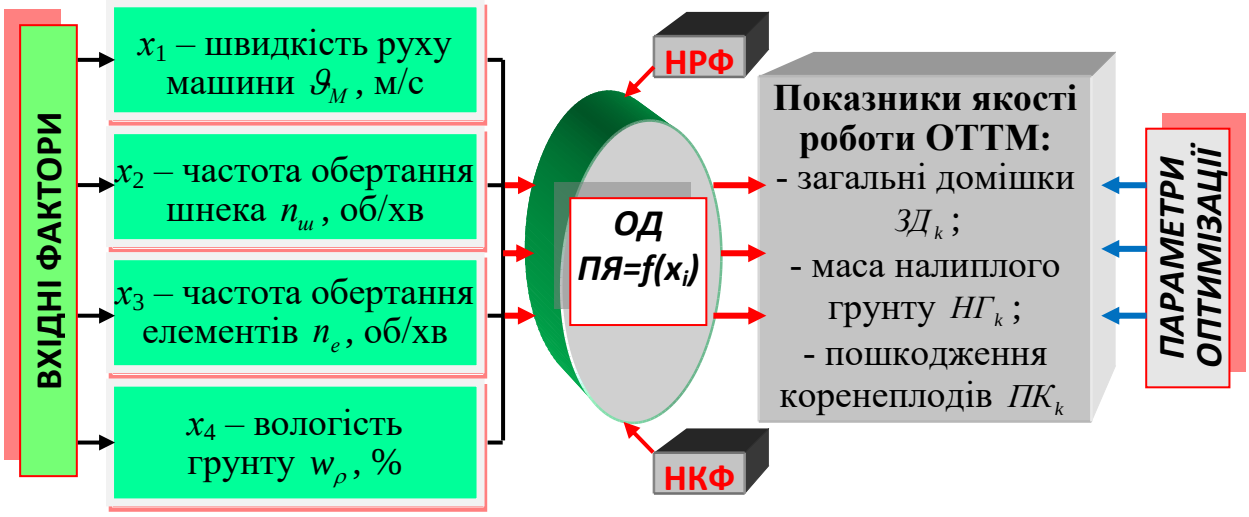



Рисунок 5.15 – Модель реалізації експериментів із визначення показників якості роботи ОТТМ під час збирання кормових і цукрових буряків

При цьому було застосовано методологію реалізації планованого чотирифакторного експерименту типу ПФЕ $4^3$ [306, 308].

Згідно з рис. 5.15 вхідними факторами приймали: швидкість руху коренезбиральної машини $\vartheta_M$, яку кодували індексом $x_1$; частоту обертання шнека $n_ш$, яку кодували індексом $x_2$; частоту обертання пружних елементів $n_e$, яку кодували індексом $x_3$; вологість грунту на глибині залягання коренеплодів, яку кодували індексом $x_4$ [315].

Рівні зміни (варіювання) факторів наведено у табл. 5.3. При цьому експерименти провели у трикратній повторності, тобто реалізували плановий чотирифакторний експеримент на трьох рівнях варіювання факторами або планований факторний експеримент типу ПФЕ $4^3$.

Таблиця 5.3 – Фактори та рівні варіювання факторами ПФЕ $4^3$

| Назва фактора | Натуральне позначення | Кодоване позначення / Рівні варіювання | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Нижній | Нульовий | Верхній |
| Швидкість руху коренезбиральної машини, км/год | $\vartheta_M$ | -1/5 | 0/6 | +1/7 |
| Частота обертання шнека, об/хв | $n_ш$ | -1/100 | 0/150 | +1/200 |
| Частота обертання пружних елементів, об/хв | $n_e$ | -1/300 | 0/500 | +1/700 |
| Вологість грунту, % | $w_\rho$ | -1/18 | 0/22 | +1/26 |

Показники якості роботи ОТТМ під час проведення експериментів визначали для двох типів конструктивного виконання шнеків комбінованого робочого органу 3 (рис. 2.7, 2.8) – шнеків 9 круглого перерізу й еліпсних шнеків 14 [316].

Під час визначення показників якості роботи модернізованої коренезбиральної машини МКК-6А на збирання кормових буряків основні значення параметрів комбінованого робочого органу 1 ОТТМ (рис. 5.12) були такими: швидкість руху горизонтального транспортера 1,8 м/с; діаметр шнекового конвеєра 0,6 м; крок шнека 0,7 м; частота обертання шнекового конвеєра 100 об/хв; радіальний зазор між шнеком і робочою гілкою горизонтального транспортера 0,07 м; діаметр пружних очисних елементів 0,03 м; кут нахилу очисної гірки до горизонту 55 град.; швидкість руху робочої гілки очисної гірки 1,3 м/с.

Умови реалізації експериментів (загальна характеристика посівів залікової ділянки кормових буряків сорту «Київський» і цукрових буряків сорту «Яштушківський 99»), довжина якої становила 15 м, наведено відповідно, в додатку Д.11.2 та додатку Д.12.2.

Порядок проведення експериментальних досліджень був наступним.

Перед початком роботи коренезбиральних машин (МКК-6А і МКП-4) виконували такі види робіт:

- на полі вибирали залікові ділянки, відповідно, шести та чотирьох рядків посівів коренеплодів кормових і цукрових буряків із яких зрізували гичку гичкозбиральною машиною відповідно, МБК-6 й МБП-6, додаток Д.13.2;

- визначали середню урожайність залікової ділянки коренеплодів кормових і цукрових буряків згідно зі стандартною методикою [64, 65, 315, 316];

- визначали вологість грунту залікової ділянки вологоміром для грунту моделі 46908 італійської фірми «TR di Turoni & c.Snc» (рис. 5.9) на глибині занурення зонду, яка відповідала глибині залягання коренеплодів згідно зі методикою [67];

- складали несиметричну план-матрицю Бокса-Бенкіна для кількості факторів, які дорівнювали 4 й трикратної повторності кожного пронумерованого експерименту типу ПФЕ $4^3$ із загальною кількістю експериментів однієї повторності, яка дорівнювала 27, додаток Г.14.2 [306, 308];

- встановлювали числові значення рівнів вхідних факторів (табл. 5.3) порядкового номера кожного експерименту згідно зі несиметричною план-матрицею Бокса-Бенкіна.

Частоту обертання шнека $n_ш$ та очисних пружних елементів $n_е$ встановлювали шляхом перестановки приводної зірочки із відповідною кількістю зубців.

Експерименти проводили у різні добові проміжки часу для отримання експериментального масиву даних показників якості роботи ОТТМ за різної вологості грунту на глибині залягання коренеплодів.

Після проведення кожного експерименту розбирали кожну пробу у такій послідовності:

- на терезах зважували масу вільних домішок із точністю ± 0,1 кг;

- налиплий грунт на коренеплодах очищували вручну, а масу зчищеного грунту зважували на терезах із точністю ± 0,01 кг;

- зважували на терезах масу чистих коренеплодів із точністю ± 1 кг.

Показники якості роботи ОТТМ у відсотках (%) визначено відносно маси коренеплодів одного досліду за формулою [316]:

- кількість загальних домішок $ЗД_i$,

$$ЗД_i = \left(M_{зд} / M_к\right) 100\%; \tag{5.3}$$

- масу налиплого грунту $НГ_i$ на коренеплодах,

$$НГ_i = \left(M_{нг} / M_к\right) 100\%; \tag{5.4}$$

- пошкодження коренеплодів $ПК_i$ у відсотках (%) визначено відносно маси коренеплодів одного досліду за формулами [313]:

$$ПК_i = \left(M_{пк} / M_к\right) 100\%, \tag{5.5}$$

де $M_{зд}$, $M_{нг}$, $M_{пк}$, $M_k$ – відповідно, маса загальних домішок, налиплого грунту, пошкоджених коренеплодів у зібраному воросі після викопування коренезбиральною машиною із однієї залікової ділянки поля, кг.

Оброблення експериментального масиву даних під час визначення показників якості роботи ОТТМ (кількості загальних домішок $ЗД_i$, маси налиплого грунту $НГ_i$ на коренеплодах, пошкодження коренеплодів $ПК_i$) провели згідно зі загальноприйнятою відомою методикою обробки експериментальних даних [10].

При цьому:

- невідому функціональну залежність $ЗД_i = f_{ЗД}(\vartheta_M; \varepsilon; n_m; w_\rho)$, $НГ_i = f_{НГ}(\vartheta_M; \varepsilon; n_m; w_\rho)$ і $ПК_i = f_{ПК}(\vartheta_M; \varepsilon; n_m; w_\rho)$ для проведення апроксимації експериментального масиву даних визначено шляхом перебору відомих алгебраїчних функцій за найбільшим значенням коефіцієнта чисельної детермінації $D_i$ відповідної алгебраїчної залежності [187, 314];

- мінливість функції оцінено стандартним відхиленням і коефіцієнтом кореляції [10, 306];

- невідомі коефіцієнти рівняння регресії функціональної залежності

$ЗД_i = f_{ЗД}(\vartheta_M;\varepsilon;n_m;w_\rho)$, $НГ_i = f_{НГ}(\vartheta_M;\varepsilon;n_m;w_\rho)$ і $ПК_i = f_{ПК}(\vartheta_M;\varepsilon;n_m;w_\rho)$ визначено за допомогою пакету прикладної комп'ютерної програми Статистика 12 [187, 305];

- адекватність моделі та значимість коефіцієнтів рівняння регресії встановлено за $F$-критерієм Фішера й $t$-критерієм Ст'юдента [187, 305].

Графічну інтерпретацію результатів експериментальних досліджень, або розроблених емпіричних моделей виконували шляхом побудові відповідних 2D та 3D графічних моделей із застосуванням пакетів прикладних програм для персонального комп'ютера.

Модель реалізації або реалізацію експериментів із визначення функціонального характеру зміни показників якості роботи ОТТМ (рис. 5.14) під час збирання коренеплодів цикорію коренезбиральною машиною (рис. 5.6) проведено згідно зі розробленою структурною схемою, яку наведено на рис. 5.16.

При цьому було застосовано методологію реалізації планованого трифакторного експерименту типу ПФЕ $3^3$ [308].

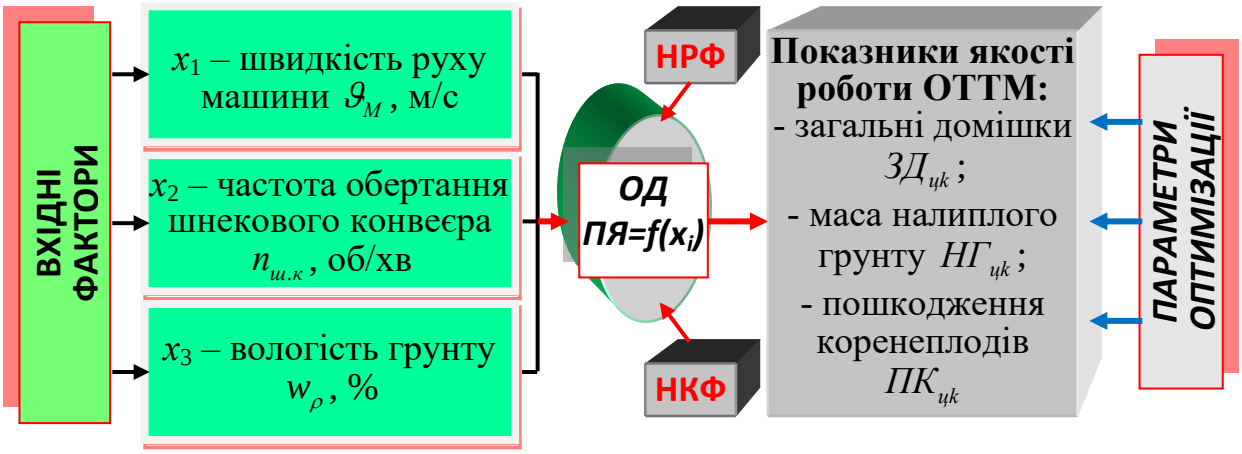



Рисунок 5.16 – Модель реалізації експериментів із визначення показників якості роботи ОТТМ під час збирання коренеплодів цикорію

Згідно з рис. 5.16 вхідними факторами приймали: швидкість руху коренезбиральної машини $\vartheta_M$, яку кодували індексом $x_1$; частоту обертання шнекового конвеєра $n_{ш.к}$, яку кодували індексом $x_2$, вологість грунту $w_\rho$, яку кодували індексом $x_3$

Рівні зміни (варіювання) факторів наведено у табл. 5.4, при цьому експерименти провели у трикратній повторності, тобто реалізували плановий трифакторний експеримент на трьох рівнях варіювання факторами або планований факторний експеримент типу ПФЕ $3^3$.

Таблиця 5.4 – Фактори та рівні варіювання факторами ПФЕ $2^3$

| Назва фактора | Натуральне позначення | Кодоване позначення / Рівні варіювання | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Нижній | Нульовий | Верхній |
| Швидкість руху машини, м/с | $\vartheta_м$ | -1/1,5 | 0/1,7 | +1/1,9 |
| Частота обертання шнекового конвеєра, об/хв | $n_{ш.к}$ | -1/100 | 0/150 | +1/200 |
| Вологість грунту, % | $w_\rho$ | -1/18 | 0/21 | +/24 |

Порядок проведення експериментальних досліджень ОТТМ під час збирання коренеплодів цикорію був аналогічним порядку проведення експериментів із визначення показників якості роботи ОТТМ під час збирання коренеплодів кормових і цукрових буряків, але при цьому було внесено відмінності у початкову фазу виконання таких виді робіт:

- на полі вибирали залікові ділянки довжиною гону 15 м відповідної кількості рядків посівів коренеплодів цикорію сорту «Уманський 99» (3 рядки) із яких зрізували гичку гичкозрізувальною машиною, конструктивну схему та загальний вигляд якої наведено у додатку Д.6.2.

- складали несиметричну план-матрицю Бокса-Бенкіна для кількості факторів, які дорівнювали 3 і трикратної повторності кожного пронумерованого експерименту типу ПФЕ $3^3$ із загальною кількістю експериментів однієї повторності, яка дорівнювала 15, додаток Г.15.2 [306, 308];

- встановлювали числові значення рівнів вхідних факторів (табл. 5.4) згідно зі план-матрицею для порядкового номера кожного експерименту.

Частоту обертання шнекового конвеєра $n_{ш.к}$ встановлювали шляхом зміни кількості зубців ведучої зірочки приводного вала шнека.

Швидкість руху робочої гілки транспортера була постійною та становила 1,6 м/с.

Кількість загальних домішок $ЗД_i$, маси налиплого грунту $НГ_i$ на коренеплодах, пошкодження коренеплодів $ПК_i$ у відсотках (%) визначено відносно маси коренеплодів одного досліду за формулами (5.3)-(5.5). Графічну інтерпретацію результатів досліджень проводено аналогічно визначенню показників якості процесу збирання кормових і цукрових буряків.

Порівняльні дослідження показників якості роботи ОТТМ під час збирання крупних коренеплодів провели згідно зі стандартною методикою [317, 318], при цьому порівнювали:

- під час збирання коренеплодів кормових буряків ОТТМ машини МКК-6А (рис. 5.3, 5.12) й очисну систему коренезбиральної машини МКК-6А із якої було демонтовано комбінований робочий орган 3 (рис. 5.12), а замість нього встановлено серійний поперечний транспортер 8 [66];

- під час збирання коренеплодів цукрових буряків ОТТМ машини МПК-4 й очисну систему коренезбиральної машини МПК-4, яку наведено на рис. 5.17 та в додатку Г.11.3, яка відрізнялася від ОТТМ (рис. 5.5, 5.13) тим, що з ОТТМ (рис. 5.5, 5.13) було демонтовано приводний очисний вал 5, рис. 5.13 [315, 319];

Рисунок 5.17 – Загальний вигляд очисної системи коренезбиральної машини МПК-4: 1 – похилий транспортер; 2 – очисна гірка; 3, 4 – ліва та права системи шнеків; 5 – вивантажувальний транспортер

- під час збирання коренеплодів цикорію ОТТМ причіпної коренезбиральної машини (рис. 5.6, рис. 5.14) та очисну систему (рис. 5.14б) причіпної коренезбиральної машини, де очисні пружні елементи 5 ( рис. 5.14а) було демонтовано із шнекового конвеєра 2.

Основні результати розділу опубліковано у наукових працях [310-313, 315-318, 320-323].

# РОЗДІЛ 6
# РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ОЧИСНИХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОДУЛІВ

## 6.1. Результати експериментальних досліджень коефіцієнтів сепарації домішок похилим транспортером і дальності польоту коренеплодів

Мета проведення експериментальних досліджень: розробити математичні емпіричні моделі, які описують функціональну зміну коефіцієнтів сепарації домішок похилим транспортером і дальності польоту коренеплодів із похилого транспортера до очисної гірки залежно від конструктивно-кінематичних параметрів похилого транспортера.

Завдання досліджень: на основі результатів проведених польових експериментальних досліджень розробити рівняння регресії параметрів оптимізації, перевірити адекватність розроблених моделей та обґрунтовувати основні параметри похилого транспортера й установчі конструктивні параметри розміщення очисної гірки відносно похилого транспортера.

У процесі проведення експериментальних досліджень встановлювали вигляд математичних моделей, які описують функціональний характер зміни:

- загального коефіцієнта $\mu_{зде}^{(Z)}$ сепарації та коефіцієнта сепарації $\mu_{зде}^{(Z_q)}$ загальних домішок кожної ділянки $l_1$, $l_2$, $l_3$ (рис. 5.8) похилого транспортера 2 (рис. 5.6) під час збирання коренеплодів цикорію згідно моделі рис. 5.7 і табл. 5.1, тобто визначали функціональну залежність $\mu_{зде}^{(Z)} = f_\mu(\vartheta_M; \varepsilon; n_m)$ і $\mu_{зде}^{(Z_{1l})} = f_\mu(\vartheta_M; \varepsilon; n_m)$, $\mu_{зде}^{(Z_{2l})} = f_\mu(\vartheta_M; \varepsilon; n_m)$, $\mu_{зде}^{(Z_{3l})} = f_\mu(\vartheta_M; \varepsilon; n_m)$;

- дальність польоту $L_{Ae}$ коренеплодів 1 (рис. 5.11) з похилого транспортера 2 до похилої площини 4 згідно з моделлю 5.10 і табл. 5.2, тобто визначали функціональну залежність $L_{Ae}^{(0,35)} = f_L(\varepsilon; n_m)$, $L_{Ae}^{(0,5)} = f_L(\varepsilon; n_m)$, $L_{Ae}^{(0,65)} = f_L(\varepsilon; n_m)$ для трьох усереднених значень маси $m_k$ коренеплодів цикорію: 0,35; 0,5; 0,65 кг.

За результатами статистичної обробки отриманого експериментального масиву даних було встановлено, що:

- під час проведення польових досліджень з визначення експериментального значення загального коефіцієнта $\mu_{зде}^{(Z)}$ та коефіцієнтів сепарації $\mu_{зде}^{(Z_q)}$ домішок кожної ділянки (рис. 5.9) похилого транспортера 2 (рис. 5.6) під час збирання коренеплодів цикорію (додаток Ж.1.1) і аналізу отриманих показників статистичної обробки (додаток Ж.2.1), найбільше значення коефіцієнта чисельної детермінації ($D_{\mu}^{Z}$ = 0,959, $D_{\mu}^{Z1l}$ = 0,955, $D_{\mu}^{2lZ}$ = 0,955, $D_{\mu}^{3lZ}$ = 0,945) відповідало математичній моделі повного полінома другої степені;

- під час проведення лабораторних досліджень з визначення експериментального значення дальності польоту $L_{Ae}$ коренеплодів 1 з похилого транспортера 2 до похилої площини 4 (рис. 5.11, додаток Ж.3, додаток Ж.3.1) і аналізу отриманих показників статистичної обробки (додаток Ж.3.2), найбільше значення коефіцієнта чисельної детермінації ($D_{L1m}$ = 0,983, $D_{L2m}$ = 0,987, $D_{L3m}$ = 0,978) відповідало математичній моделі повного полінома другої степені.

Натуральні значення коефіцієнтів рівняння регресії, які отримано за результатами експериментальних досліджень загального коефіцієнта $\mu_{зде}^{(Z)}$ та коефіцієнта сепарації $\mu_{зде}^{(Z_q)}$ домішок кожної ділянки похилого транспортера під час збирання коренеплодів цикорію наведено у табл. 6.1..

За результатами перевірки значимості коефіцієнтів емпіричної моделі за $t$-критерієм Ст'юдента було встановлено, що:

- коефіцієнти вхідного фактора $n_m$ ($b_3$ = 0,3 $10^{-4}$, $b_3$ = 0,3 $10^{-4}$, $b_3$ = 0,5 $10^{-4}$) та коефіцієнти впливу взаємодії факторів як $\varepsilon n_m$ ($b_{23}$ = -0,8 $10^{-8}$, $b_{23}$ = -0,4 $10^{-8}$, $b_{23}$ = -0,4 $10^{-8}$ і $b_{23}$ = -0,7 $10^{-8}$) на апроксимовані значення зміни коефіцієнта сепарації $\mu_{зде}^{(Z_q)}$ загальних домішок кожної ділянки є несуттєвим і ними знехтували, додаток Ж.2.1, табл. 6.1.

Після перевірки значимості коефіцієнтів рівняння регресії за $F$-критерієм Фішера та адекватності моделі за $t$-критерієм Ст'юдента, отримали кінцеві емпіричні рівняння регресії в натуральних факторах, які характеризують функціональну залежність зміни:

Таблиця 6.1 – Натуральні значення коефіцієнтів рівнянь регресії

| Позначення | Натуральні значення коефіцієнтів рівняння регресії | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Вологість грунту $w_\rho = 18 \pm 1$ % | | | | | | |
| $\mu_{зде}^{(Z)} = f_\mu(\vartheta_M;\varepsilon;n_m)$ | $b_0$ | $b_1$ | $b_2$ | $b_3$ | $b_{12}$ | $b_{13}$ |
| | -8,45 | 23,78 | 0,52 | 0,01 | -0,08 | -0,003 |
| | $b_{23}$ | $b_{11}$ | $b_{22}$ | $b_{33}$ | | |
| | $-0{,}8\ 10^{-8}$ | -2,12 | 0,01 | 0,001 | | |
| $\mu_{зде}^{(Z_{1l})} = f_\mu(\vartheta_M;\varepsilon;n_m)$ | $b_0$ | $b_1$ | $b_2$ | $b_3$ | $b_{12}$ | $b_{13}$ |
| | -17,08 | 25,11 | 0,56 | $0{,}3\ 10^{-4}$ | -0,08 | -0,03 |
| | $b_{23}$ | $b_{11}$ | $b_{22}$ | $b_{33}$ | | |
| | $-0{,}4\ 10^{-8}$ | -2,78 | 0,01 | 0,0004 | | |
| $\mu_{зде}^{(Z_{2l})} = f_\mu(\vartheta_M;\varepsilon;n_m)$ | $b_0$ | $b_1$ | $b_2$ | $b_3$ | $b_{12}$ | $b_{13}$ |
| | -13,08 | 25,11 | 0,56 | $0{,}3\ 10^{-4}$ | -0,08 | -0,003 |
| | $b_{23}$ | $b_{11}$ | $b_{22}$ | $b_{33}$ | | |
| | $-0{,}4\ 10^{-8}$ | -2,28 | 0,01 | 0,0004 | | |
| $\mu_{зде}^{(Z_{3l})} = f_\mu(\vartheta_M;\varepsilon;n_m)$ | $b_0$ | $b_1$ | $b_2$ | $b_3$ | $b_{12}$ | $b_{13}$ |
| | -4,6 | 24,0 | 0,74 | $0{,}5\ 10^{-4}$ | -0,075 | -0,014 |
| | $b_{23}$ | $b_{11}$ | $b_{22}$ | $b_{33}$ | | |
| | $0{,}7\ 10^{-8}$ | -2,06 | 0,001 | 0,001 | | |

- загального коефіцієнта $\mu_{зде}^{(Z)}$ сепарації загальних домішок похилого транспортера

$$\mu_{зде}^{(Z)} = -8,45 + 23,78\vartheta_M + 0,52\varepsilon + 0,01n_m - 0,08\vartheta_M\varepsilon - \\ -0,003\vartheta_M n_m - 2,12\vartheta_M^2 + 0,01\varepsilon^2 + 0,001n_m^2 \quad ; \qquad (6.1)$$

- коефіцієнта $\mu_{зде}^{(Z_{1l})}$ сепарації загальних домішок першої ділянки $l_1$ похилого транспортера

$$\mu_{зде}^{(Z_{1l})} = -17,08 + 25,11\vartheta_M + 0,56\varepsilon - 0,08\vartheta_M\varepsilon - \\ -0,03\vartheta_M n_m - 2,78\vartheta_M^2 + 0,01\varepsilon^2 + 0,0004n_m^2 \quad ; \qquad (6.2)$$

- коефіцієнта $\mu_{зде}^{(Z_{2l})}$ сепарації загальних домішок другої ділянки $l_2$ похилого транспортера

$$\mu_{зде}^{(Z_{2l})} = -13,08 + 25,11\vartheta_M + 0,56\varepsilon - 0,08\vartheta_M\varepsilon - \\ -0,003\vartheta_M n_m - 2,28\vartheta_M^2 + 0,01\varepsilon^2 + 0,0004n_m^2 \quad ; \qquad (6.3)$$

- коефіцієнта $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ сепарації загальних домішок третьої ділянки $l_3$ похилого транспортера

$$\begin{aligned}\mu_{зде}^{(Z_{3l})} = -4,6 + 24,0\vartheta_M + 0,74\varepsilon - 0,075\vartheta_M\varepsilon - \\ -0,0014\vartheta_M n_m - 2,068\vartheta_M^2 + 0,001\varepsilon^2 + 0,001n_m^2\end{aligned}; \quad (6.4)$$

Аналіз поверхонь відгуку та їх двомірних перерізів (рис. 6.1-рис. 6.4) показує, що зміна апроксимованих значень параметрів оптимізації залежно від встановлених меж зміни вхідних факторів (табл. 5.1: швидкості руху коренезбиральної машини $5 \le \vartheta_M \le 7$ км/год.; кута встановлення похилого транспортера $10 \le \varepsilon \le 30$ град.; частоти обертання приводного вала похилого транспортера $90 \le n_m \le 150$ об/хв) знаходиться в діапазоні:

- загальний коефіцієнт $\mu_{зде}^{(Z)}$ сепарації загальних домішок похилого транспортера – від 54 до 72 %, рис. 6.1;

- коефіцієнт $\mu_{зде}^{(Z_{1l})}$ сепарації загальних домішок першої ділянки $l_1$ похилого транспортера – від 52 до 67 %, рис. 6.2;

- коефіцієнт $\mu_{зде}^{(Z_{2l})}$ сепарації загальних домішок другої ділянки $l_2$ похилого транспортера – від 54 до 71 %, рис. 6.3;

- коефіцієнта $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ сепарації загальних домішок третьої ділянки $l_3$ похилого транспортера – від 62 до 78 %, рис. 6.4.

Ці твердження також характерні значенням загального коефіцієнта $\mu_{зде}^{(Z)}$ та коефіцієнта $\mu_{зде}^{(Z_{1l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{2l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ сепарації загальних домішок кожної ділянки $l_1$, $l_2$, $l_3$ похилого транспортера, які наведено на рис. 6.5.

При цьому, характер функціонального впливу кожного вхідного фактора на зміну параметра оптимізації є наступним.

За збільшення поступальної швидкості руху коренезбиральної машини в межах $5 \le \vartheta_M \le 7$ км/год, або зміни усередненої секундної подачі вороху з трьох рядків коренеплодів цикорію в межах $17 \le Q_в \le 26$ кг/с до першої ділянки $l_1$ похилого транспортера параметри оптимізації (загальний коефіцієнт $\mu_{зде}^{(Z)}$ та

коефіцієнт $\mu_{зде}^{(Z_{1l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{2l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ сепарації загальних домішок кожної ділянки $l_1$, $l_2$, $l_3$ похилого транспортера зменшується в середньому на 8…10 %, причому 10% відповідає коефіцієнту $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ сепарації третьої ділянки $l_3$ похилого транспортера (рис. 6.1а, б; рис. 6.2а, б; рис. 6.3а, б; рис.6.4а, б), а розсіювання експериментальних даних підкоряється нормальному закону імовірного розподілення за довірчого інтервала 0,95, рис. 6.6а, додаток Ж.4.1.

За збільшення кута встановлення похилого транспортера до горизонту в межах $10 \le \varepsilon \le 30$ град., параметри оптимізації (загальний коефіцієнт $\mu_{зде}^{(Z)}$ та коефіцієнт $\mu_{зде}^{(Z_{1l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{2l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ сепарації загальних домішок кожної ділянки $l_1$, $l_2$, $l_3$ похилого транспортера збільшується у середньому на 7…8%, причому значення 8% відповідає коефіцієнту $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ сепарації третьої ділянки $l_3$ похилого транспортера (рис. 6.1а, в; рис. 6.2а, в; рис. 6.3а, в; рис. 6.4а, в), а розсіювання експериментальних даних підкоряється нормальному закону імовірного розподілення за довірчого інтервала 0,95, додаток Ж. 5.1.

За збільшення частоти обертання приводного вала похилого транспортера в межах $90 \le n_m \le 150$ об/хв, параметри оптимізації (загальний коефіцієнт $\mu_{зде}^{(Z)}$ та коефіцієнт $\mu_{зде}^{(Z_{1l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{2l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ сепарації загальних домішок кожної ділянки $l_1$, $l_2$, $l_3$ похилого транспортера збільшується у середньому на 5…6%, причому значення 8% відповідає коефіцієнту $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ сепарації третьої ділянки $l_3$ похилого транспортера (рис. 6.1в, г; рис. 6.2в, г; рис. 6.3в, г; рис. 6.4в, г), а розсіювання експериментальних даних підкоряється нормальному закону імовірного розподілення за довірчого інтервала 0,95, додаток Ж.6.1.

Домінантними факторами, які найбільше впливають на функціональну зміну параметрів оптимізації (загального коефіцієнта $\mu_{зде}^{(Z)}$ та коефіцієнта $\mu_{зде}^{(Z_{1l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{2l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ сепарації загальних домішок кожної ділянки $l_1$, $l_2$, $l_3$ похилого транспортера) є швидкість руху $\vartheta_M$ коренезбиральної машини та частота обертання $n_ш$ приводного вала похилого транспортера:

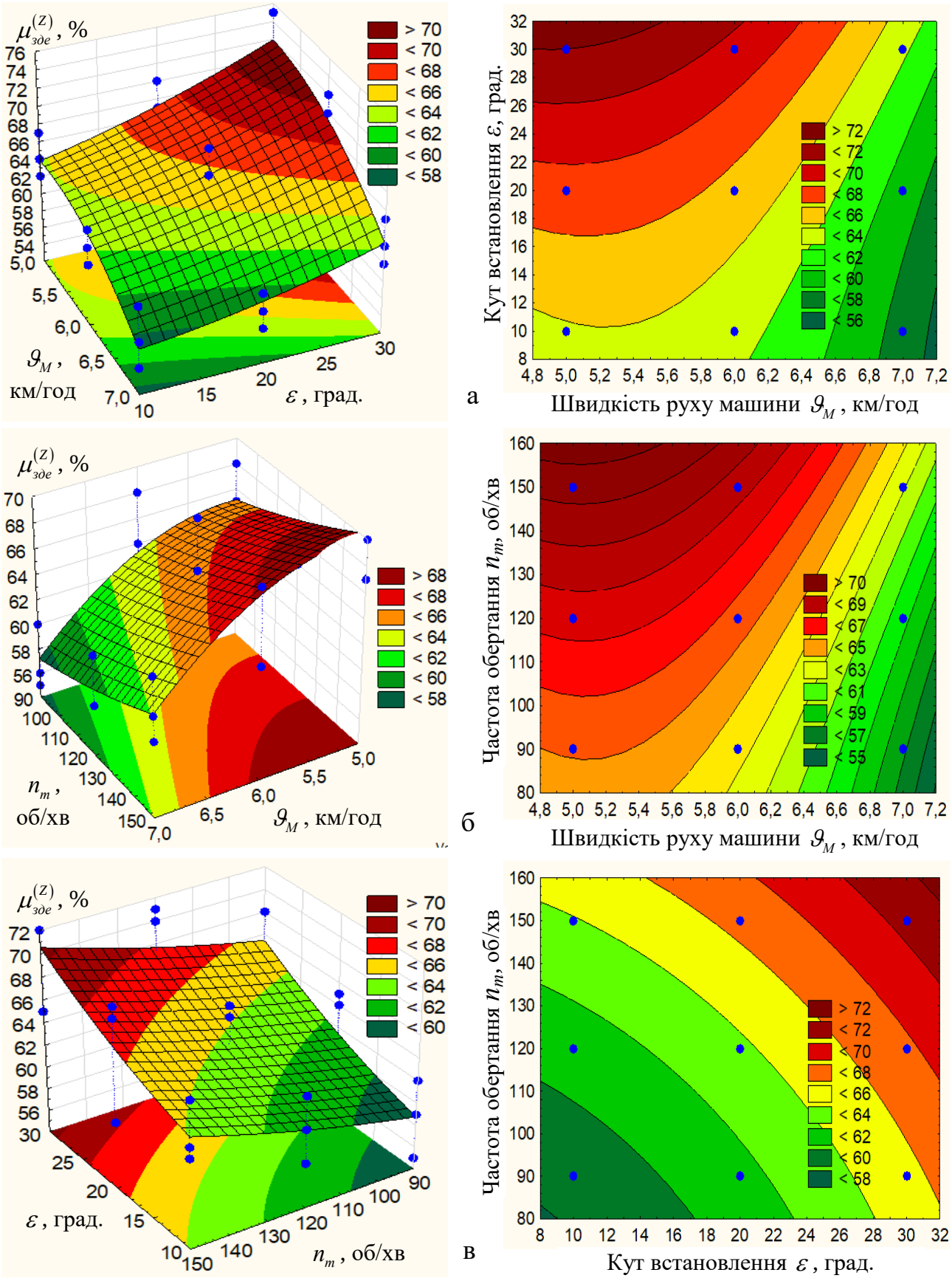



Рисунок 6.1 – Поверхня відгуку та її двомірний переріз залежності зміни $\mu_{зде}^{(Z)}$ як функція: а – $\mu_{зде}^{(Z)} = f_\mu(\vartheta_M;\varepsilon)$; б – $\mu_{зде}^{(Z)} = f_\mu(\vartheta_M;n_m)$; в – $\mu_{зде}^{(Z)} = f_\mu(\varepsilon;n_m)$

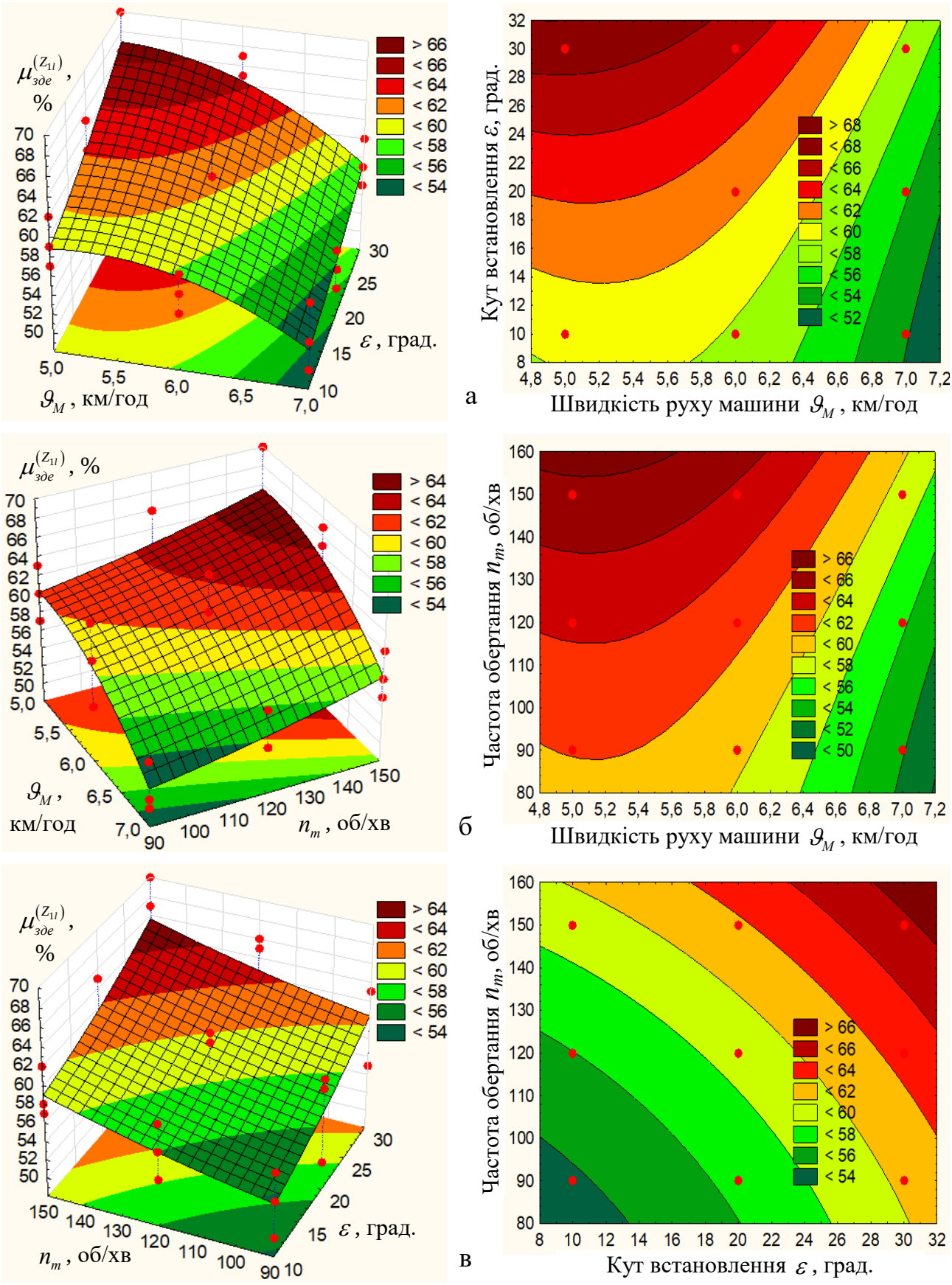



Рисунок 6.2 – Поверхня відгуку та її двомірний переріз залежності зміни $\mu_{здо}^{(Z_{1l})}$ як функція: а – $\mu_{здо}^{(Z_{1l})} = f_\mu(\vartheta_M;\varepsilon)$; б – $\mu_{здо}^{(Z_{1l})} = f_\mu(\vartheta_M;n_m)$; в – $\mu_{здо}^{(Z_{1l})} = f_\mu(\varepsilon;n_m)$

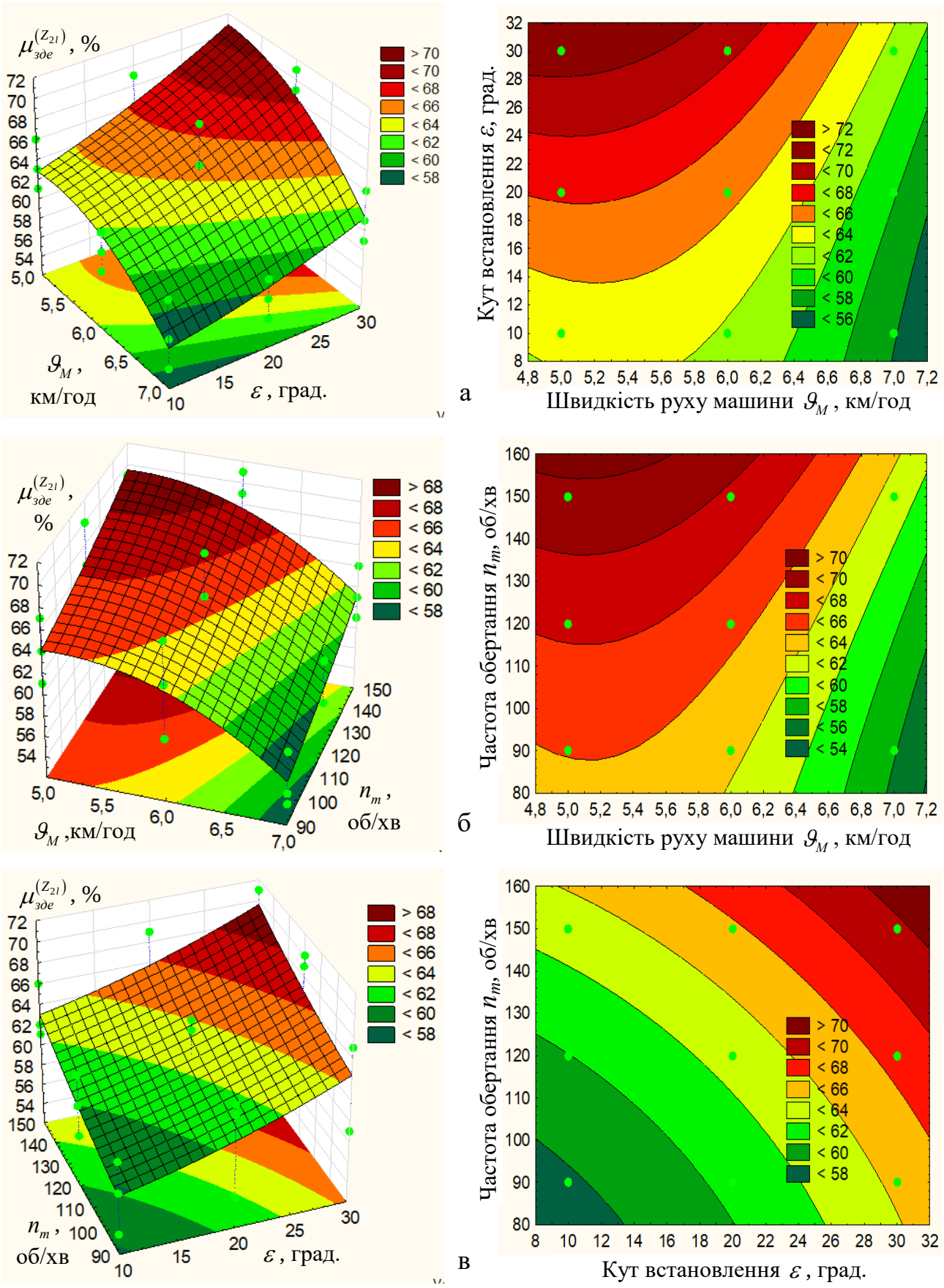



Рисунок 6.3 – Поверхня відгуку та її двомірний переріз залежності зміни $\mu_{зде}^{(Z_{2l})}$ як функція: а – $\mu_{зде}^{(Z_{2l})} = f_\mu(\vartheta_M;\varepsilon)$; б – $\mu_{зде}^{(Z_{2l})} = f_\mu(\vartheta_M;n_m)$; в – $\mu_{зде}^{(Z_{2l})} = f_\mu(\varepsilon;n_m)$

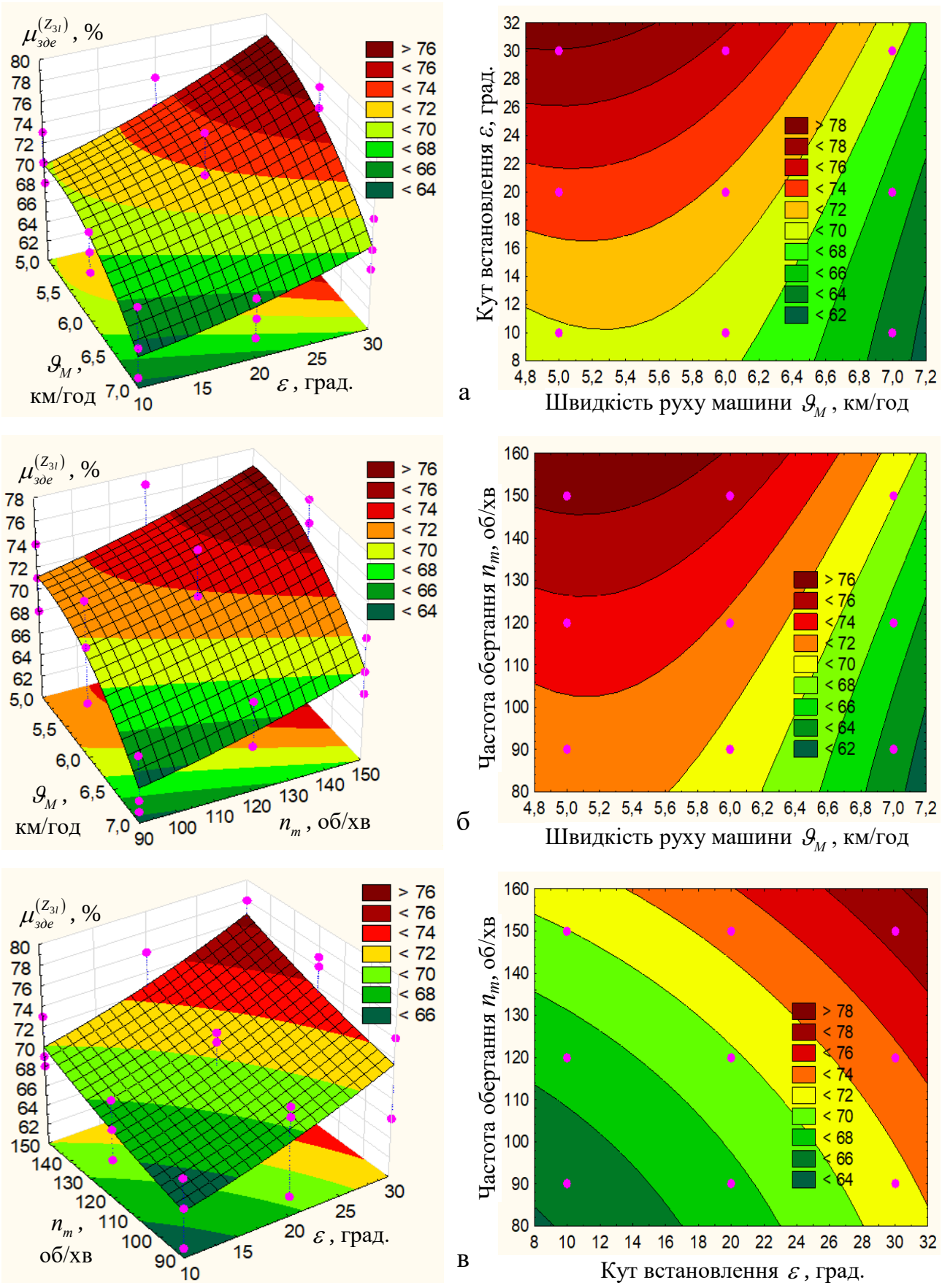
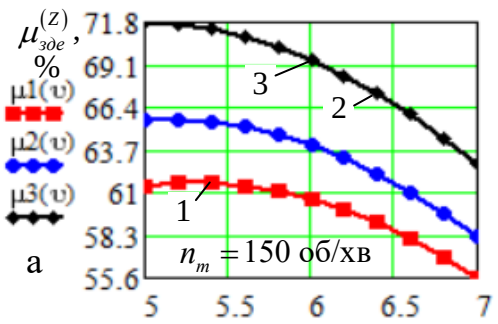
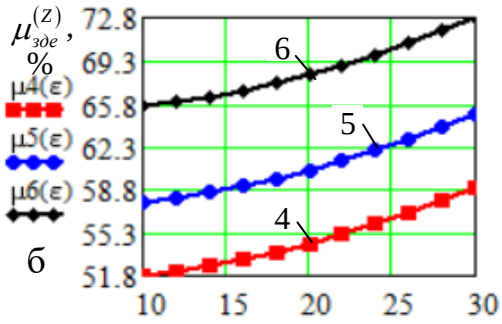



Рисунок 6.4 – Поверхня відгуку та її двомірний переріз залежності зміни $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ як функція: а – $\mu_{зде}^{(Z_{3l})} = f_\mu(\vartheta_M;\varepsilon)$; б – $\mu_{зде}^{(Z_{3l})} = f_\mu(\vartheta_M;n_m)$; в – $\mu_{зде}^{(Z_{3l})} = f_\mu(\varepsilon;n_m)$



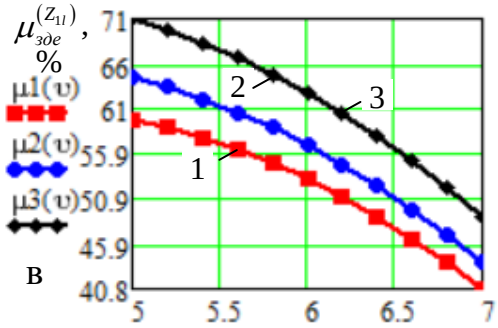

а

Швидкість руху машини $\vartheta_M$, км/год



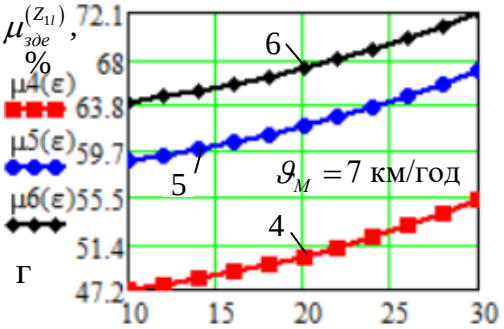

б

Кут встановлення $\varepsilon$, град.



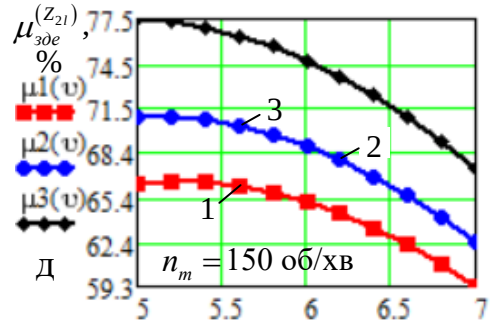

в

Швидкість руху машини $\vartheta_M$, км/год



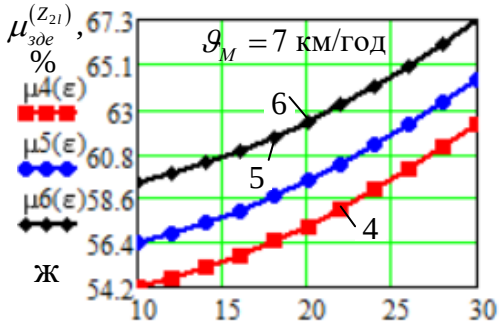

г

Кут встановлення $\varepsilon$, град.



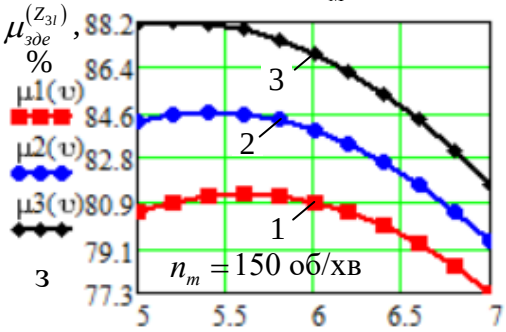

д

Швидкість руху машини $\vartheta_M$, км/год



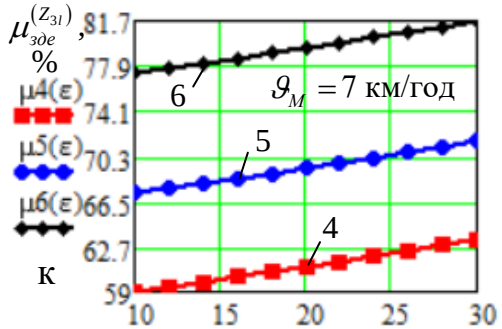

ж

Кут встановлення $\varepsilon$, град.




з

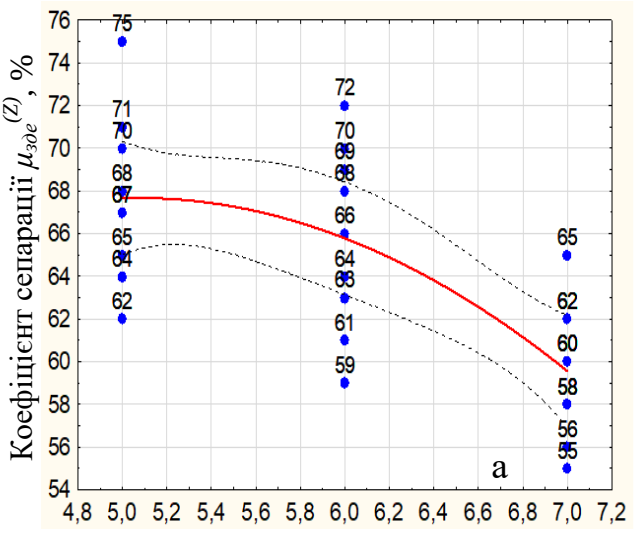
Швидкість руху машини $\vartheta_M$, км/год

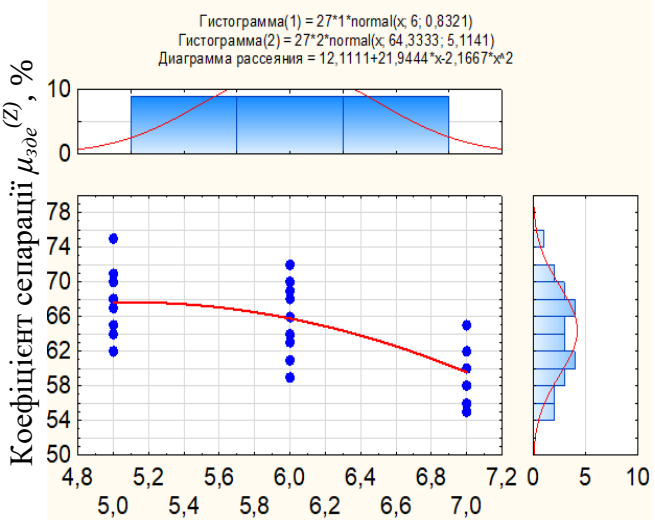


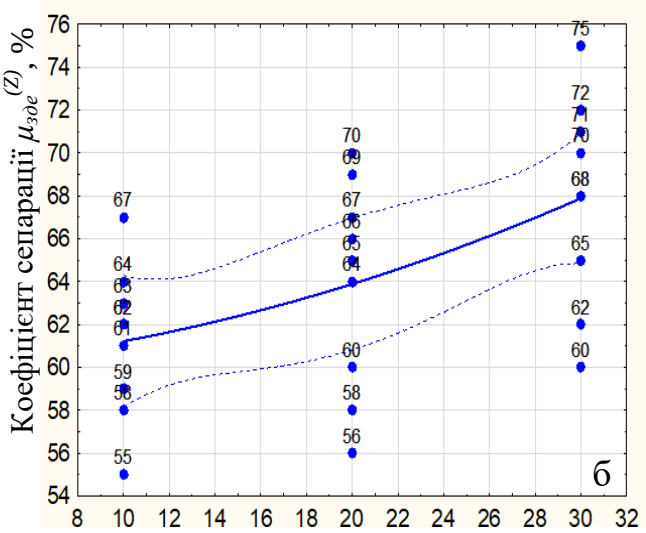

к

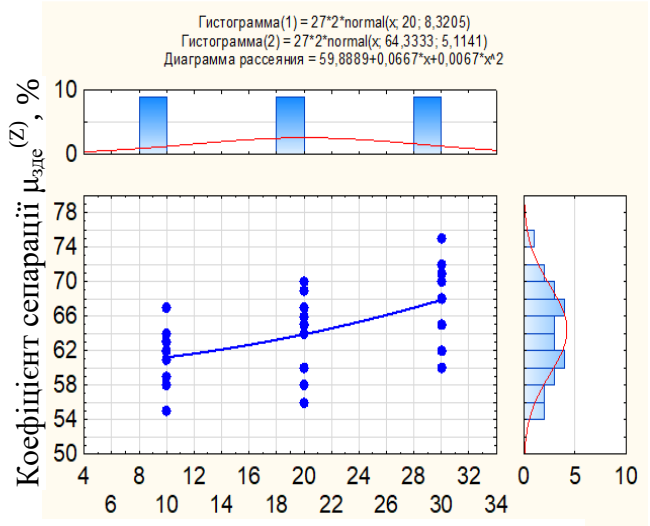
Кут встановлення $\varepsilon$, град.

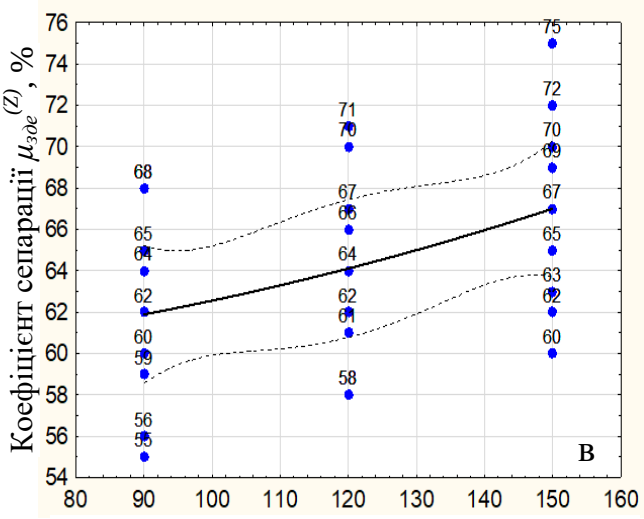
Рисунок 6.5 – Залежність зміни як функція: а – $\mu_{зде}^{(Z)} = f_\mu(\vartheta_M)$; б – $\mu_{зде}^{(Z)} = f_\mu(\varepsilon)$; в – $\mu_{зде}^{(Z_{1l})} = f_\mu(\vartheta_M)$; г – $\mu_{зде}^{(Z_{1l})} = f_\mu(\varepsilon)$; д – $\mu_{зде}^{(Z_{2l})} = f_\mu(\vartheta_M)$; ж – $\mu_{зде}^{(Z_{2l})} = f_\mu(\varepsilon)$; з – $\mu_{зде}^{(Z_{3l})} = f_\mu(\vartheta_M)$; к – $\mu_{зде}^{(Z_{3l})} = f_\mu(\varepsilon)$; 1, 2, 3 – відповідно, $\varepsilon$ = 10, 20, 30 град.; 4, 5, 6 – відповідно, $n_m$ = 90, 120, 150 об/хв



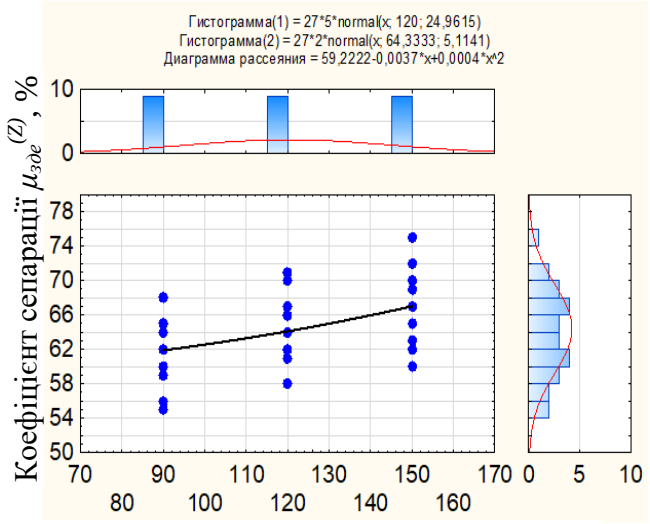




Рисунок 6.6 – Діаграма розсіювання експериментальних даних залежності зміни загального коефіцієнта сепарації $\mu_{зде}^{(Z)}$ загальних домішок похилого транспортера як функція: а – $\mu_{зде}^{(Z)} = f_\mu(\vartheta_M)$; б – $\mu_{зде}^{(Z)} = f_\mu(\varepsilon)$; в – $\mu_{зде}^{(Z)} = f_\mu(n_m)$

- за збільшення швидкості руху $\vartheta_M$ коренезбиральної машини в межах варіювання фактора (1 км/год) загальний коефіцієнт $\mu_{зде}^{(Z)}$ та коефіцієнти $\mu_{зде}^{(Z_{1l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{2l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ сепарації зменшуються в середньому на 3…4%, рис. 6.5, рис. 6.6а;

- за збільшення частоти обертання $n_ш$ приводного вала похилого транспортера в межах варіювання фактора (30 об/хв) загальний коефіцієнт $\mu_{зде}^{(Z)}$ та коефіцієнти $\mu_{зде}^{(Z_{1l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{2l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ сепарації збільшуються у середньому на 5…6%, рис. 6.5, рис.6.6в.

При цьому, за збільшення кута $\varepsilon$ встановлення похилого транспортера до горизонту в межах варіювання фактора (10 град.) загальний коефіцієнт $\mu_{зде}^{(Z)}$ та коефіцієнти $\mu_{зде}^{(Z_{1l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{2l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ сепарації збільшуються у середньому тільки на 2…3%, рис. 6.5, рис. 6.6б.

Критерієм оптимізації параметрів похилого транспортера ОТТМ є максимальне значення загального коефіцієнта $\mu_{зде}^{(Z)}$ та коефіцієнтів $\mu_{зде}^{(Z_{1l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{2l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ сепарації загальних домішок кожної ділянки $l_1$, $l_2$, $l_3$ похилого транспортера, тобто $\mu_{зде}^{(Z)} \to \max$, $\mu_{зде}^{(Z_{1l})} \to \max$, $\mu_{зде}^{(Z_{2l})} \to \max$, $\mu_{зде}^{(Z_{3l})} \to \max$.

Проте, необхідно враховувати технологічно-ефективний компроміс між загальною продуктивністю збирального агрегату, або продуктивністю $W_M$ коренезбиральної машини за умови $W_M \to \max$ і умови $\mu_{зде}^{(Z)} \to \max$, $\mu_{зде}^{(Z_{1l})} \to \max$, $\mu_{зде}^{(Z_{2l})} \to \max$, $\mu_{зде}^{(Z_{3l})} \to \max$.

Тоді можна констатувати, що раціональні параметри похилого транспортера ОТТМ, які встановлено за результатами експериментальних досліджень будуть за максимальних значень вхідних факторів: швидкості руху коренезбиральної машини $\vartheta_M$ = 7 км/год (2,1 м/с), кута встановлення похилого транспортера до горизонту $\varepsilon$ = 30 град., частоти обертання приводного вала похилого транспортера $n_m$ = 150 об/хв за існуючих параметрів стандартного пруткового транспортера: ширини пруткового транспортера $b_m$ = 0,9 м, діаметра прутків $d_{n.m}$ = 0,025 м, зазору між прутками $c_{n.m}$ = 0,045 м [321].

При цьому, значення коефіцієнтів технологічної ефективності роботи похилого транспортера ОТТМ коренезбиральної машини під час збирання коренеплодів цикорію є наступними: загальний коефіцієнт $\mu_{зде}^{(Z)}$ сепарації загальних домішок похилого транспортера $\mu_{зде}^{(Z)}$ = 65%; коефіцієнт $\mu_{зде}^{(Z_{1l})}$

сепарації загальних домішок першої ділянки $l_1$ похилого транспортера $\mu_{зде}^{(Z_{1l})} =$ 60%; коефіцієнт $\mu_{зде}^{(Z_{2l})}$ сепарації загальних домішок другої ділянки $l_2$ похилого транспортера $\mu_{зде}^{(Z_{1l})} =$ 64%; коефіцієнт $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ сепарації загальних домішок третьої ділянки $l_3$ похилого транспортера $\mu_{зде}^{(Z_{1l})} =$ 70%.

Перевірку адекватності розроблених аналітичної (3.28) та емпіричної (6.1) математичних моделей виконаємо графо-аналітичним методом шляхом порівняння відповідної різниці теоретичних і експериментальних значень функціональної зміни загального коефіцієнта сепарації $\mu_{зд}^{(Z)}$ та $\mu_{зде}^{(Z_{il})}$ загальних домішок похилим транспортером ОТТМ.

На рис. 6.7 наведено графічні залежності функціональної зміни загального коефіцієнта сепарації $\mu_{зд}^{(Z)}$ та $\mu_{зде}^{(Z)}$ загальних домішок як функція $\mu_{зд}^{(Z)}\left(\mu_{зде}^{(Z_{il})}\right) = f_{\mu}\left(\vartheta_M\right)$ (рис. 6.7а) і $\mu_{зд}^{(Z)}\left(\mu_{зде}^{(Z_{il})}\right) = f_{\mu}\left(n_m\right)$ (рис. 6.7б), які отримано за результатами, відповідно, аналітичного та емпіричного аналізу.

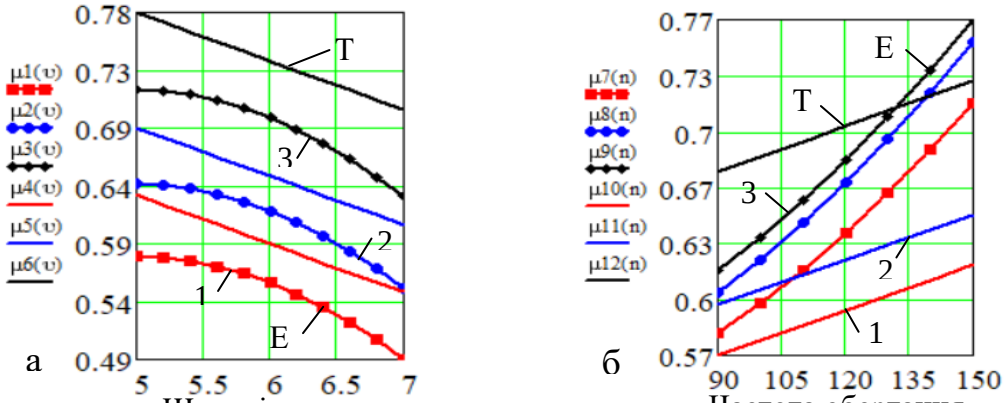



Рисунок 6.7 – Залежність зміни загального коефіцієнта сепарації $\mu_{зд}^{(Z)}$ та $\mu_{зде}^{(Z_{il})}$ загальних домішок як функція: а – $\mu_{зд}^{(Z)}\left(\mu_{зде}^{(Z_{il})}\right) = f_{\mu}\left(\vartheta_M\right)$, 1, 2, 3 – відповідно, $n_m =$ 90, 120 і 150 об/хв; б – $\mu_{зд}^{(Z)}\left(\mu_{зде}^{(Z_{il})}\right) = f_{\mu}\left(n_m\right)$, відповідно, $\vartheta_M =$ 5, 7 і 9 км/год

На основі аналізу залежностей (рис. 6.7) встановлено, що розбіжність теоретичних $\mu_{зд}^{(Z)}$ та експериментальних $\mu_{зде}^{(Z)}$ значень коефіцієнта сепарації загальних домішок знаходиться у межах 10…15%.

Таким чином, можна констатувати, що розроблена теоретична модель (3.28), яка характеризує функціональну зміну загального коефіцієнта сепарації $\mu_{зд}^{(Z)}$ загальних домішок є адекватною емпіричному розподілу експериментальних значень $\mu_{зде}^{(Z)}$.

## 6.2. Результати польових експериментальних досліджень показників якості роботи очисних транспортно-технологічних модулів

Мета проведення експериментальних досліджень: розробити математичні емпіричні моделі, які описують функціональну зміну основних показників якості відокремлення домішок від крупних коренеплодів залежно від конструктивно-кінематичних параметрів відповідної ОТТМ і умов роботи коренезбиральної машини.

Завдання дослідження: на основі результатів проведених польових експериментальних досліджень удосконалених конструкцій ОТТМ у складі коренезбиральної машини розробити рівняння регресії основних показників якості роботи та обґрунтовувати основні конструктивно-кінематичні параметри робочих органів ОТТМ.

У процесі проведення польових експериментальних досліджень під час збирання крупних коренеплодів встановлювали функціональний характер зміни математичних моделей, які описують такі показники якості роботи:

- для коренеплодів кормових і цукрових буряків згідно моделі рис. 5.15 і табл. 5.3 визначали функціональну залежність зміни:

- загальних домішок відповідно, для кормових і цукрових буряків $ЗД_{кк} = f_{ЗД}\left(\vartheta_M; n_ш; n_e; w_\rho\right)$ і $ЗД_{кц} = f_{ЗД}\left(\vartheta_M; n_ш; n_e; w_\rho\right)$ (шнеки круглого перерізу) та $ЗД_{ек} = f_{ЗД}\left(\vartheta_M; n_ш; n_e; w_\rho\right)$ і $ЗД_{ец} = f_{ЗД}\left(\vartheta_M; n_ш; n_e; w_\rho\right)$ (еліпсні шнеки);

- маси налиплого грунту відповідно, для кормових і цукрових буряків $НГ_{кк} = f_{НГ}\left(\vartheta_M; n_ш; n_e; w_\rho\right)$ і $НГ_{кц} = f_{НГ}\left(\vartheta_M; n_ш; n_e; w_\rho\right)$ (шнеки круглого перерізу) та $НГ_{ек} = f_{НГ}\left(\vartheta_M; n_ш; n_e; w_\rho\right)$ і $НГ_{ец} = f_{НГ}\left(\vartheta_M; n_ш; n_e; w_\rho\right)$ (еліпсні шнеки);

- пошкодження коренеплодів відповідно, для кормових і цукрових буряків $ПК_{кк} = f_{ПК}\left(\vartheta_M; n_ш; n_e; w_\rho\right)$ і $ПК_{кц} = f_{ПК}\left(\vartheta_M; n_ш; n_e; w_\rho\right)$ (шнеки круглого перерізу) та $ПК_{ек} = f_{ПК}\left(\vartheta_M; n_ш; n_e; w_\rho\right)$ і $ПК_{ец} = f_{ПК}\left(\vartheta_M; n_ш; n_e; w_\rho\right)$ (еліпсні шнеки);

- для коренеплодів цикорію згідно моделі рис. 5.16 і табл. 5.4 визначали функціональну залежність зміни загальних домішок $ЗД_{цк}^{(w_{\rho i})} = f_{ЗД}\left(\vartheta_M; n_{шк}\right)$, маси налиплого грунту $НГ_{цк}^{(w_{\rho i})} = f_{НГ}\left(\vartheta_M; n_{шк}\right)$ на коренеплодах, пошкодження коренеплодів $ПК_{цк}^{(w_{\rho i})} = f_{ПК}\left(\vartheta_M; n_{шк}\right)$ для трьох фіксованих значень вологості грунту $w_\rho = 18 \pm 1\%$, $w_\rho = 21 \pm 1\%$, $w_\rho = 24 \pm 1\%$ на глибині залягання коренеплодів.

За результатами статистичної обробки отриманого експериментального масиву даних показників якості роботи ОТТМ у складі коренезбиральних машини (додаток Ж.7.2) було встановлено, що:

- під час проведення польових досліджень із визначення показників якості роботи ОТТМ (рис. 5.12) при збиранні кормових буряків (рис. 6.8, додаток Ж.7.2) і аналізу отриманих показників статистичної обробки (додаток Ж.8.2), найбільше значення коефіцієнта чисельної детермінації ($D_{ЗДкк}$ = 0,940, $D_{ЗДек}$ = 0,938, $D_{НГкк}$ = 0,790, $D_{НГек}$ = 0,962, $D_{ПКкк}$ = 0,965, $D_{ПКек}$ = 0,816) було в математичної моделі повного полінома другої степені;

- під час проведення польових досліджень із визначення показників якості роботи ОТТМ (рис. 5.13) при збиранні цукрових буряків (рис. 6.9, додаток Ж.9.2) і аналізу отриманих показників статистичної обробки (додаток Ж.10.2) найбільше значення коефіцієнта чисельної детермінації ($D_{ЗДкц}$ = 0,950, $D_{ЗДке}$ = 0,948, $D_{НГкц}$ = 0,987, $D_{НГец}$ = 0,946, $D_{ПКкц}$ = 0,976, $D_{ПКкц}$ = 0,890) було в математичної моделі полінома другої степені;

- під час проведення польових досліджень із визначення показників якості роботи ОТТМ (рис. 5.14) при збиранні коренеплодів цикорію (додаток Ж.11.2) і аналізу отриманих показників статистичної обробки (додаток Ж.12.2) найбільше значення коефіцієнта чисельної детермінації ($D_{ЗДцк}$ = 0,962, $D_{НГцк}$ = 0,865, $D_{ПКцк}$ = 0,983) було в математичної моделі полінома другої степені.

Натуральні значення коефіцієнтів рівняння регресії, які отримано за результатами експериментальних досліджень показників якості роботи ОТТМ під час збирання крупних коренеплодів наведено у табл. 6.2 (кормові буряки), у табл. 6.3 (цукрові буряки), у табл. 6.4 (коренеплоди цикорію).

Рисунок 6.8 – Загальний вигляд самохідної шестирядної модернізованої коренезбиральної машини МКК-6А в роботі під час збирання коренеплодів кормових буряків

Рисунок 6.9 – Загальний вигляд причіпної чотирирядної коренезбиральної машини МПК-4 в роботі під час збирання коренеплодів цукрових буряків

Таблиця 6.2 – Натуральні значення коефіцієнтів рівнянь регресії (кормові буряки)

| Позначення коефіцієнта | Значення коефіцієнта | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $ЗД_{кк}$ | $ЗД_{ек}$ | $НГ_{кк}$ | $НГ_{ек}$ | $ПК_{кк}$ | $ПК_{ек}$ |
| $b_0$ | 139,8 | 133,5 | 27,5 | 23,9 | 11,6 | 37,9 |
| $b_1$ | -0,94 | -0,75 | -0,22 | -0,016 | 2,55 | -1,82 |
| $b_2$ | -0,29 | -0,29 | $-0{,}5\ 10^{-2}$ | -0,032 | 0,05 | -0,047 |
| $b_3$ | $-0{,}6\ 10^{-3}$ | $0{,}57\ 10^{-2}$ | -0,01 | $-0{,}42\ 10^{-2}$ | $-0{,}41\ 10^{-2}$ | -0,11 |
| $b_4$ | -10,16 | -9,82 | -2,08 | -1,7 | -1,41 | -1,66 |
| $b_{12}$ | $0{,}45\ 10^{-2}$ | $0{,}6\ 10^{-2}$ | $0{,}66\ 10^{-7}$ | $0{,}25\ 10^{-2}$ | $0{,}15\ 10^{-2}$ | 0,02 |
| $b_{13}$ | $-0{,}13\ 10^{-2}$ | $-0{,}17\ 10^{-2}$ | $0{,}25\ 10^{-3}$ | $-0{,}18\ 10^{-3}$ | $-0{,}12\ 10^{-2}$ | $0{,}41\ 10^{-3}$ |
| $b_{14}$ | $0{,}64\ 10^{-2}$ | $0{,}63\ 10^{-2}$ | $0{,}18\ 10^{-5}$ | $0{,}11\ 10^{-4}$ | -0,11 | -0,14 |
| $b_{23}$ | $0{,}23\ 10^{-4}$ | $0{,}28\ 10^{-4}$ | $-0{,}25\ 10^{-5}$ | $-0{,}25\ 10^{-5}$ | $0{,}9\ 10^{-8}$ | $0{,}13\ 10^{-7}$ |
| $b_{24}$ | $0{,}13\ 10^{-3}$ | $0{,}38\ 10^{-3}$ | $-0{,}71\ 10^{-7}$ | $0{,}38\ 10^{-3}$ | $-0{,}88\ 10^{-3}$ | $0{,}14\ 10^{-2}$ |
| $b_{34}$ | $0{,}32\ 10^{-4}$ | $0{,}94\ 10^{-4}$ | $0{,}13\ 10^{-4}$ | $-0{,}62\ 10^{-5}$ | $0{,}37\ 10^{-3}$ | $0{,}27\ 10^{-3}$ |
| $b_{11}$ | 0,16 | 0,13 | $-0{,}54\ 10^{-3}$ | -0,044 | 0,12 | 0,28 |
| $b_{22}$ | $0{,}77\ 10^{-3}$ | $0{,}7\ 10^{-3}$ | $0{,}16\ 10^{-4}$ | $0{,}31\ 10^{-4}$ | $0{,}31\ 10^{-4}$ | $-0{,}22\ 10^{-3}$ |
| $b_{33}$ | $-0{,}16\ 10^{-5}$ | $-0{,}78\ 10^{-5}$ | $0{,}72\ 10^{-5}$ | $0{,}49\ 10^{-5}$ | $0{,}31\ 10^{-5}$ | $0{,}33\ 10^{-5}$ |
| $b_{44}$ | 0,23 | 0,22 | 0,047 | 0,037 | 0,044 | 0,045 |

За результатами перевірки значимості коефіцієнтів емпіричної моделі за $t$-критерієм Ст'юдента було встановлено, що:

- коефіцієнти впливу фактора $n_e$ ($b_3 = 0{,}6\ 10^{-3}$) та взаємодії факторів $n_ш w_\rho$ ($b_{24} = 0{,}13\ 10^{-3}$ і $b_{24} = 0{,}38\ 10^{-3}$), $n_e w_\rho$ ($b_{34} = 0{,}32\ 10^{4}$) на апроксимовані значення зміни загальних домішок (кормові буряки), як для шнеків круглого перерізу $ЗД_{кк}$, так і для еліпсних шнеків $ЗД_{ек}$ є несуттєвим, тобто вони були не враховані, або ними знехтували, табл. 6.2;

- коефіцієнти впливу фактора $\vartheta_M$ ($b_1 = -0{,}016$, $b_{11} = -0{,}54\ 10^{-3}$, $b_{11} = -0{,}044$) та взаємодії факторів $\vartheta_M n_ш$ ($b_{12} = 0{,}66\ 10^{-7}$), $\vartheta_M n_e$ ($b_{13} = 0{,}25\ 10^{-3}$, $b_{13} = 0{,}18\ 10^{-3}$), $\vartheta_M w_\rho$ ($b_{14} = 0{,}18\ 10^{-5}$, $b_{13} = 0{,}11\ 10^{-4}$), $n_e w_\rho$ ($b_{34} = 0.13\ 10^{-4}$ і $b_{34} = 0{,}62\ 10^{-5}$) на апроксимовані значення зміни маси налиплого грунту на коренеплодах (кормові буряки), як для шнеків круглого перерізу $НГ_{кк}$, так і для еліпсних шнеків $НГ_{ек}$ є несуттєвим та ними знехтували, табл. 6.2;

Таблиця 6.3 – Натуральні значення коефіцієнтів рівнянь регресії (цукрові буряки)

| Позначення коефіцієнта | Значення коефіцієнта | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $ЗД_{кц}$ | $ЗД_{ец}$ | $НГ_{кц}$ | $НГ_{ец}$ | $ПК_{кц}$ | $ПК_{ец}$ |
| $b_0$ | 220,4 | 217,6 | 14,8 | 12,38 | -103,2 | 9,5 |
| $b_1$ | -15,78 | -15,52 | 1,36 | 1,49 | 36,1 | 10,5 |
| $b_2$ | -0,32 | -0,32 | $-0{,}13\ 10^{-2}$ | 0,017 | 0,52 | -0,09 |
| $b_3$ | -0,014 | $-0{,}97\ 10^{-2}$ | $-0{,}12\ 10^{-2}$ | $3{,}51\ 10^{-3}$ | $-0{,}43\ 10^{-2}$ | -0,02 |
| $b_4$ | -12,53 | -12,45 | -1,55 | -1,58 | -2,77 | -2,01 |
| $b_{12}$ | 0,014 | 0,014 | $-0{,}25\ 10^{-2}$ | $-2{,}59\ 10^{-3}$ | -0,07 | 0,02 |
| $b_{13}$ | $0{,}33\ 10^{-2}$ | $0{,}29\ 10^{-2}$ | $-0{,}35\ 10^{-3}$ | $-3{,}9\ 10^{-4}$ | $-0{,}44\ 10^{-2}$ | $0{,}18\ 10^{-6}$ |
| $b_{14}$ | 0,57 | 0,57 | -0,036 | -0,038 | -0,11 | -0,13 |
| $b_{23}$ | $0{,}3\ 10^{-4}$ | $0{,}28\ 10^{-4}$ | $-0{,}25\ 10^{-5}$ | $-1{,}75\ 10^{-5}$ | $-0{,}5\ 10^{-5}$ | $0{,}24\ 10^{-7}$ |
| $b_{24}$ | $0{,}12\ 10^{-3}$ | $0{,}38\ 10^{-3}$ | $0{,}26\ 10^{-7}$ | $-0{,}1\ 10^{-6}$ | $0{,}13\ 10^{-2}$ | $0{,}13\ 10^{-2}$ |
| $b_{34}$ | $-0{,}37\ 10^{-3}$ | $-0{,}36\ 10^{-3}$ | $-0{,}11\ 10^{-5}$ | $0{,}4\ 10^{-6}$ | $0{,}25\ 10^{-3}$ | $0{,}28\ 10^{-3}$ |
| $b_{11}$ | -0,058 | -0,07 | $-0{,}45\ 10^{-2}$ | $-0{,}7\ 10^{-2}$ | -1,77 | -0,77 |
| $b_{22}$ | $0{,}67\ 10^{-3}$ | $0{,}65\ 10^{-3}$ | $0{,}51\ 10^{-4}$ | $0{,}2\ 10^{-4}$ | $0{,}34\ 10^{-3}$ | $-0{,}86\ 10^{-4}$ |
| $b_{33}$ | $-0{,}74\ 10^{-5}$ | $-0{,}86\ 10^{-5}$ | $0{,}27\ 10^{-5}$ | $0{,}2\ 10^{-6}$ | $0{,}25\ 10^{-4}$ | $0{,}93\ 10^{-5}$ |
| $b_{44}$ | 0,21 | 0,21 | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,05 |

Таблиця 6.4 – Натуральні значення коефіцієнтів рівняння регресії (коренеплоди цикорію)

| Позначення | Натуральні значення коефіцієнтів рівняння регресії | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $b_0$ | $b_1$ | $b_2$ | $b_3$ | $b_{12}$ |
| $ЗД_{цк} = f_{ЗД}(\vartheta_M; n_{шк}; w_\rho)$ | 20,5 | -5,62 | 0,017 | $-0{,}35\ 10^{-2}$ | 0,42 |
| | $b_{13}$ | $b_{23}$ | $b_{11}$ | $b_{22}$ | $b_{33}$ |
| | 0,017 | $-0{,}11\ 10^{-2}$ | 0,42 | $0{,}2\ 10^{-3}$ | -0,022 |
| $НГ_{цк} = f_{НГ}(\vartheta_M; n_{шк}; w_\rho)$ | $b_0$ | $b_1$ | $b_2$ | $b_3$ | $b_{12}$ |
| | 208,4 | -3,07 | -0,057 | -18,4 | $-0{,}4\ 10^{-2}$ |
| | $b_{13}$ | $b_{23}$ | $b_{11}$ | $b_{22}$ | $b_{33}$ |
| | $0{,}82\ 10^{-2}$ | $0{,}33\ 10^{-2}$ | 0,37 | $0{,}11\ 10^{-3}$ | 0,43 |
| $ПК_{цк} = f_{ПК}(\vartheta_M; n_{шк}; w_\rho)$ | $b_0$ | $b_1$ | $b_2$ | $b_3$ | $b_{12}$ |
| | 21,6 | 0,25 | $-0{,}76\ 10^{-2}$ | -1,98 | $0{,}15\ 10^{-2}$ |
| | $b_{13}$ | $b_{23}$ | $b_{11}$ | $b_{22}$ | $b_{33}$ |
| | $0{,}14\ 10^{-5}$ | $0{,}17\ 10^{-3}$ | -0,049 | $-0{,}3\ 10^{-4}$ | 0,047 |

- коефіцієнти впливу взаємодії двох факторів $n_ш n_e$ ($b_{23}$ = 0,9 $10^{-8}$ і $b_{23}$ = 0,13 $10^{-7}$, шнеки круглого перерізу та еліпсні шнеки) та $\vartheta_M n_e$ ($b_{13}$ = 0,41 $10^{-3}$, еліпсні шнеки) на апроксимовані значення зміни пошкодження коренеплодів $ПК_{кк}$ і $ПК_{ек}$ (кормові буряки) є несуттєвим, тобто вони були не враховані, або ними знехтували, табл. 6.2;

- коефіцієнти впливу взаємодії факторів $n_ш w_\rho$ ($b_{24}$ = 0,12 $10^{-3}$ і $b_{24}$ = 0,38 $10^{-3}$) на апроксимовані значення зміни загальних домішок (цукрові буряки), як для шнеків круглого перерізу $ЗД_{кц}$, так і для еліпсних шнеків $ЗД_{ец}$ є несуттєвим, тобто вони були не враховані, або ними знехтували, табл. 6.3;

- коефіцієнти впливу взаємодії факторів $n_ш n_e$ ($b_{23}$ = -0,25 $10^{-5}$), $n_ш w_\rho$ ($b_{24}$ = 0,26 $10^{-7}$ і $b_{24}$ = -0,1 $10^{-6}$), $n_e w_\rho$ ($b_{34}$ = 0,11 $10^{-5}$ і $b_{34}$ = 0,38 $10^{-6}$) на апроксимовані значення зміни маси налиплого грунту на коренеплодах (цукрові буряки), як для шнеків круглого перерізу $НГ_{кц}$, так і для еліпсних шнеків $НГ_{ец}$ є несуттєвим, тобто вони були не враховані, або ними знехтували, табл. 6.3;

- коефіцієнти впливу взаємодії двох факторів $n_ш n_e$ ($b_{23}$ = 0,5 $10^{-5}$ і $b_{23}$ = 0,24 $10^{-7}$, шнеки круглого перерізу та еліпсні шнеки) та коефіцієнт взаємодії факторів $\vartheta_M n_e$ ($b_{13}$ = 0,15 $10^{-6}$, еліпсні шнеки) на апроксимовані значення зміни пошкодження коренеплодів (цукрові буряки) $ПК_{кц}$, і $ПК_{ец}$ є несуттєвим, тобто вони були не враховані, або ними знехтували, табл. 6.3;

- коефіцієнт впливу фактора $w_\rho$ ($b_3$ = -0,35 $10^{-2}$) та коефіцієнт впливу взаємодії факторів ($b_{13}$ = 0,14 $10^{-5}$) на апроксимовані значення, відповідно, загальних домішок $ЗД_{цк}$ і пошкодження коренеплодів $ПК_{цк}$ цикорію є несуттєвим, тобто вони були не враховані, або ними знехтували, табл. 6.4.

Після перевірки значимості коефіцієнтів рівняння регресії за *F*-критерієм Фішера та адекватності моделі за *t*-критерієм Ст'юдента, отримали кінцеві емпіричні рівняння регресії в натуральних факторах, які характеризують функціональну залежність зміни показників якості роботи ОТТМ у складі коренезбиральної машини, тобто:

- загальних домішок, маси налиплого грунту та пошкодження коренеплодів під час збирання коренеплодів кормових і цукрових буряків відповідно, $ЗД_{кк}$ (шнеки круглого перерізу) та $ЗД_{ец}$ (еліпсні шнеки), $НГ_{кк}$ (шнеки круглого перерізу) та $НГ_{ец}$ (еліпсні шнеки), $ПК_{кк}$ (шнеки круглого перерізу) та $ПК_{ец}$ (еліпсні шнеки):

- під час збирання коренеплодів кормових буряків коренезбиральною машиною МКК-6, рис. 6.8 [315, 316]:

$$\begin{aligned} ЗД_{кк} = {} & 139,8 - 0,94\vartheta_M - 0,29n_ш - 10,16w_\rho + 0,45\cdot10^{-2}\vartheta_M n_ш - \\ & -0,13\cdot10^{-2}\vartheta_M n_e + 0,64\cdot10^{-2}\vartheta_M w_\rho + 0,23\cdot10^{-4}n_ш n_e + \\ & +0,16\vartheta_M^2 + 0,77\cdot10^{-3}n_ш^2 - 0,16\cdot10^{-5}n_e^2 + 0,23w_\rho^2 \end{aligned}; \quad (6.4)$$

$$\begin{aligned} ЗД_{ек} = {} & 133,5 - 0,75\vartheta_M - 0,29n_ш - 0,57\cdot10^{-2}n_e - 9,82w_\rho + \\ & +0,6\cdot10^{-2}\vartheta_M n_ш - 0,17\cdot10^{-2}\vartheta_M n_e + 0,63\cdot10^{-2}\vartheta_M w_\rho + 0,28\cdot10^{-4}n_ш n_e + \\ & +0,94\cdot10^{-4}n_e w_\rho + 0,13\vartheta_M^2 + 0,7\cdot10^{-3}n_ш^2 - 0,78\cdot10^{-5}n_e^2 + 0,22w_\rho^2 \end{aligned}; \quad (6.5)$$

$$\begin{aligned} НГ_{кк} = {} & 27,5 - 0,22\vartheta_M - 0,5\cdot10^{-2}n_ш - 0,01n_e - 2,08w_\rho - \\ & -0,25\cdot10^{-5}n_ш n_e + 0,16\cdot10^{-4}n_ш^2 + 0,72\cdot10^{-5}n_e^2 + 0,047w_\rho^2 \end{aligned}; \quad (6.6)$$

$$\begin{aligned} НГ_{ек} = {} & 23,9 - 0,032n_ш - 0,42\cdot10^{-2}n_e - 1,7w_\rho + 0,25\cdot10^{-2}\vartheta_M n_ш - \\ & -0,25\cdot10^{-5}n_ш n_e + 0,38\cdot10^{-3}n_ш w_\rho + 0,31\cdot10^{-4}n_ш^2 + 0,31\cdot10^{-5}n_e^2 + 0,037w_\rho^2 \end{aligned}; \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned} ПК_{кк} = {} & 11,6 + 2,55\vartheta_M + 0,05n_ш - 0,41\cdot10^{-2}n_e - 1,41w_\rho + \\ & +0,15\cdot10^{-2}\vartheta_M n_ш - 0,12\cdot10^{-2}\vartheta_M n_e - 0,11\vartheta_M w_\rho - 0,88\cdot10^{-3}n_ш w_\rho + \\ & +0,37\cdot10^{-3}n_e w_\rho + 0,12\vartheta_M^2 + 0,31\cdot10^{-4}n_ш^2 + 0,31\cdot10^{-5}n_e^2 + 0,044w_\rho^2 \end{aligned}; \quad (6.8)$$

$$\begin{aligned} ПК_{ек} = {} & 37,9 - 1,82\vartheta_M - 0,047n_ш - 0,11n_e - 1,66w_\rho + \\ & +0,02\vartheta_M n_ш - 0,14\vartheta_M w_\rho + 0,14\cdot10^{-2}n_ш w_\rho + 0,27\cdot10^{-3}n_e w_\rho + \\ & +0,28\vartheta_M^2 - 0,22\cdot10^{-3}n_ш^2 + 0,33\cdot10^{-5}n_e^2 + 0,045w_\rho^2 \end{aligned}; \quad (6.9)$$

- під час збирання коренеплодів цукрових буряків коренезбиральною машиною МПК-4, рис. 6.9 [317, 318]:

$$\begin{aligned} ЗД_{кц} = {} & 220,4 - 15,78\vartheta_M - 0,32n_ш - 0,014n_e - 12,53w_\rho + \\ & +0,014\vartheta_M n_ш + 0,33\cdot10^{-2}\vartheta_M n_e + 0,57\vartheta_M w_\rho + 0,3\cdot10^{-4}n_ш n_e - \\ & -0,37\cdot10^{-3}n_e w_\rho - 0,058\vartheta_M^2 + 0,67\cdot10^{-3}n_ш^2 - 0,74\cdot10^{-5}n_e^2 + 0,21w_\rho^2 \end{aligned}; \quad (6.10)$$

$$ЗД_{ец} = 217,6 - 15,52\vartheta_M - 0,32n_ш - 0,97\cdot10^{-2}n_e - 12,45w_\rho + \\ +0,014\vartheta_M n_ш + 0,29\cdot10^{-2}\vartheta_M n_e + 0,57\vartheta_M w_\rho + 0,28\cdot10^{-4}n_ш n_e - \\ -0,36\cdot10^{-3}n_e w_\rho - 0,07\vartheta_M^2 + 0,65\cdot10^{-3}n_ш^2 - 0,86\cdot10^{-5}n_e^2 + 0,21w_\rho^2 \quad ; \quad (6.11)$$

$$НГ_{кц} = 14,8 + 1,36\vartheta_M - 0,13\cdot10^{-2}n_ш - 0,12\cdot10^{-2}n_e - 1,55w_\rho - 0,25\cdot10^{-2}\vartheta_M n_ш - \\ -0,35\cdot10^{-3}\vartheta_M n_e - 0,036\vartheta_M w_\rho + 0,51\cdot10^{-4}n_ш^2 + 0,27\cdot10^{-5}n_e^2 + 0,04w_\rho^2 \quad ; \quad (6.12)$$

$$НГ_{ец} = 12,38 + 1,49\vartheta_M + 0,017n_ш + 3,51\cdot10^{-3}n_e - 1,58w_\rho - 2,59\cdot10^{-3}\vartheta_M n_ш - \\ -3,9\cdot10^{-4}\vartheta_M n_e - 0,038\vartheta_M w_\rho - 1,75\cdot10^{-5}n_ш n_e + 0,16\cdot10^{-4}n_ш^2 + 0,04w_\rho^2 \quad ; \quad (6.13)$$

$$ПК_{кц} = -103,2 + 36,1\vartheta_M + 0,52n_ш - 0,43\cdot10^{-2}n_e - 2,77w_\rho - \\ -0,07\vartheta_M n_ш - 0,44\cdot10^{-2}\vartheta_M n_e - 0,11\vartheta_M w_\rho + 0,13\cdot10^{-2}n_ш w_\rho + \\ +0,25\cdot10^{-3}n_e w_\rho - 1,77\vartheta_M^2 - 0,34\cdot10^{-3}n_ш^2 + 0,25\cdot10^{-4}n_e^2 + 0,07w_\rho^2 \quad ; \quad (6.14)$$

$$ПК_{ец} = 9,5 + 10,5\vartheta_M - 0,09n_ш - 0,02n_e - 2,01w_\rho + \\ +0,02\vartheta_M n_ш - 0,13\vartheta_M w_\rho + 0,13\cdot10^{-2}n_ш w_\rho + 0,28\cdot10^{-3}n_e w_\rho - ; \quad (6.15) \\ -0,77\vartheta_M^2 - 0,86\cdot10^{-4}n_ш^2 + 0,93\cdot10^{-5}n_e^2 + 0,05w_\rho^2$$

де $\vartheta_M$ – швидкість руху коренезбиральної машини, км/год;

$n_ш$ – частота обертання шнека, об/хв;

$n_e$ – частота обертання пружних елементів, об/хв;

$w_\rho$ – вологість грунту, %.

- загальних домішок, маси налиплого грунту та пошкодження коренеплодів відповідно, $ЗД_{цк}$, $НГ_{цк}$, $ПК_{цк}$ під час збирання коренеплодів цикорію причіпною трирядною коренезбиральною машиною, рис. 5.6, рис. 5.14

$$ЗД_{цк} = 20,5 - 5,62\vartheta_M + 0,017n_{ш.к} + 0,89w_\rho + 0,35\cdot10^{-2}\vartheta_M n_{ш.к} + \\ +0,017\vartheta_M w_\rho - 0,11\cdot10^{-2}n_ш w_\rho + 0,42\vartheta_M^2 + 0,2\cdot10^{-3}n_{ш.к}^2 - 0,022w_\rho^2 \quad ; \quad (6.16)$$

$$НГ_{цк} = 21,6 + 0,25\vartheta_M - 0,67\cdot10^{-2}n_{ш.к} - 1,98w_\rho + 0,15\cdot10^{-2}\vartheta_M n_{ш.к} + \\ +0,17\cdot10^{-3}n_ш w_\rho - 0,049\vartheta_M^2 - 0,3\cdot10^{-4}n_{ш.к}^2 + 0,047w_\rho^2 \quad ; \quad (6.17)$$

$$ПК_{цк} = 208,4 - 3,07\vartheta_M - 0,057n_{ш.к} - 18,4w_\rho - 0,4\cdot10^{-2}\vartheta_M n_{ш.к} + \\ +0,82\cdot10^{-2}\vartheta_M w_\rho + 0,33\cdot10^{-2}n_ш w_\rho + 0,37\vartheta_M^2 + 0,11\cdot10^{-3}n_{ш.к}^2 + 0,43w_\rho^2 , \quad (6.18)$$

де $n_{ш.к}$ – частота обертання шнекового конвеєра, об/хв.

Згідно з рівняннями регресії (6.4)-(6.18) побудовано поверхню відгуку функціональної зміни показників якості роботи ОТТМ під час збирання:

- коренеплодів кормових і цукрових буряків з шнеками круглого перерізу та еліпсними шнеками залежно від зміни швидкості руху машини $\vartheta_M$, частоти обертання шнека $n_ш$, частоти обертання пружних елементів $n_e$ та вологості грунту $w_\rho$;

- коренеплодів цикорію від зміни швидкості руху машини $\vartheta_M$, частоти обертання шнекового конвеєра $n_{ш.к}$ та вологості грунту $w_\rho$.

При цьому:

- загальних домішок як функція: кормові буряки $ЗД_{кк} = f_{ЗД}(\vartheta_M; n_ш)$, $ЗД_{ек} = f_{ЗД}(\vartheta_M; n_ш)$; цукрові буряки $ЗД_{кц} = f_{ЗД}(\vartheta_M; n_ш)$, $ЗД_{ец} = f_{ЗД}(\vartheta_M; n_ш)$; коренеплоди цикорію $ЗД_{цк} = f_{ЗД}(\vartheta_M; n_{ш.к})$, рис. 6.10; кормові буряки $ЗД_{кк} = f_{ЗД}(n_ш; w_\rho)$, $ЗД_{ек} = f_{ЗД}(n_ш; w_\rho)$; цукрові буряки $ЗД_{кц} = f_{ЗД}(n_ш; w_\rho)$, $ЗД_{ец} = f_{ЗД}(n_ш; w_\rho)$; коренеплоди цикорію $ЗД_{цк} = f_{ЗД}(\vartheta_M; w_\rho)$, рис. 6.11; кормові буряки $ЗД_{кк} = f_{ЗД}(n_e; w_\rho)$, $ЗД_{ек} = f_{ЗД}(n_e; w_\rho)$; цукрові буряки $ЗД_{кц} = f_{ЗД}(n_e; w_\rho)$, $ЗД_{ец} = f_{ЗД}(n_e; w_\rho)$; коренеплоди цикорію $ЗД_{цк} = f_{ЗД}(n_{ш.к}; w_\rho)$, рис. 6.12; кормові буряки $ЗД_{кк} = f_{ЗД}(\vartheta_M; n_e)$, $ЗД_{ек} = f_{ЗД}(\vartheta_M; n_e)$, $ЗД_{кк} = f_{ЗД}(\vartheta_M; w_\rho)$, $ЗД_{ек} = f_{ЗД}(\vartheta_M; w_\rho)$; цукрові буряки $ЗД_{кц} = f_{ЗД}(\vartheta_M; n_e)$, $ЗД_{ец} = f_{ЗД}(\vartheta_M; n_e)$, додаток Ж.13.2; кормові буряки $ЗД_{кк} = f_{ЗД}(n_ш; n_e)$, $ЗД_{ke} = f_{ЗД}(n_ш; n_e)$; цукрові буряки $ЗД_{кц} = f_{ЗД}(\vartheta_M; w_\rho)$, $ЗД_{ец} = f_{ЗД}(\vartheta_M; w_\rho)$, $ЗД_{кц} = f_{ЗД}(n_ш; n_e)$, $ЗД_{ец} = f_{ЗД}(n_ш; n_e)$, додаток Ж.14.2;

- налиплого грунту на коренеплодах як функція: кормові буряки $НГ_{кк} = f_{НГ}(\vartheta_M; n_ш)$, $НГ_{кк} = f_{НГ}(n_ш; n_ш)$; цукрові буряки $НГ_{кц} = f_{НГ}(\vartheta_M; n_ш)$, $НГ_{кц} = f_{НГ}(n_ш; n_e)$; коренеплоди цикорію $НГ_{цк} = f_{НГ}(\vartheta_M; n_{ш.к})$, рис. 6.13; кормові буряки $НГ_{кк} = f_{НГ}(n_ш; w_\rho)$, $НГ_{ек} = f_{НГ}(n_ш; w_\rho)$; цукрові буряки $НГ_{кц} = f_{НГ}(n_ш; w_\rho)$, $НГ_{ец} = f_{НГ}(n_ш; w_\rho)$; коренеплоди цикорію $НГ_{цк} = f_{НГ}(\vartheta_M; w_\rho)$, рис. 6.14; кормові буряки $НГ_{кк} = f_{НГ}(n_e; w_\rho)$, $НГ_{ек} = f_{НГ}(n_e; w_\rho)$; цукрові буряки $НГ_{кц} = f_{НГ}(n_e; w_\rho)$, $НГ_{ец} = f_{НГ}(n_e; w_\rho)$; коренеплоди цикорію $НГ_{цк} = f_{НГ}(n_{ш.к}; w_\rho)$, рис. 6.15; кормові буряки $НГ_{кк} = f_{НГ}(\vartheta_M; n_e)$,

$НГ_{ек} = f_{НГ}(\vartheta_M; n_е)$, $НГ_{кк} = f_{НГ}(\vartheta_M; w_\rho)$, $НГ_{ек} = f_{НГ}(\vartheta_M; w_\rho)$; цукрові буряки $НГ_{кц} = f_{НГ}(\vartheta_M; n_е)$, $НГ_{ец} = f_{НГ}(\vartheta_M; n_е)$, додаток Ж.15.2; кормові буряки $НГ_{кк} = f_{НГ}(n_ш; n_е)$, $НГ_{ек} = f_{НГ}(n_ш; n_ш)$; цукрові буряки $НГ_{кц} = f_{НГ}(\vartheta_M; w_\rho)$, $НГ_{ец} = f_{НГ}(\vartheta_M; w_\rho)$, $НГ_{кц} = f_{НГ}(n_ш; n_е)$, $НГ_{ец} = f_{НГ}(n_ш; n_ш)$, додаток Ж.16.2

- пошкодження коренеплодів як функція: кормові буряки $ПК_{кк} = f_{ПК}(\vartheta_M; n_ш)$, $ПК_{кк} = f_{ПК}(n_ш; n_ш)$; цукрові буряки $ПК_{кц} = f_{ПК}(\vartheta_M; n_ш)$, $ПК_{кц} = f_{ПК}(n_ш; n_е)$; коренеплоди цикорію $ПК_{цк} = f_{ПК}(\vartheta_M; n_{ш.к})$, рис. 6.16; кормові буряки $ПК_{кк} = f_{ПК}(n_ш; w_\rho)$, $ПК_{ек} = f_{ПК}(n_ш; w_\rho)$; цукрові буряки $ПК_{кц} = f_{ПК}(n_ш; w_\rho)$, $ПК_{ец} = f_{ПК}(n_ш; w_\rho)$; коренеплоди цикорію $ПК_{цк} = f_{ПК}(\vartheta_M; w_\rho)$, рис. 6.17; кормові буряки $ПК_{кк} = f_{ПК}(n_е; w_\rho)$, $ПК_{ек} = f_{ПК}(n_е; w_\rho)$; цукрові буряки $ПК_{кц} = f_{ПК}(n_е; w_\rho)$, $ПК_{ец} = f_{ПК}(n_е; w_\rho)$; коренеплоди цикорію $ПК_{цк} = f_{ПК}(n_{ш.к}; w_\rho)$, рис. 6.18; кормові буряки $ПК_{кк} = f_{ПК}(\vartheta_M; n_е)$, $ПК_{ек} = f_{ПК}(\vartheta_M; n_е)$, $ПК_{кк} = f_{ПК}(\vartheta_M; w_\rho)$, $ПК_{ек} = f_{ПК}(\vartheta_M; w_\rho)$; цукрові буряки $ПК_{кц} = f_{ПК}(\vartheta_M; n_е)$, $ПК_{ец} = f_{ПК}(\vartheta_M; n_е)$, додаток Ж.17.2; кормові буряки $ПК_{кк} = f_{ПК}(n_ш; n_е)$, $ПК_{ек} = f_{ПК}(n_ш; n_ш)$; цукрові буряки $ПК_{кц} = f_{ПК}(\vartheta_M; w_\rho)$, $ПК_{ец} = f_{ПК}(\vartheta_M; w_\rho)$, $ПК_{кц} = f_{ПК}(n_ш; n_е)$, $ПК_{ец} = f_{ПК}(n_ш; n_ш)$, додаток Ж.18.2

На основі аналізу поверхонь відгуку (рис. 6.10–6.18) встановлено, що апроксимовані значення основних показників якості роботи ОТТМ залежно від зміни вхідних факторів в межах (табл. 5.3, табл. 5.4: швидкість руху коренезбиральної машини $5 \le \vartheta_M \le 7$ км/год; частота обертання шнека $100 \le n_ш \le 200$ об/хв; частота обертання очисних пружних елементів $300 \le n_k \le 700$ об/хв; вологість грунту $18 \le w_\rho \le 26$ %; частота обертання шнекового конвеєра $300 \le n_{ш.k} \le 700$ об/хв) під час збирання коренеплодів кормових, цукрових буряків і коренеплодів цикорію змінюються в межах:

- загальні домішки: кормові буряки – від 5,5 до 11,5% (шнеки круглого перерізу) та від 3,5 до 10,5 % (еліпсні шнеки); цукрові буряки – від 5,5 до 12,5% (шнеки круглого перерізу) та від 4,5 до 11,5 % (еліпсні шнеки); коренеплоди цикорію – від 6,5 до 15,5%, рис. 6.10–6.13, додаток Ж.13.2, Ж.14.2;

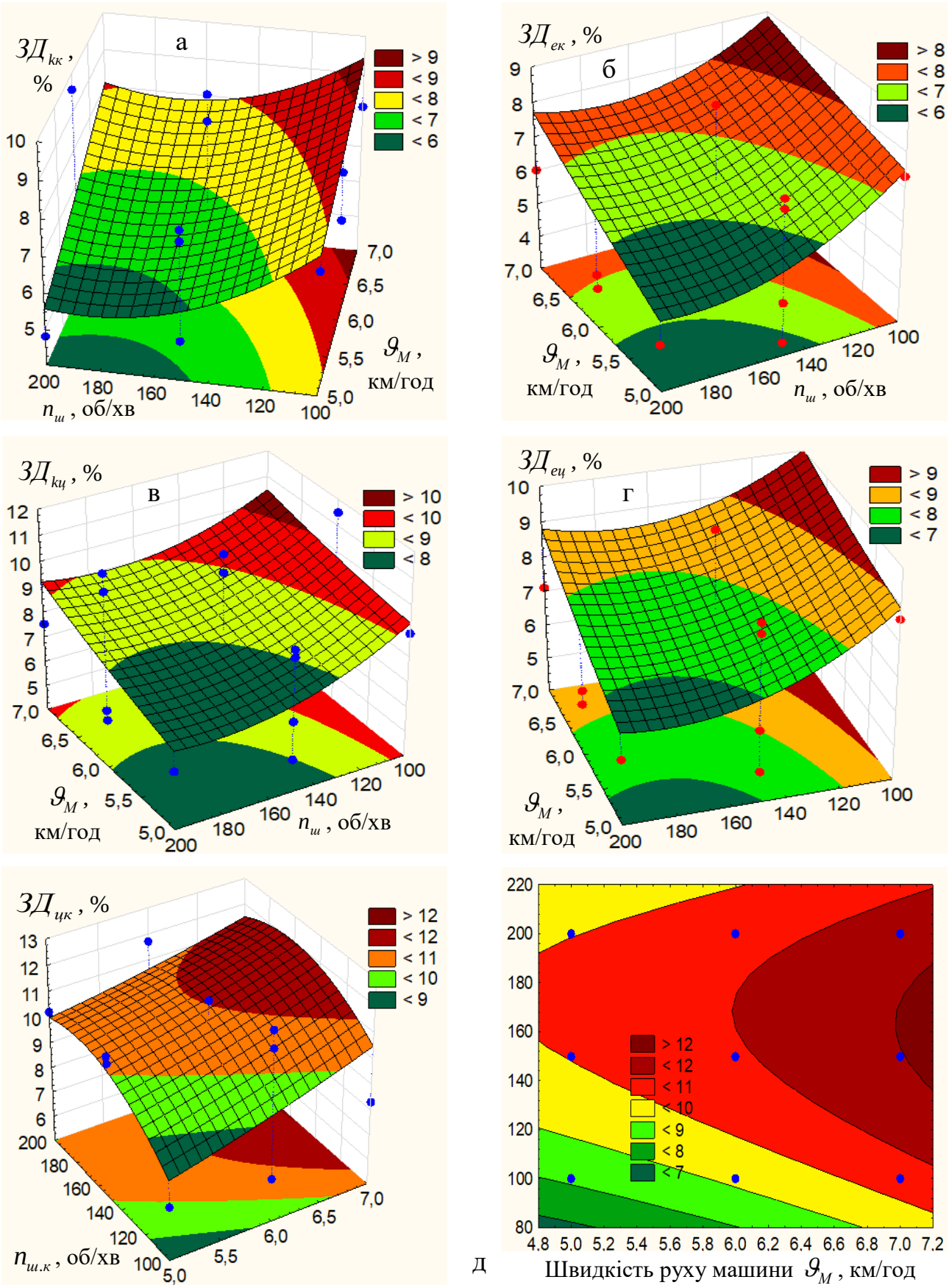



Рисунок 6.11 – Поверхня відгуку загальних домішок як функція: а – $ЗД_{кк} = f_{ЗД}(\vartheta_M; n_ш)$; б – $ЗД_{ек} = f_{ЗД}(\vartheta_M; n_ш)$; в – $ЗД_{кц} = f_{ЗД}(\vartheta_M; n_ш)$; г – $ЗД_{ец} = f_{ЗД}(\vartheta_M; n_ш)$; д – $ЗД_{цк} = f_{ЗД}(\vartheta_M; n_{ш.к})$

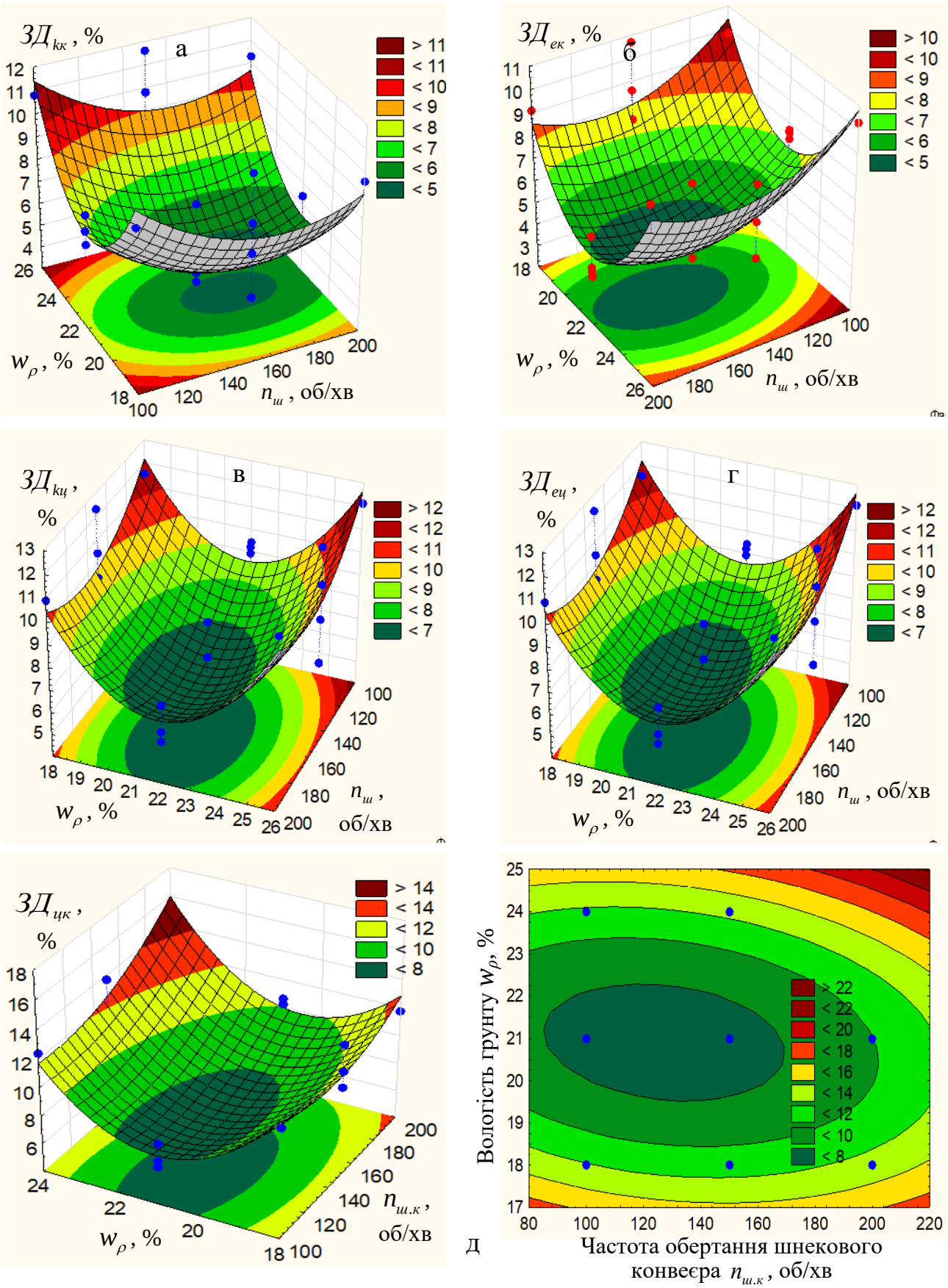



Рисунок 6.12 – Поверхня відгуку загальних домішок як функція: а – $ЗД_{кк} = f_{ЗД}\left(n_ш; w_\rho\right)$; б – $ЗД_{ек} = f_{ЗД}\left(n_ш; w_\rho\right)$; в – $ЗД_{кц} = f_{ЗД}\left(n_ш; w_\rho\right)$; г – $ЗД_{ец} = f_{ЗД}\left(n_ш; w_\rho\right)$; д – $ЗД_{цк} = f_{ЗД}\left(n_{ш.к}; w_\rho\right)$

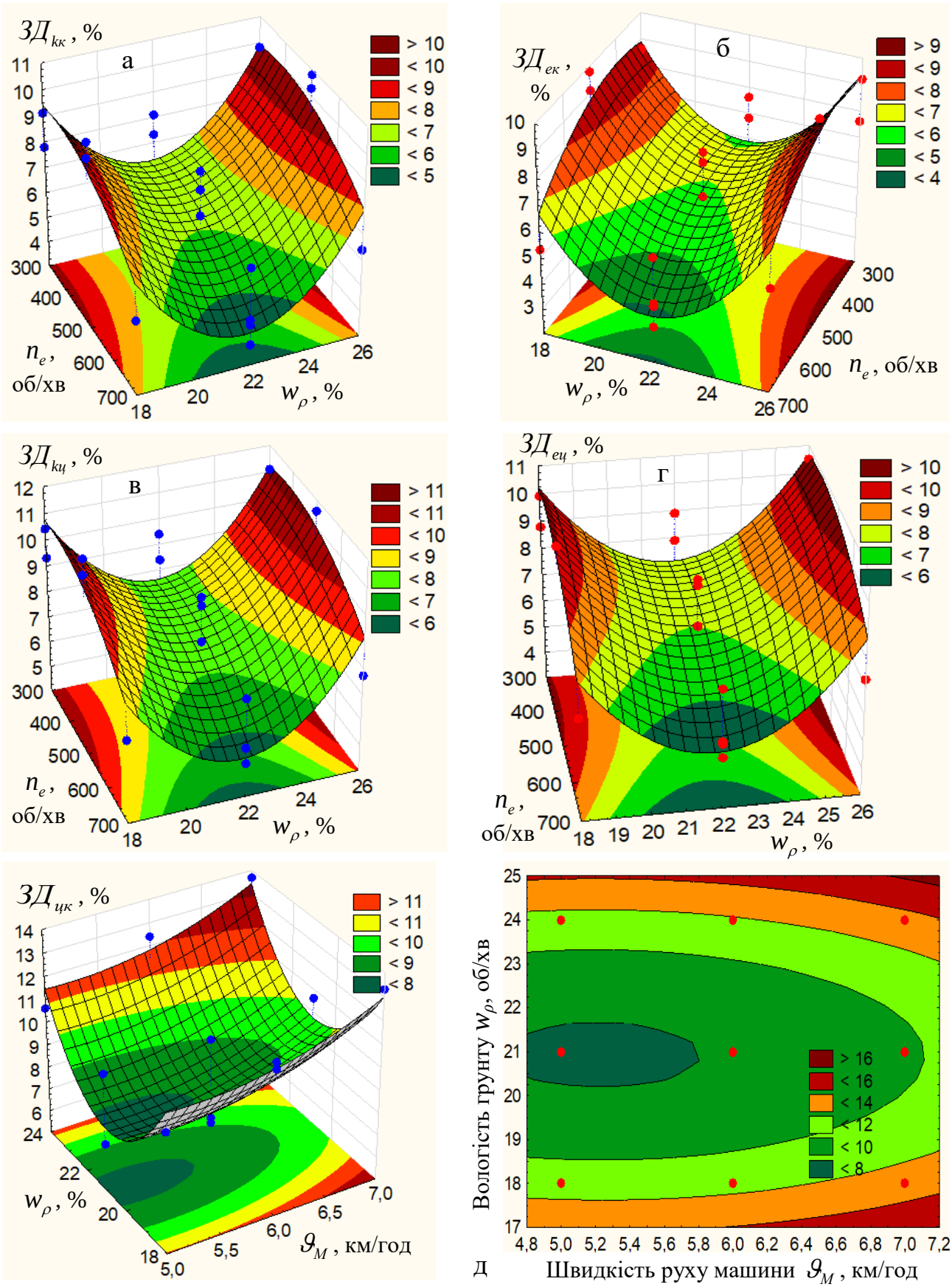



Рисунок 6.13 – Поверхня відгуку загальних домішок як функція: а – $ЗД_{кк} = f_{ЗД}\left(n_e; w_\rho\right)$; б – $ЗД_{ек} = f_{ЗД}\left(n_e; w_\rho\right)$; в – $ЗД_{кц} = f_{ЗД}\left(n_e; w_\rho\right)$; г – $ЗД_{ец} = f_{ЗД}\left(n_e; w_\rho\right)$; д – $ЗД_{цк} = f_{ЗД}\left(\vartheta_M; w_\rho\right)$

- маса налиплого грунту на коренеплодах: 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%, рис. 6.14–6.16, додаток Ж.15.2, Ж.16.2;

- 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%, рис. 6.17 –6.19, додаток Ж.17.2, Ж.18.2.

Адекватність таких положень цілком та повністю підтверджується характером функціональної зміни апроксимованих значень показників якості роботи відповідних ОТТМ коренезбиральних машин (загальних домішок $ЗД_i$, маси налиплого грунту на коренеплодах $НГ_i$, пошкодження коренеплодів $ПК_i$) залежно від зміни основних параметрів їх роботи, як функціональна залежність $ЗД_i = f_{ЗД}(x_i)$, $НГ_i = f_{НГ}(x_i)$, $ПК_i = f_{ПК}(x_i)$, де $x_i$ – відповідний вхідний фактор та які наведено на рис. 6.24-рис. 6.26.

Розсіювання експериментальних даних загальних домішок $ЗД_i$, маси налиплого грунту на коренеплодах $НГ_i$, пошкодження коренеплодів $ПК_i$ як для шнеків круглого перерізу, так і еліпсних шнеків підкоряється диференційному нормальному закону щільності імовірного розподілу за довірчого інтервала 0,95.

Перевірку адекватності нормального закону імовірного розподілу випадкової величини експериментальному масиву даних показників якості роботи ОТТМ (загальних домішок $ЗД_i$, маси налиплого грунту на коренеплодах $НГ_i$, пошкодження коренеплодів $ПК_i$) як для шнеків круглого перерізу, так і еліпсних шнеків реалізували за критерієм відповідності Колмогорова-Смірнова *K(λ)* [324, 325].

При цьому, основний масив довірчого інтервала показників якості роботи ОТТМ коренезбиральних машин знаходиться у такому діапазоні.

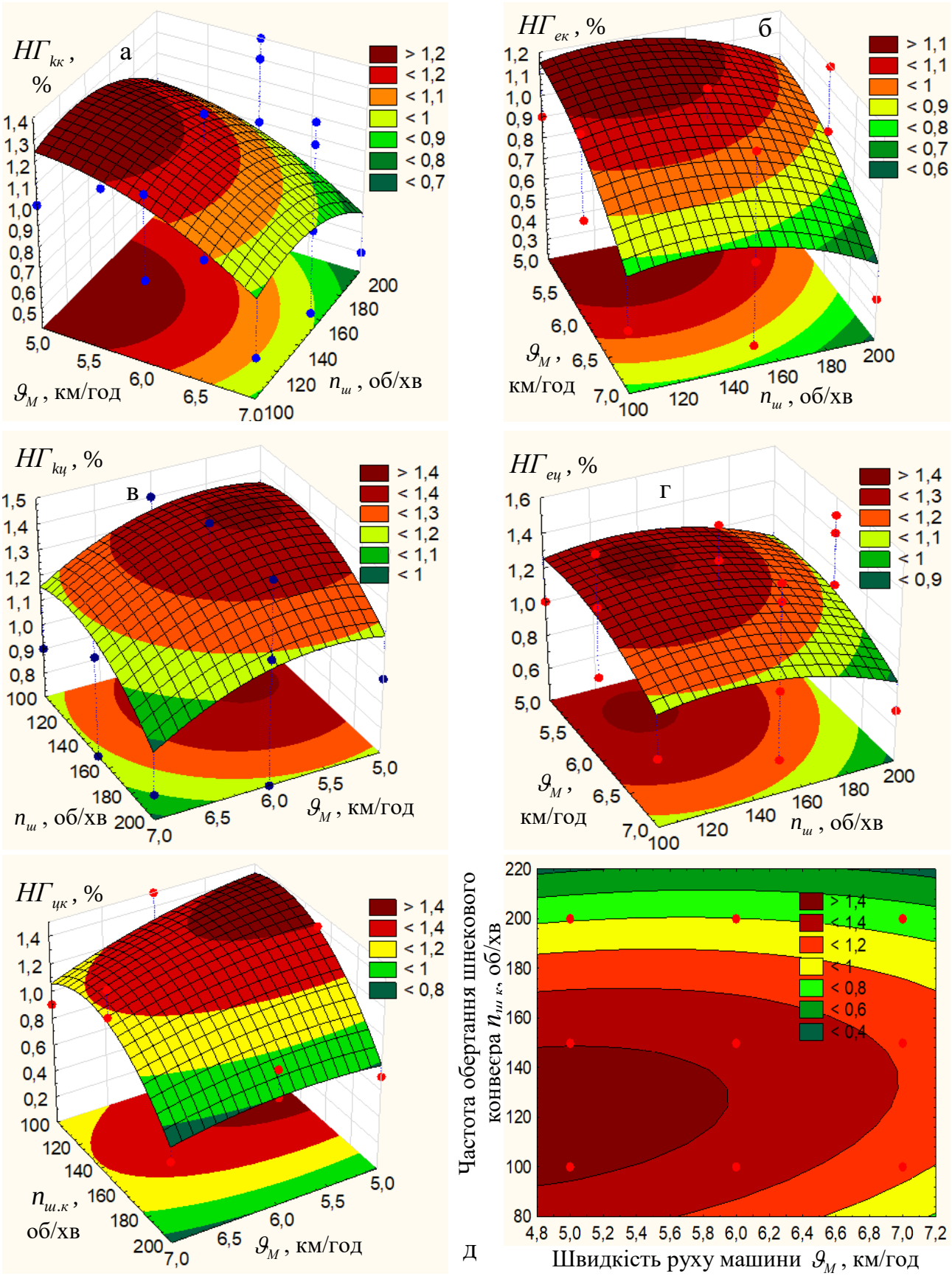



Рисунок 6.14 – Поверхня відгуку налиплого грунту на коренеплодах як функція: а – $НГ_{кк} = f_{НГ}(\vartheta_M; n_ш)$; б – $НГ_{ек} = f_{НГ}(\vartheta_M; n_ш)$; в – $НГ_{кц} = f_{НГ}(\vartheta_M; n_ш)$; г – $НГ_{ец} = f_{НГ}(\vartheta_M; n_ш)$; д – $НГ_{цк} = f_{НГ}(\vartheta_M; n_ш)$

Відносно зміни швидкості руху коренезбиральної машини $\vartheta_M$ як функція $ПЯ_i = f_{ЗД}(\vartheta_M)$, де $ПЯ_i$ – відповідний показник якості:

- загальні домішки $ЗД_i = f_{ЗД}(\vartheta_M)$, додаток Ж.19.2:

- кормові буряки: від 4,0 до 11,0% за швидкості руху коренезбиральної машини у межах 5,7 $\leq \vartheta_M \leq$ 6,4 км/год за кількості випадків рівних 13 (шнеки круглого перерізу); від 3,0 до 10,5% за швидкості руху коренезбиральної машини у межах 5,7 $\leq \vartheta_M \leq$ 6,4 км/год за кількості випадків рівних 14 (еліпсні шнеки);

- цукрові буряки: від 5,5 до 12,0% за швидкості руху коренезбиральної машини у межах 5,7 $\leq \vartheta_M \leq$ 6,4 км/год за кількості випадків рівних 15 (шнеки круглого перерізу); від 5,0 до 11,5% за швидкості руху коренезбиральної машини у межах 5,7 $\leq \vartheta_M \leq$ 6,4 км/год за кількості випадків рівних 13 (еліпсні шнеки);

- коренеплоди цикорію – від 6,5 до 12,5% за швидкості руху коренезбиральної машини у межах 5,7 $\leq \vartheta_M \leq$ 6,4 км/год за кількості випадків рівних 6;

- маса налиплого грунту на коренеплодах $НГ_i = f_{НГ}(\vartheta_M)$, додаток Ж.20.2:

- кормові буряки: від 0,5 до 1,6% за швидкості руху коренезбиральної машини у межах 5,5 $\leq \vartheta_M \leq$ 6,5 км/год за кількості випадків рівних 10 (шнеки круглого перерізу); від 0,4 до 1,5% за швидкості руху коренезбиральної машини у межах 5,5 $\leq \vartheta_M \leq$ 6,5 км/год за кількості випадків рівних 10 (еліпсні шнеки);

- цукрові буряки: від 0,7 до 1,5% за швидкості руху коренезбиральної машини у межах 5,5 $\leq \vartheta_M \leq$ 6,5 км/год за кількості випадків рівних 10 (шнеки круглого перерізу); від 0,6 до 1,7% за швидкості руху коренезбиральної машини у межах 5,5 $\leq \vartheta_M \leq$ 6,5 км/год за кількості випадків рівних 10 (еліпсні шнеки);

- коренеплоди цикорію – від 0,8 до 1,7% за швидкості руху коренезбиральної машини у межах 5,5 $\leq \vartheta_M \leq$ 6,5 км/год за кількості випадків рівних 5.

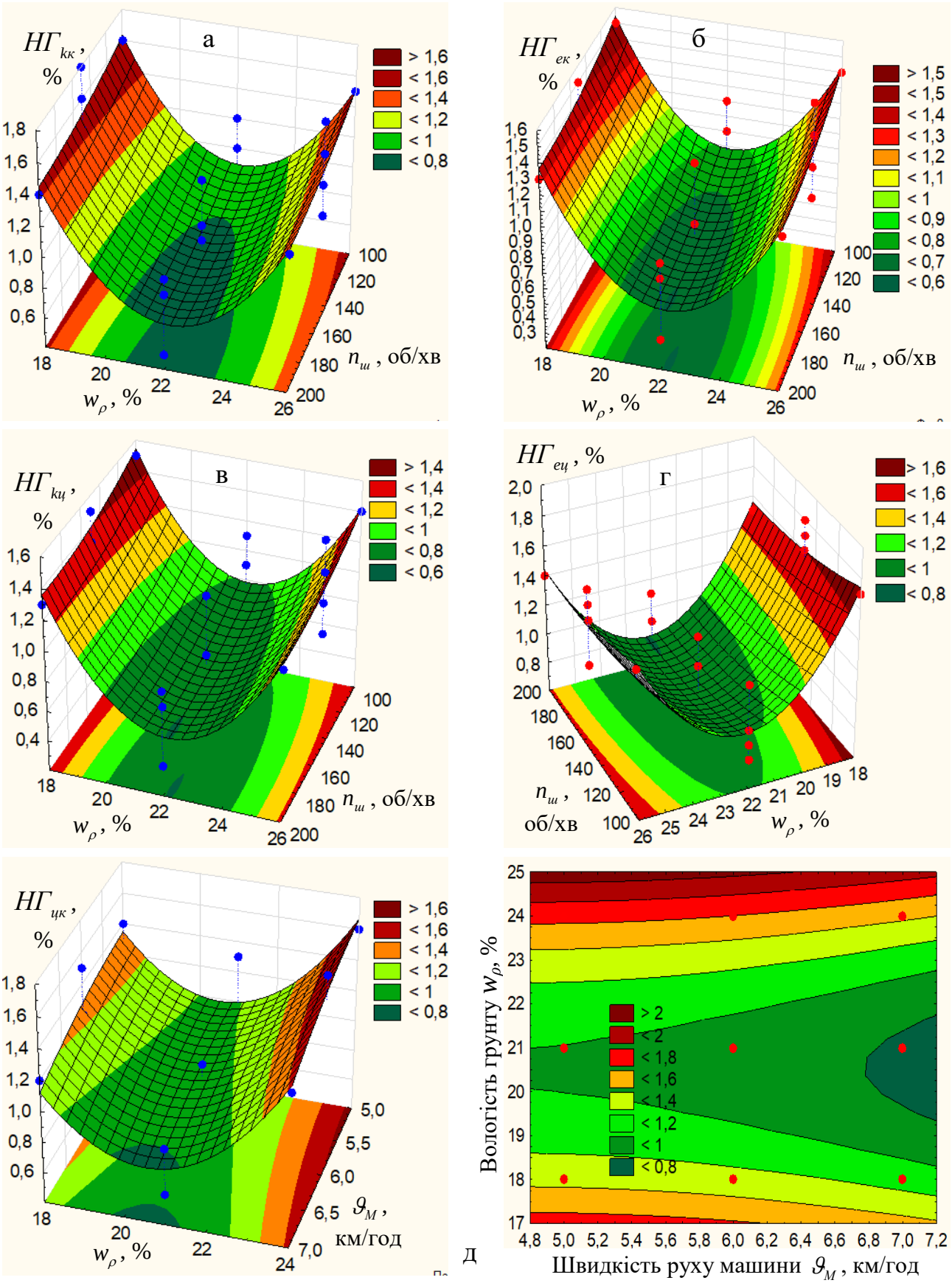



Рисунок 6.15 – Поверхня відгуку налиплого грунту на коренеплодах як функція: а – $НГ_{кк} = f_{НГ}\left(n_ш; w_\rho\right)$; б – $НГ_{ек} = f_{НГ}\left(n_ш; w_\rho\right)$; в – $НГ_{кц} = f_{НГ}\left(n_ш; w_\rho\right)$; г – $НГ_{ец} = f_{НГ}\left(n_ш; w_\rho\right)$; д – $НГ_{цк} = f_{НГ}\left(\vartheta_M; w_\rho\right)$

- пошкодження коренеплодів $ПК_i = f_{ПК}(\vartheta_M)$, додаток Ж.21.2:

- кормові буряки: від 10,0 до 15,0% за швидкості руху коренезбиральної машини у межах 5,5 $\leq \vartheta_M \leq$ 6,5 км/год за кількості випадків рівних 18 (шнеки круглого перерізу); від 12,5 до 17,0% за швидкості руху коренезбиральної машини у межах 5,5 $\leq \vartheta_M \leq$ 6,5 км/год за кількості випадків рівних 21 (еліпсні шнеки);

- цукрові буряки: від 9,5 до 15,5% за швидкості руху коренезбиральної машини у межах 5,5 $\leq \vartheta_M \leq$ 6,5 км/год за кількості випадків рівних 21 (шнеки круглого перерізу); від 11,5 до 17,5% за швидкості руху коренезбиральної машини у межах 5,5 $\leq \vartheta_M \leq$ 6,5 км/год за кількості випадків рівних 21 (еліпсні шнеки);

- коренеплоди цикорію – від 11,5 до 16,0% за швидкості руху коренезбиральної машини у межах 5,5 $\leq \vartheta_M \leq$ 6,5 км/год за кількості випадків рівних 7.

Відносно зміни частоти обертання шнека $n_ш$ як функція $ПЯ_i = f_{ЗД}(n_ш)$ для кормових та цукрових буряків і відносно зміни частоти обертання шнекового конвеєра $n_ш$ як функція $ПЯ_i = f_{ЗД}(n_{ш.к})$ для коренеплодів цикорію:

- загальні домішки $ЗД_i = f_{ЗД}(n_ш)$, $ЗД_i = f_{ЗД}(n_{ш.к})$, додаток Ж.22.2:

- кормові буряки: від 3,5 до 11,5% за частоти обертання шнека у межах 145 $\leq n_ш \leq$ 160 об/хв за кількості випадків рівних 12 (шнеки круглого перерізу); від 3,0 до 11,0% за частоти обертання шнека у межах 145 $\leq n_ш \leq$ 160 об/хв за кількості випадків рівних 13 (еліпсні шнеки);

- цукрові буряки: від 5,0 до 13,0% за частоти обертання шнека у межах 145 $\leq n_ш \leq$ 160 об/хв за кількості випадків рівних 14 (шнеки круглого перерізу); від 4,5 до 12,5% за частоти обертання шнека у межах 140 $\leq n_ш \leq$ 180 об/хв за кількості випадків рівних 14 (еліпсні шнеки);

- коренеплоди цикорію – від 6,5 до 13,5% відносно частоти обертання шнекового конвеєра 145 $\leq n_{ш.к} \leq$ 160 об/хв за кількості випадків рівних 6;

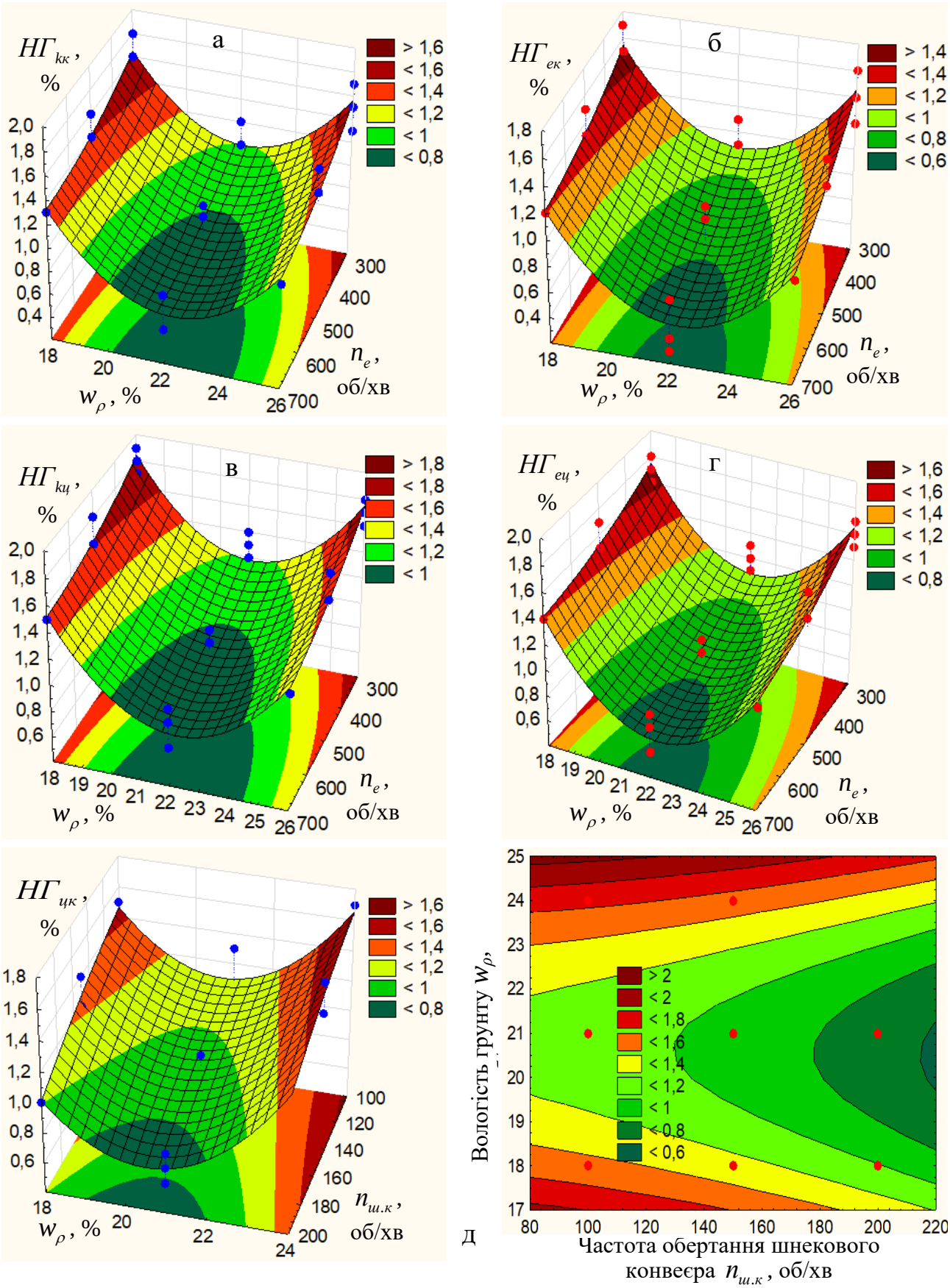



Рисунок 6.16 – Поверхня відгуку маси налиплого грунту на коренеплодах як функція: а – $НГ_{кк} = f_{НГ}\left(n_e; w_\rho\right)$; б – $НГ_{ек} = f_{НГ}\left(n_e; w_\rho\right)$; в – $НГ_{кц} = f_{НГ}\left(n_e; w_\rho\right)$; г – $НГ_{ец} = f_{НГ}\left(n_e; w_\rho\right)$; д – $НГ_{цк} = f_{НГ}\left(n_{ш.к}; w_\rho\right)$

- маса налиплого грунту на коренеплодах $НГ_i = f_{НГ}(n_ш)$, $НГ_i = f_{НГ}(n_{ш.к})$, додаток Ж.23.2:

- кормові буряки: від 0,5 до 1,8% за частоти обертання шнека у межах 140 $\le n_ш \le$ 150 об/хв за кількості випадків рівних 12 (шнеки круглого перерізу); від 0,3 до 1,7% за частоти обертання шнека у межах 140 $\le n_ш \le$ 150 об/хв за кількості випадків рівних 11 (еліпсні шнеки);

- цукрові буряки: від 0,7 до 1,9% за частоти обертання шнека у межах 150 $\le n_ш \le$ 160 об/хв за кількості випадків рівних 10 (шнеки круглого перерізу); від 0,6 до 1,8% за частоти обертання шнека у межах 140 $\le n_ш \le$ 150 об/хв за кількості випадків рівних 10 (еліпсні шнеки);

- коренеплоди цикорію – від 1,0 до 1,6% відносно частоти обертання шнекового конвеєра 145 $\le n_{ш.к} \le$ 160 об/хв за кількості випадків рівних 4;

- пошкодження коренеплодів $ПК_i = f_{ПК}(n_ш)$, $ПК_i = f_{ПК}(n_{ш.к})$, додаток Ж.24.2:

- кормові буряки: від 11,5 до 15,5% за частоти обертання шнека у межах 150 $\le n_ш \le$ 160 об/хв за кількості випадків рівних 10 (шнеки круглого перерізу); від 13,5 до 18,0% за частоти обертання шнека у межах 140 $\le n_ш \le$ 150 об/хв за кількості випадків рівних 11 (еліпсні шнеки);

- цукрові буряки: від 10,0 до 14,0% за частоти обертання шнека у межах 140 $\le n_ш \le$ 150 об/хв за кількості випадків рівних 7 (шнеки круглого перерізу); від 12,5 до 16,5% за частоти обертання шнека у межах 140 $\le n_ш \le$ 150 об/хв за кількості випадків рівних 7 (еліпсні шнеки);

- коренеплоди цикорію – від 12,0 до 14,5% відносно частоти обертання шнекового конвеєра 150 $\le n_{ш.к} \le$ 160 об/хв за кількості випадків рівних 7.

Відносно зміни частоти обертання очисних пружних елементів $n_e$ як функція $ПЯ_i = f_{ЗД}(n_e)$ для кормових і цукрових буряків:

- загальні домішки $ЗД_i = f_{ЗД}(n_e)$, додаток Ж.25.2:

- кормові буряки: від 4,0 до 11,0% за частоти обертання очисних пружних елементів у межах 450 $\le n_e \le$ 500 об/хв за кількості випадків рівних 9 (шнеки круглого перерізу); від 3,5 до 11,5% за частоти обертання очисних пружних елементів у межах 450 $\le n_e \le$ 500 об/хв за кількості випадків рівних 10 (еліпсні шнеки);

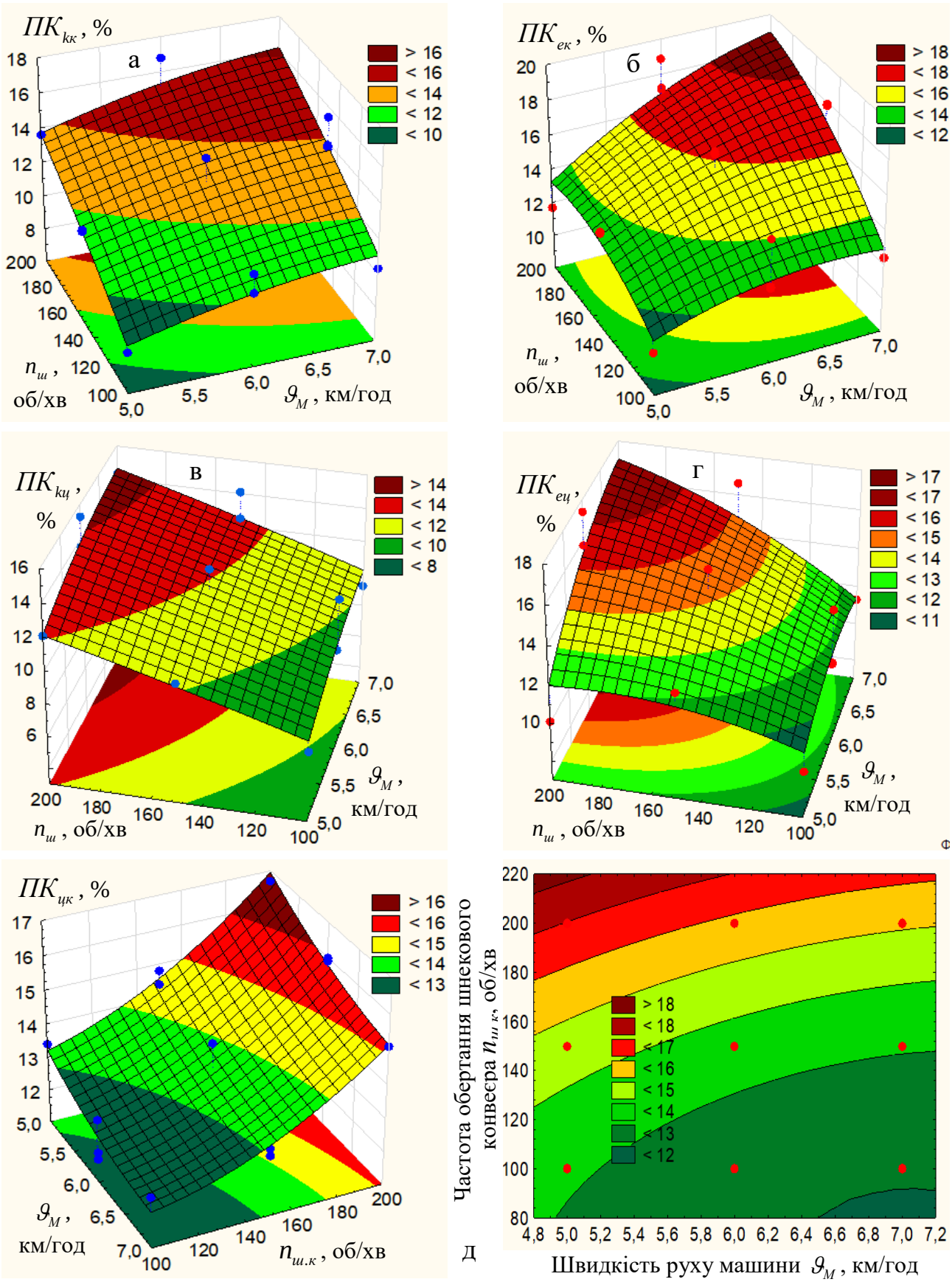



Рисунок 6.17 – Поверхня відгуку пошкодження коренеплодів як функція: а – $ПК_{кк} = f_{ПК}(\vartheta_M; n_ш)$; б – $ПК_{ек} = f_{ПК}(\vartheta_M; n_ш)$; в – $ПК_{кц} = f_{ПК}(\vartheta_M; n_ш)$; г – $ПК_{ец} = f_{ПК}(\vartheta_M; n_ш)$; д – $ПК_{цк} = f_{ПК}(\vartheta_M; n_{ш.к})$

- цукрові буряки: від 5,5 до 12,5% за частоти обертання очисних пружних елементів у межах $450 \le n_e \le 500$ об/хв за кількості випадків рівних 9 (шнеки круглого перерізу); від 5,0 до 11,5% за частоти обертання очисних пружних елементів у межах $450 \le n_e \le 500$ об/хв за кількості випадків рівних 9 (еліпсні шнеки);

- маса налиплого грунту на коренеплодах $НГ_i = f_{НГ}(n_e)$, додаток Ж.26.2:

- кормові буряки: від 0,5 до 1,6% за частоти обертання очисних пружних елементів у межах $450 \le n_e \le 500$ об/хв за кількості випадків рівних 8 (шнеки круглого перерізу); від 0,4 до 1,5 % за частоти обертання очисних пружних елементів у межах $450 \le n_e \le 500$ об/хв за кількості випадків рівних 8 (еліпсні шнеки);

- цукрові буряки: від 0,8 до 1,8% за частоти обертання очисних пружних елементів у межах $450 \le n_e \le 500$ об/хв за кількості випадків рівних 8 (шнеки круглого перерізу); від 0,7 до 1,7% за частоти обертання очисних пружних елементів у межах $450 \le n_e \le 500$ об/хв за кількості випадків рівних 8 (еліпсні шнеки);

- пошкодження коренеплодів $ПК_i = f_{ПК}(n_e)$, додаток Ж.27.2:

- кормові буряки: від 8,5 до 15,0% за частоти обертання шнека у межах $450 \le n_e \le 500$ об/хв за кількості випадків рівних 8 (шнеки круглого перерізу); від 10,5 до 17,0% за частоти обертання шнека у межах $450 \le n_e \le 500$ об/хв за кількості випадків рівних 8 (еліпсні шнеки);

- цукрові буряки: від 7,5 до 15,5% за частоти обертання шнека у межах $450 \le n_e \le 500$ об/хв за кількості випадків рівних 8 (шнеки круглого перерізу); від 9,5 до 17,5% за частоти обертання шнека у межах $450 \le n_e \le 500$ об/хв за кількості випадків рівних 8 (еліпсні шнеки);

Відносно зміни вологості грунту $w_\rho$ як функція $ПЯ_i = f_{ПЯ}(w_\rho)$ для кормових і цукрових буряків та коренеплодів цикорію:

- загальні домішки $ЗД_i = f_{ЗД}(w_\rho)$, додаток Ж.28.2:

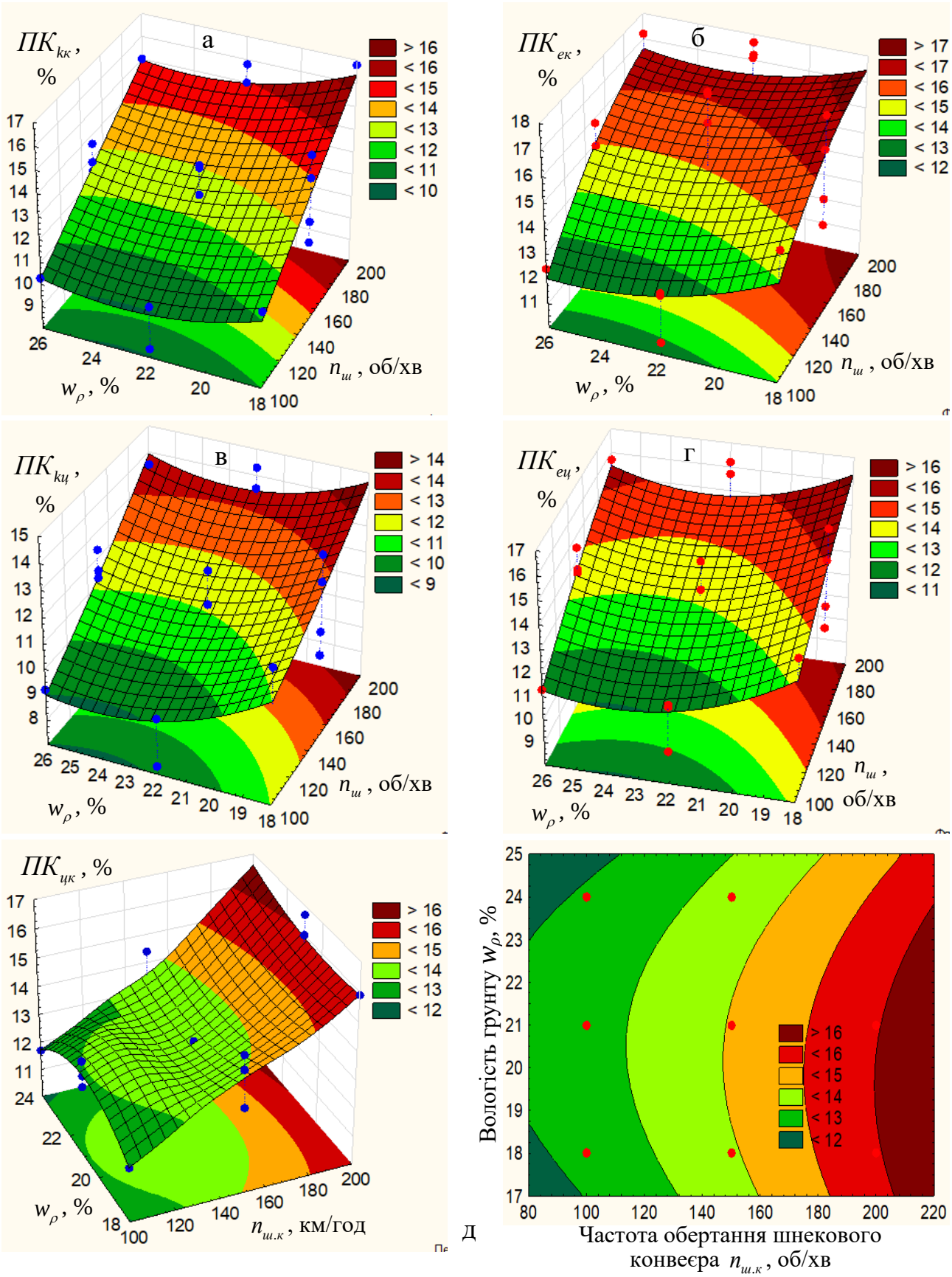



Рисунок 6.18 – Поверхня відгуку пошкодження коренеплодів як функція: а – $ПК_{кк} = f_{ПК}\left(n_ш; w_\rho\right)$; б – $ПК_{ек} = f_{ПК}\left(n_ш; w_\rho\right)$; в – $ПК_{кц} = f_{ПК}\left(n_ш; w_\rho\right)$; г – $ПК_{ец} = f_{ПК}\left(n_ш; w_\rho\right)$; д – $ПК_{цк} = f_{ПК}\left(n_{ш.к}; w_\rho\right)$

- кормові буряки: від 3,5 до 8,0% за вологості грунту у межах $21,5 \le w_\rho \le 22,5$ % за кількості випадків рівних 10 (шнеки круглого перерізу); від 3,0 до 8,0% за вологості грунту у межах $21,5 \le w_\rho \le 22,5$ % за кількості випадків рівних 12 (еліпсні шнеки);

- цукрові буряки: від 5,0 до 9,5% за вологості грунту у межах $21,5 \le w_\rho \le 22,5$ % за кількості випадків рівних 11 (шнеки круглого перерізу); від 4,5 до 9,0% за вологості грунту у межах $21,5 \le w_\rho \le 22,5$ % за кількості випадків рівних 12 (еліпсні шнеки);

- коренеплоди цикорію – від 6,5 до 10,5% за вологості грунту у межах $21,5 \le w_\rho \le 22,5$ % за кількості випадків рівних 6;

- маса налиплого грунту на коренеплодах $НГ_i = f_{НГ}(w_\rho)$, додаток Ж.29.2:

- кормові буряки: від 0,5 до 1,2% за вологості грунту у межах $21,5 \le w_\rho \le 22,5$ % за кількості випадків рівних 17 (шнеки круглого перерізу); від 0,3 до 1,1% за вологості грунту у межах $21,5 \le w_\rho \le 22,5$ % за кількості випадків рівних 18 (еліпсні шнеки);

- цукрові буряки: від 0,7 до 1,4% за вологості грунту у межах $21,5 \le w_\rho \le 22,5$ % за кількості випадків рівних 17 (шнеки круглого перерізу); від 0,6 до 1,3% за вологості грунту у межах $21,5 \le w_\rho \le 22,5$ % за кількості випадків рівних 18 (еліпсні шнеки);

- коренеплоди цикорію – від 0,6 до 1,3% за вологості грунту у межах $21,5 \le w_\rho \le 22,5$ % за кількості випадків рівних 6;

- пошкодження коренеплодів $ПК_i = f_{ПК}(w_\rho)$, додаток Ж.30.2:

- кормові буряки: від 8,5 до 15,5% за вологості грунту у межах $21,5 \le w_\rho \le 22,5$ % за кількості випадків рівних 15 (шнеки круглого перерізу); від 10,5 до 18,0% за вологості грунту у межах $21,5 \le w_\rho \le 22,5$ % за кількості випадків рівних 16 (еліпсні шнеки);

- цукрові буряки: від 7,5 до 14,5% за вологості грунту у межах $21,5 \le w_\rho \le 22,5$ % за кількості випадків рівних 17 (шнеки круглого перерізу); від 9,5 до 16,5% за вологості грунту у межах $21,5 \le w_\rho \le 22,5$ % за кількості випадків рівних 18 (еліпсні шнеки);

- коренеплоди цикорію – від 12,5 до 16,5% за вологості грунту у межах $21,5 \le w_\rho \le 22,5$ % за кількості випадків рівних 7.

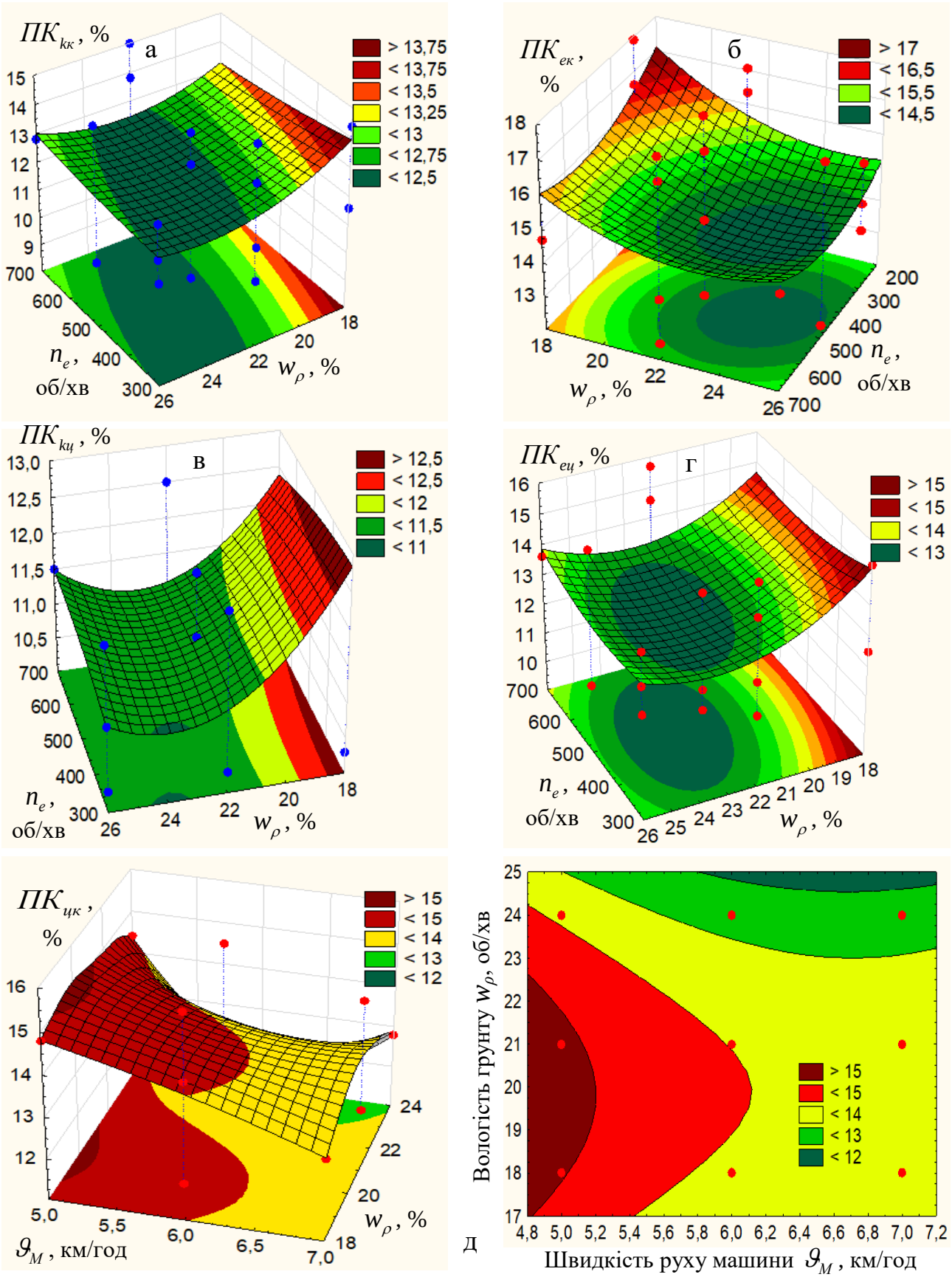



Рисунок 6.19 – Поверхня відгуку пошкодження коренеплодів як функція: а – $ПК_{кк} = f_{ПК}\left(n_e; w_\rho\right)$; б – $ПК_{ек} = f_{ПК}\left(n_e; w_\rho\right)$; в – $ПК_{кц} = f_{ПК}\left(n_e; w_\rho\right)$; г – $ПК_{ец} = f_{ПК}\left(n_e; w_\rho\right)$; д – $ПК_{цк} = f_{ПК}\left(\vartheta_M; w_\rho\right)$

При цьому, характер впливу кожного вхідного фактора (швидкості руху коренезбиральної машини $\vartheta_M$, частоти обертання шнека $n_ш$, частоти обертання очисних пружних елементів, вологості грунту $w_\rho$, частоти обертання шнекового конвеєра $n_{ш.к}$) на функціонального зміну апроксимованого значення параметра оптимізації є наступним.

За збільшення поступальної швидкості руху коренезбиральної машини у межах $5 \le \vartheta_M \le 7$ км/год параметри оптимізації змінюються в таких межах:

- загальні домішки $ЗД_i$ збільшуються за рахунок збільшення секундної подачі вороху копачами: при збиранні коренеплодів кормових буряків: для шнеків круглого перерізу – від 4,5 до 11,5%; для еліпсних шнеків – від 4,0 до 10,5%; при збиранні коренеплодів цукрових буряків: для шнеків круглого перерізу – від 5,0 до 12%; для еліпсних шнеків – від 4,0 до 11%; при збиранні коренеплодів цикорію – від 5,5 до 13,5% (рис. 6.11, 6.20);

- маса налиплого грунту на коренеплодах $НГ_i$ зменшується за рахунок збільшення кінематичної взаємодії робочих органів копача та налиплим грунтом на коренеплодах: при збиранні коренеплодів кормових буряків: для шнеків круглого перерізу – від 1,25 до 0,9%; для еліпсних шнеків – від 0,8 до 1,15%; при збиранні коренеплодів цукрових буряків: для шнеків круглого перерізу – від 1,35 до 0,9%; для еліпсних шнеків – від 1,25 до 0,65%; при збиранні коренеплодів цикорію – від 1,4 до 0,7% (рис. 6.14, 6.21);

- пошкодження коренеплодів $ПК_i$ зростають за рахунок збільшення кінематичної взаємодії робочих органів копача та коренеплодів: при збиранні коренеплодів кормових буряків: для шнеків круглого перерізу – від 8,0 до 16,0%; для еліпсних шнеків – від 9,0 до 19,0%, рис. 6.11; при збиранні коренеплодів цукрових буряків: для шнеків круглого перерізу – від 5,0 до 12%; для еліпсних шнеків – від 4,0 до 11%; при збиранні коренеплодів цикорію – від 11,0 до 17,5% (рис. 6.15, 6.22).

За збільшення частоти обертання шнека у межах $100 \le n_ш \le 200$ об/хв параметри оптимізації змінюються в таких межах:

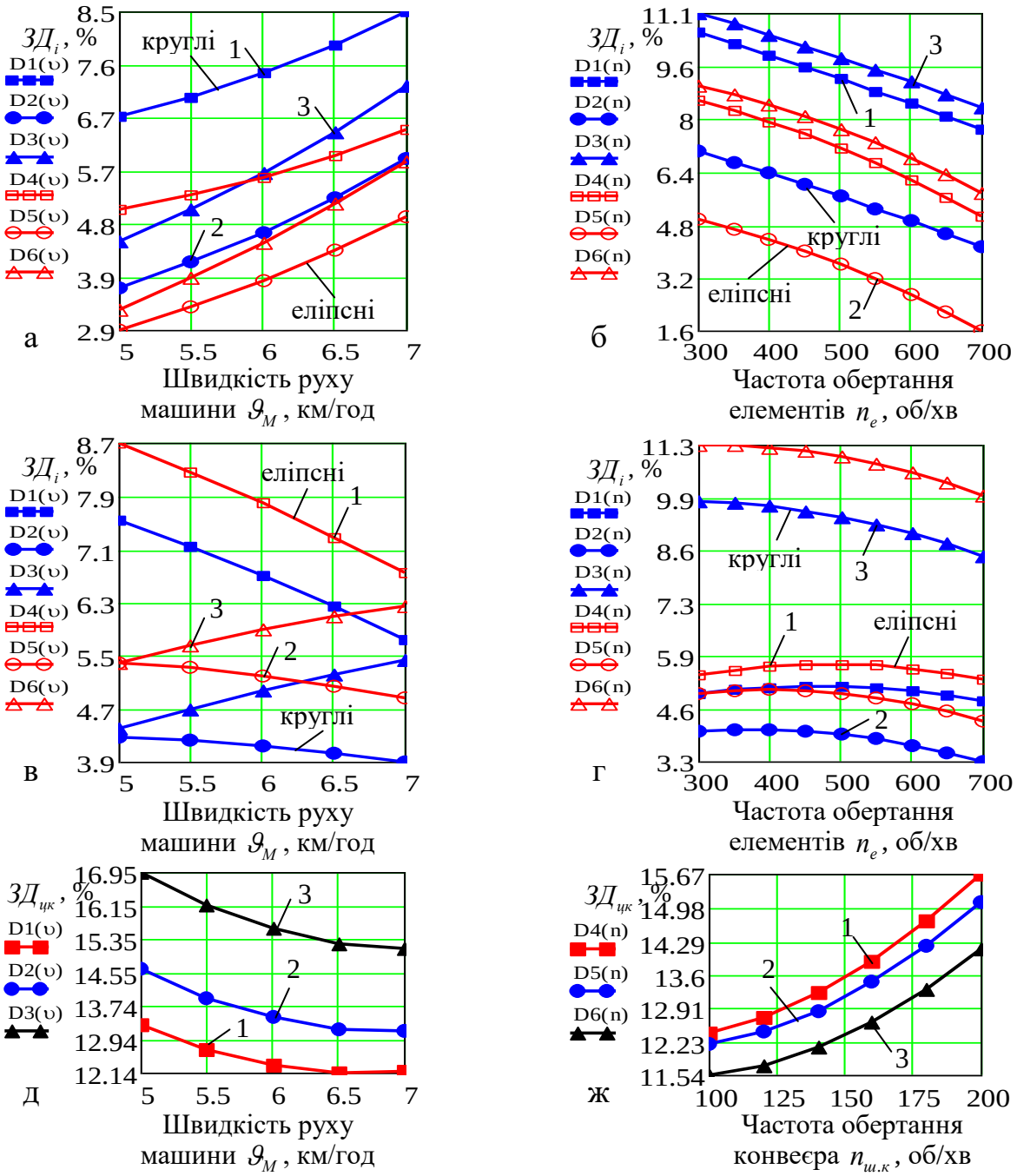



Рисунок 6.20 – Залежності зміни загальних домішок: а – кормові буряки: як функція $ЗД_{кк} = f_{ЗД}(\vartheta_M)$, $ЗД_{ек} = f_{ЗД}(\vartheta_M)$, 1, 2, 3 – $n_ш$ = 100, 150, 200 об/хв, $n_e$ = 500 об/хв, $w_\rho$ = 22 %; б – кормові буряки як функція $ЗД_{кк} = f_{ЗД}(n_e)$, $ЗД_{ек} = f_{ЗД}(n_e)$, 1, 2, 3 – $w_\rho$ = 18, 22, 26 %, $n_ш$ = 150 об/хв, $\vartheta_M$ = 7 км/год; в – цукрові буряки: як функція $ЗД_{кц} = f_{ЗД}(\vartheta_M)$, $ЗД_{ец} = f_{ЗД}(\vartheta_M)$, 1, 2, 3 – $n_ш$ = 100, 150, 200 об/хв, $n_e$ = 500 об/хв, $w_\rho$ = 22 %; г – цукрові буряки як функція $ЗД_{кц} = f_{ЗД}(n_e)$, $ЗД_{ец} = f_{ЗД}(n_e)$, 1, 2, 3 – $w_\rho$ = 18, 22, 26 %, $n_ш$ = 150 об/хв, $\vartheta_M$ = 7 км/год; д – коренеплоди цикорію як функція $ЗД_{кц} = f_{ЗД}(\vartheta_M)$, 1, 2, 3 – $n_ш$ = 100, 150, 200 об/хв, $w_\rho$ = 21 %; ж – коренеплоди цикорію як функція $ЗД_{цк} = f_{ЗД}(n_{ш.к})$, 1, 2, 3 – $w_\rho$ = 18, 21, 24 %, $\vartheta_M$ = 7 км/год

- загальні домішки $ЗД_i$ зменшуються за рахунок збільшення ефективності інтенсифікації взаємодії робочих поверхонь шнека (шнекового конвеєра) та складових компонентів домішок: при збиранні коренеплодів кормових буряків: для шнеків круглого перерізу – від 9,5 до 6,5%; для еліпсних шнеків – від 9,0 до 5,0%; при збиранні коренеплодів цукрових буряків: для шнеків круглого перерізу – від 10,5 до 7,0%; для еліпсних шнеків – від 10,0 до 6,0%; при збиранні коренеплодів цикорію – від 11,5 до 8,5% (рис. 6.11, 6.20);

- маса налиплого грунту на коренеплодах $НГ_i$ в загальному випадку зменшується за рахунок збільшення ефективності інтенсифікації взаємодії робочих поверхонь шнека (шнекового конвеєра) та налиплого грунту на коренеплодах: при збиранні коренеплодів кормових буряків: для шнеків круглого перерізу – від 1,3 до 0,7%; для еліпсних шнеків – від 1,3 до 0,6%; при збиранні коренеплодів цукрових буряків: для шнеків круглого перерізу – від 1,3 до 1,0%; для еліпсних шнеків – від 1,2 до 0,9%; при збиранні коренеплодів цикорію – від 1,4 до 0,7% (рис. 6.12, 6.21).

- пошкодження коренеплодів $ПК_i$ зростають за рахунок збільшення динамічної взаємодії робочих поверхонь шнека та тіла коренеплодів: при збиранні коренеплодів кормових буряків: для шнеків круглого перерізу – від 8,0 до 14,0%; для еліпсних шнеків – від 10,0 до 17,0%; при збиранні коренеплодів цукрових буряків: для шнеків круглого перерізу – від 9,0 до 16,0%; для еліпсних шнеків – від 12,0 до 19,0% (рис. 6.13, 6.22).

За збільшення частоти обертання очисних пружних елементів в межах $300 \le n_e \le 700$ об/хв параметри оптимізації змінюються в таких межах:

- загальні домішки $ЗД_i$ зменшуються за рахунок збільшення динамічної взаємодії робочих поверхонь очисних пружних елементів і складових компонентів вільних і зв’язаних домішок: при збиранні коренеплодів кормових буряків: для шнеків круглого перерізу – від 9,5 до 5,5%; для еліпсних шнеків – від 9,0 до 4,5%; при збиранні коренеплодів цукрових буряків: для шнеків круглого перерізу – від 10,5 до 6,5%; для еліпсних шнеків – від 10,0 до 5,5%; (рис. 6.12, 6.20);

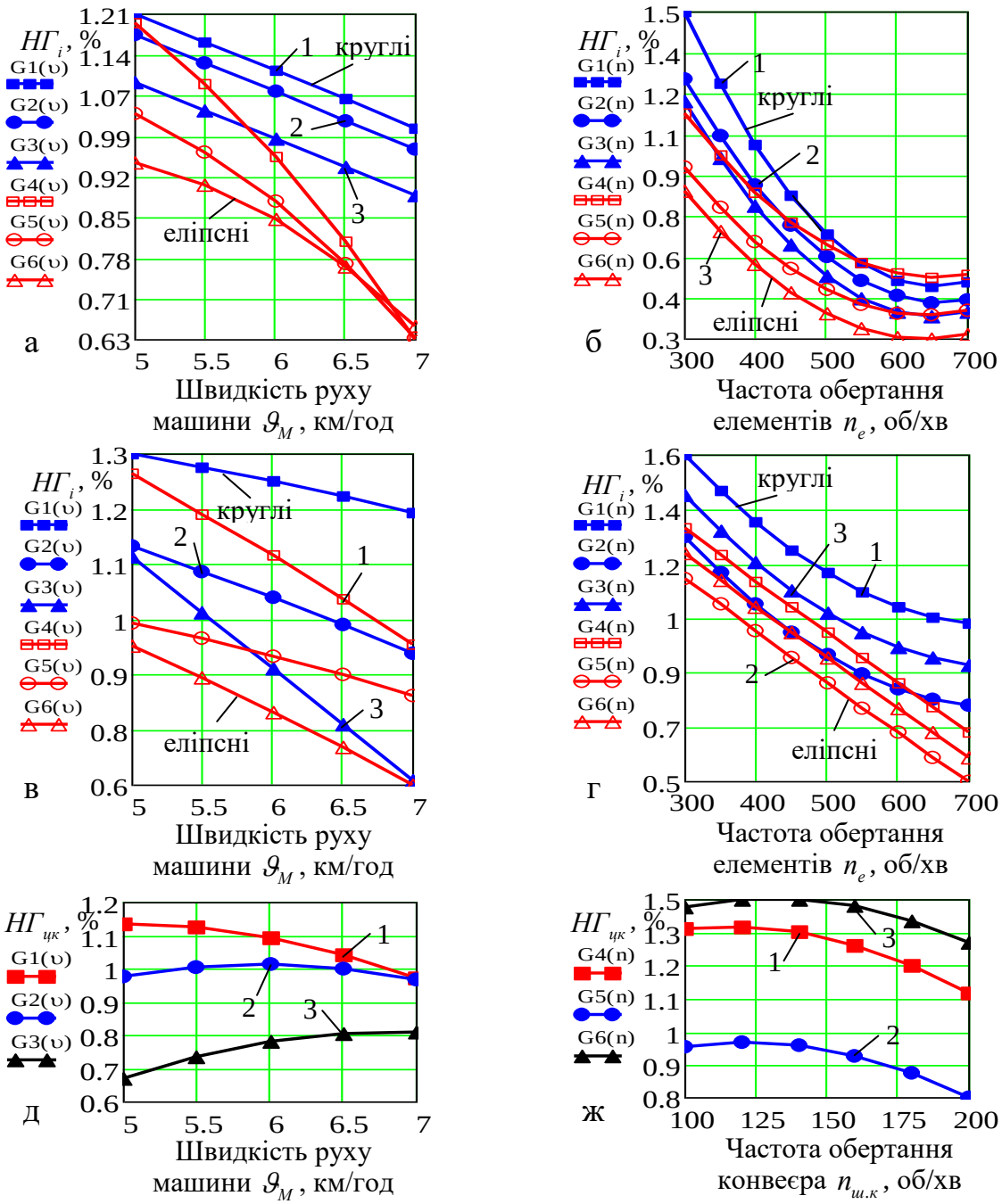



Рисунок 6.21 – Залежності зміни маси налиплого грунту: а – кормові буряки: як функція $НГ_{кк} = f_{НГ}(\vartheta_M)$, $НГ_{ек} = f_{НГ}(\vartheta_M)$, 1, 2, 3 – $n_ш$ = 100, 150, 200 об/хв, $n_e$ = 500 об/хв, $w_\rho$ = 22 %; б – кормові буряки як функція $НГ_{кк} = f_{НГ}(n_e)$, $НГ_{ек} = f_{НГ}(n_e)$, 1, 2, 3 – $w_\rho$ = 18, 22, 26 %, $n_ш$ = 150 об/хв, $\vartheta_M$ = 7 км/год; в – цукрові буряки: як функція $НГ_{кц} = f_{НГ}(\vartheta_M)$, $НГ_{ец} = f_{НГ}(\vartheta_M)$, 1, 2, 3 – $n_ш$ = 100, 150, 200 об/хв, $n_e$ = 500 об/хв, $w_\rho$ = 22 %; г – цукрові буряки як функція $НГ_{кц} = f_{НГ}(n_e)$, $НГ_{ец} = f_{НГ}(n_e)$, 1, 2, 3 – $w_\rho$ = 18, 22, 26 %, $n_ш$ = 150 об/хв, $\vartheta_M$ = 7 км/год; д – коренеплоди цикорію як функція $НГ_{кц} = f_{НГ}(\vartheta_M)$, 1, 2, 3 – $n_ш$ = 100, 150, 200 об/хв, $w_\rho$ = 21 %; ж – коренеплоди цикорію як функція $НГ_{цк} = f_{НГ}(n_{ш.к})$, 1, 2, 3 – $w_\rho$ = 18, 21, 24 %, $\vartheta_M$ = 7 км/год

- маса налиплого грунту на коренеплодах $НГ_i$ зменшується за рахунок збільшення динамічної взаємодії робочих поверхонь очисних пружних елементів і налиплого грунту на коренеплодах: при збиранні коренеплодів кормових буряків: для шнеків круглого перерізу – від 1,9 до 0,6%; для еліпсних шнеків – від 1,4 до 0,4%; при збиранні коренеплодів цукрових буряків: для шнеків круглого перерізу – від 1,4 до 0,8%; для еліпсних шнеків – від 1,5 до 0,7% (рис. 6.14, 6.21);

- пошкодження коренеплодів $ПК_i$ в загальному випадку майже не змінюються: при збиранні коренеплодів кормових буряків: для шнеків круглого перерізу – в середньому становлять від 11,0% до 12,0%; для еліпсних шнеків – в середньому становлять від 16,0% до 17,0%; при збиранні коренеплодів цукрових буряків: для шнеків круглого перерізу – в середньому становлять від 13,0 до 14,0%; для еліпсних шнеків – від 14,0 до 15,0% (рис. 6.17, 6.22).

За збільшення вологості грунту у межах $18 \le w_\rho \le 26$ % (кормові та цукрові буряки) та у межах $18 \le w_\rho \le 24$ % (коренеплоди цикорію) параметри оптимізації змінюються в таких межах:

- загальні домішки $ЗД_i$ в межах збільшення вологості грунту $w_\rho$ від 18 до 22% (кормові та цукрові буряки) та від 18 до 21 % (коренеплоди цикорію) зменшуються за рахунок зменшення твердості грунтових домішок, а потім в межах збільшення вологості грунту $w_\rho$ від 22 до 26% (кормові та цукрові буряки) та від 21 до 24% (коренеплоди цикорію) збільшуються за рахунок збільшення липкості грунтових домішок: при збиранні коренеплодів кормових буряків: для шнеків круглого перерізу – відповідно, зменшуються від 11,5 до 7,5% і збільшуються від 7,5 до 11,0%; для еліпсних шнеків – відповідно, зменшуються від 9,0 до 5,5,0% і збільшуються від 5,5 до 11,5; при збиранні коренеплодів цукрових буряків: для шнеків круглого перерізу – відповідно, зменшуються від 11,0 до 8,5% і збільшуються від 8,5 до 11,0; для еліпсних шнеків – від 11,0 до 8,5% і від 8,5 до 11,5; при збирання коренеплодів цикорію – відповідно, зменшуються від 1,6 до 1,0% і збільшуються від 1,0 до 1,5% (рис. 6.11, 6.23, 6.26);

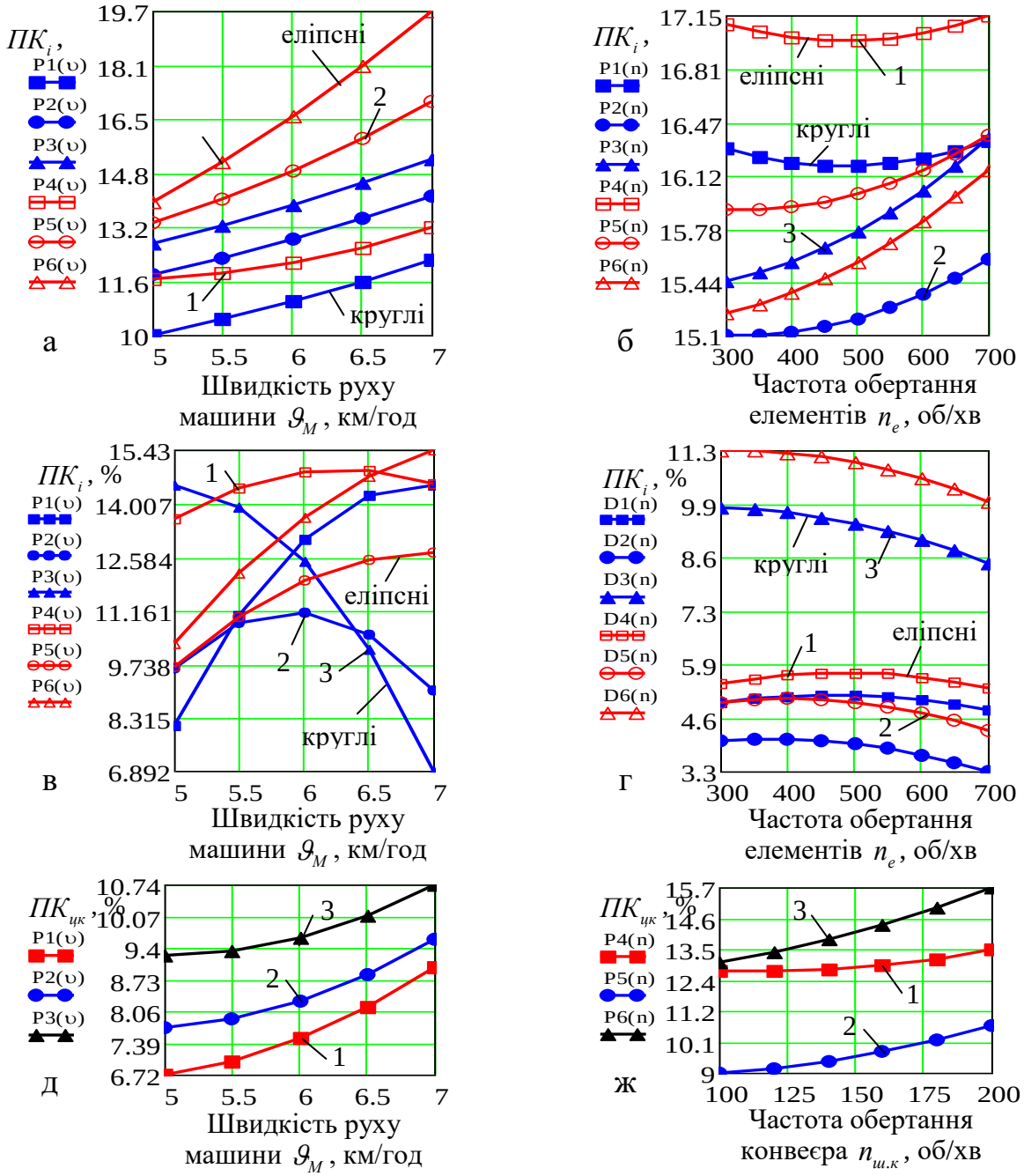



Рисунок 6.22 – Залежності зміни пошкодження коренеплодів: а – кормові буряки: як функція $ПК_{кк} = f_{ПК}(\vartheta_M)$, $ПК_{ек} = f_{ПК}(\vartheta_M)$, 1, 2, 3 – $n_ш$ = 100, 150, 200 об/хв, $n_e$ = 500 об/хв, $w_\rho$ = 22 %; б – кормові буряки як функція $ПК_{кк} = f_{ПК}(n_e)$, $ПК_{ек} = f_{ПК}(n_e)$, 1, 2, 3 – $w_\rho$ = 18, 22, 26 %, $n_ш$ = 150 об/хв, $\vartheta_M$ = 7 км/год; в – цукрові буряки: як функція $ПК_{кц} = f_{ПК}(\vartheta_M)$, $ПК_{ец} = f_{ПК}(\vartheta_M)$, 1, 2, 3 – $n_ш$ = 100, 150, 200 об/хв, $n_e$ = 500 об/хв, $w_\rho$ = 22 %; г – цукрові буряки як функція $ПК_{кц} = f_{ПК}(n_e)$, $НГ_{ец} = f_{НГ}(n_e)$, 1, 2, 3 – $w_\rho$ = 18, 22, 26 %, $n_ш$ = 150 об/хв, $\vartheta_M$ = 7 км/год; д – коренеплоди цикорію як функція $ПК_{кц} = f_{ПК}(\vartheta_M)$, 1, 2, 3 – $n_ш$ = 100, 150, 200 об/хв, $w_\rho$ = 21 %; ж – коренеплоди цикорію як функція $ПК_{цк} = f_{ПК}(n_{ш.к})$, 1, 2, 3 – $w_\rho$ = 18, 21, 24 %, $\vartheta_M$ = 7 км/год

- маса налиплого грунту на коренеплодах $НГ_i$ в межах збільшення вологості грунту $w_\rho$ від 18 до 22% (кормові та цукрові буряки) і від 18 до 21% (коренеплоди цикорію) зменшуються за рахунок зменшення твердості налиплого грунту, а потім в межах збільшення вологості грунту $w_\rho$ від 22 до 26% (кормові та цукрові буряки) і від 21 до 24% збільшуються за рахунок збільшення липкості налиплого грунту домішок: при збиранні коренеплодів кормових буряків: для шнеків круглого перерізу – відповідно, зменшуються від 1,8 до 0,4% та збільшуються від 0,4 до 2,1; для еліпсних шнеків – відповідно, зменшуються від 1,6 до 0,4% та збільшуються від 0,4 до 2,0; при збиранні коренеплодів цукрових буряків: для шнеків круглого перерізу – відповідно, зменшуються від 1,7 до 1,0% та збільшуються від 1,0 до 1,7%; для еліпсних шнеків – відповідно, зменшуються від 1,5 до 1,0% та збільшуються від 1,0 до 1,6%; при збиранні коренеплодів цикорію – відповідно, зменшуються від 1,1 до 0,8% та збільшуються від 0,8 до 1,7% (рис. 6.14, 6.24, 6.28);

- пошкодження коренеплодів $ПК_i$ в загальному випадку майже не змінюються: при збиранні коренеплодів кормових буряків: для шнеків круглого перерізу – в середньому максимальні значення становлять від 12,0% до 13,0%; для еліпсних шнеків – в середньому максимальні значення становлять від 16,0% до 17,0%; при збиранні коренеплодів цукрових буряків: для шнеків круглого перерізу – в середньому максимальні значення становлять від 12,0 до 13,0%; для еліпсних шнеків – в середньому максимальні значення становлять від 13,0 до 15,0%; при збиранні коренеплодів цикорію – в середньому максимальні значення становлять від 15 до 16% (рис. 6.17, 6.25, 6.29).

На основі аналізу графічної інтерпретації або графічних 2D і 3D моделей (рис. 6.15-рис. 6.29) можна констатувати, що найбільший вплив на функціональну зміну параметрів оптимізації (показників якості роботи ОТТМ $ЗД_i$, $НГ_i$, $ПК_i$), або домінантними факторами, зміна яких призводить до суттєвої зміни (збільшення або зменшення) апроксимованих значень показників якості роботи ОТТМ коренезбиральних машин, є наступними:

1. Загальні домішки $ЗД_i$.

Коренеплоди кормових і цукрових буряків для шнеків круглого перерізу та еліпсних шнеків:

- швидкість руху машини $\vartheta_M$ – за збільшення $\vartheta_M$ у межах варіювання фактора (1 км/год) загальні домішки збільшуються в 1,2…1,3 рази;

- частота обертання шнека $n_ш$ – за збільшення $n_ш$ у межах варіювання фактора (50 об/хв) загальні домішки зменшуються в середньому в 1,2…1,3 рази.

Коренеплоди цикорію:

- за збільшення $\vartheta_M$ у межах варіювання фактора (1 км/год) загальні домішки збільшуються в 1,3…1,4 рази;

- частота обертання шнекового конвеєра $n_{ш.к}$ – за збільшення $n_{ш.к}$ у межах варіювання фактора (50 об/хв) загальні домішки збільшуються у середньому в 1,2…1,3 раза за рахунок збільшення швидкості осьового переміщення компонентів домішок витками шнекового конвеєра в сторону вивантаження вороху (до очисної гірки);

2. Маса налиплого грунту $НГ_i$ на коренеплодах.

Коренеплоди кормових і цукрових буряків для шнеків круглого перерізу та еліпсних шнеків:

- частота обертання шнека $n_ш$ – за збільшення $n_ш$ у межах варіювання фактора (50 об/хв) маса налиплого грунту зменшується у середньому в 1,2…1,3 раза;

- за збільшення частоти обертання очисних пружних елементів $n_e$ маса налиплого грунту зменшується у середньому в 2,2…2,4 раза.

Коренеплоди цикорію:

- частота обертання шнекового конвеєра $n_{ш.к}$ – за збільшення $n_{ш.к}$ у межах варіювання фактора (50 об/хв) маса налиплого грунту зменшується у середньому в 1,2…1,3 раза;

2. Пошкодження коренеплодів $ПК_i$:

Коренеплоди кормових і цукрових буряків для шнеків круглого перерізу та еліпсних шнеків:

- частота обертання шнека $n_ш$ – за збільшення $n_ш$ у межах варіювання фактора (50 об/хв) пошкодження коренеплодів кормових і цукрових буряків збільшуються у середньому в 1,2…1,4 раза;

- коренеплоди цикорію: частота обертання шнекового конвеєра $n_{ш.к}$ – за збільшення $n_{ш.к}$ в межах варіювання фактора (50 об/хв) пошкодження коренеплодів цикорію збільшуються в середньому в 1,3…1,4 раза.

Вплив зміни вологості грунту $w_ρ$ у межах покрокового інтервала варіювання фактора (4% для кормових і цукрових буряків та 3% для коренеплодів цикорію) на функціональну зміну апроксимованих значень параметрів оптимізації, або показників якості роботи ОТТМ як для шнеків круглого перерізу, так і для еліпсних шнеків має двоякий характер.

При цьому:

1. Загальні домішки $ЗД_i$, рис. 6.23:

- за збільшення покрокового інтервала варіювання вологості грунту $w_ρ$, на 4% до межі середнього (нульового) рівня варіювання фактора до 22% загальні домішки зменшуються в середньому на 3,5…4,0% (кормові та цукрові буряки) за рахунок зменшення твердості грунтових домішок і відповідно, збільшення кількості руйнувань грудок грунту та зменшення їх розмірних параметрів і, відповідно, підвищення інтенсивності просіювання грунтових домішок через зазори робочих органів ОТТМ;

- за подальшого збільшення покрокового інтервала варіювання вологості грунту $w_ρ$, на 4 % до верхнього рівня варіювання фактора до 26% загальні домішки збільшуються в середньому на 3,5…4,0% (кормові та цукрові буряки) за рахунок значного збільшення липкості грунтових домішок, що призводить до налипання грунту на поверхні робочих органів ОТТМ і відповідно, значного зменшення інтенсивності просіювання грунтових домішок через зазори робочих органів ОТТМ;

- збільшення покрокового інтервала варіювання вологості грунту $w_ρ$, на 3% до верхньої межі рівня варіювання фактора (до 24%) призводить до незначного зменшення (на 0,3…0,4%) загальних домішок для коренеплодів цикорію.

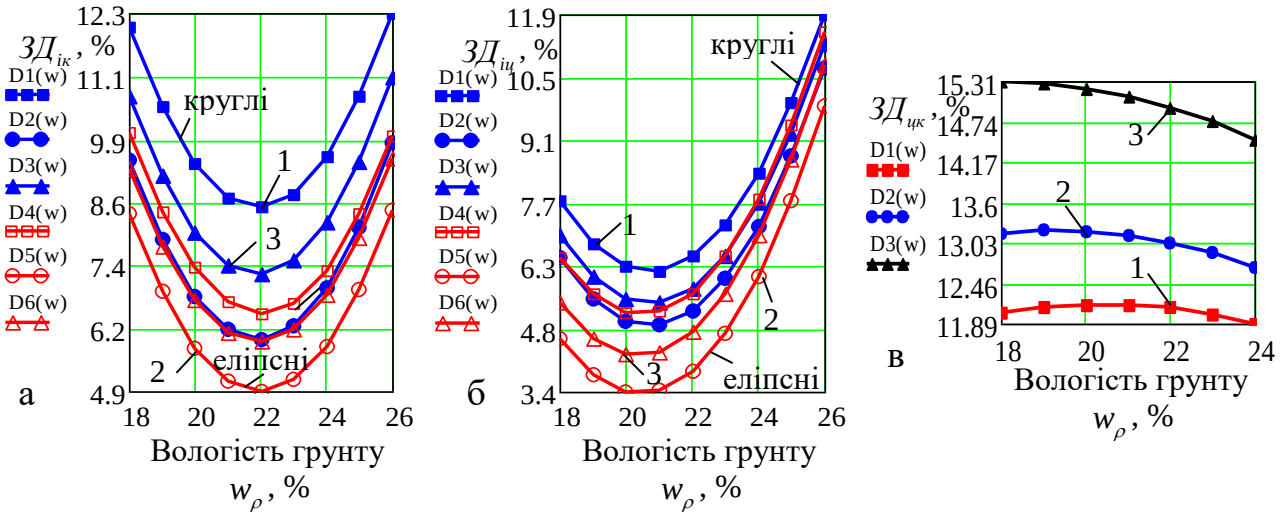



Рисунок 6.23 – Залежність зміни загальних домішок як функція $ЗД_{ік} = f_{ЗД}(w_\rho)$: а – кормові буряки; б – цукрові буряки; 1, 2, 3 – $n_ш$ = 100, 150, 200 об/хв, $n_e$ = 500 об/хв, $\vartheta_M$ = 7 км/год; в – коренеплоди цикорію, 1, 2, 3 – $n_{ш.к}$ = 100, 150, 200 об/хв, $\vartheta_M$ = 7 км/год

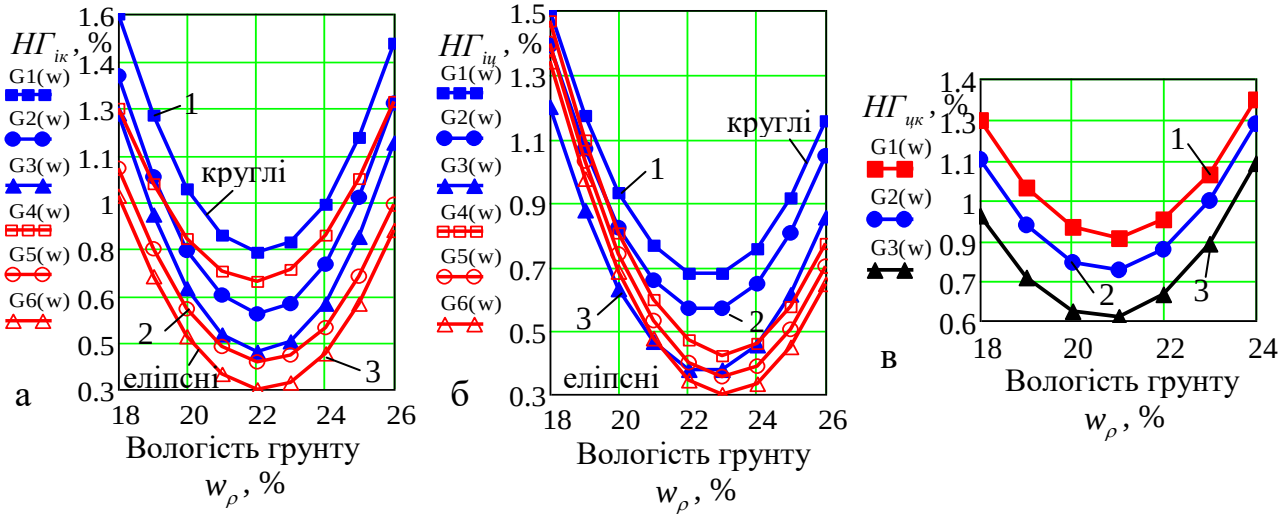



Рисунок 6.24 – Залежність зміни маси налиплого грунту як функція $НГ_{ік} = f_{НГ}(w_\rho)$: а – кормові буряки; б – цукрові буряки; 1, 2, 3 – $n_e$ = 300, 500, 700 об/хв, $n_ш$ = 150 об/хв, $\vartheta_M$ = 7 км/год; в – коренеплоди цикорію, 1, 2, 3 – $n_{ш.к}$ = 100, 150, 200 об/хв, $\vartheta_M$ = 7 км/год

2. Маса налиплого грунту на коренеплодах $НГ_i$, рис. 6.24:

- за збільшення покрокового інтервала варіювання вологості грунту $w_\rho$, на 4 або 3 % до межі середнього (нульового) рівня варіювання фактора, відповідно, до 22 та 21 % маса налиплого грунту на коренеплодах зменшується у середньому на 0,7…0,8% (кормові та цукрові буряки) та на 0,3…0,4%

(коренеплоди цикорію) за рахунок зменшення твердості грунтових домішок і відповідно, збільшення інтенсивності очищення налиплого грунту меншої твердості з поверхні тіла коренеплодів робочими органами ОТТМ;

- за подальшого збільшення покрокового інтервала варіювання вологості грунту $w_\rho$, на 4 або 3 % до верхнього рівня варіювання фактора відповідно, до 26 та 24 % маса налиплого грунту на коренеплодах збільшується у середньому на 0,4…0,5% (кормові та цукрові буряки, коренеплоди цикорію) за рахунок значного збільшення липкості грунтових домішок, що призводить до значного зменшення інтенсивності очищення налиплого грунту збільшеної липкості з поверхні тіла коренеплодів робочими органами ОТТМ.

3. Пошкодження коренеплодів $ПК_i$, рис. 6.25:

- вплив зміни вологості грунту $w_\rho$ у межах покрокового інтервала варіювання фактора (4% для кормових і цукрових буряків та 3% для коренеплодів цикорію) на функціональну зміну апроксимованих значень пошкодження коренеплодів як для шнеків круглого перерізу, так і для еліпсних шнеків має незначний характер – за збільшення покрокового інтервала варіювання вологості грунту $w_\rho$, на 4 або 3 % до верхнього рівня варіювання фактора відповідно, до 26 та 24 % пошкодження коренеплодів зменшується у середньому на 1,2…1,5% за рахунок зменшення твердості грунтових домішок і відповідного збільшення кількості руйнувань грудок грунту та збільшення товщини шару сипкого грунту, який знаходиться між поверхнями робочих органів ОТТМ і тілом коренеплодів.

Критерієм оптимізації раціональних параметрів робочих органів ОТТМ коренезбиральних машин є мінімальні значення показників якості їх роботи, тобто загальні домішки $ЗД_i \to \min$, налиплий грунт на коренеплодах $НГ_i \to \min$, пошкодження коренеплодів $ПК_i \to \min$, які регламентовані агротехнічними вимогами до технологічних процесів збирання коренеплодів цукрових і кормових буряків та коренеплодів цикорію згідно з діючими положеннями [106, 107, 304, 315, 326 – 328].

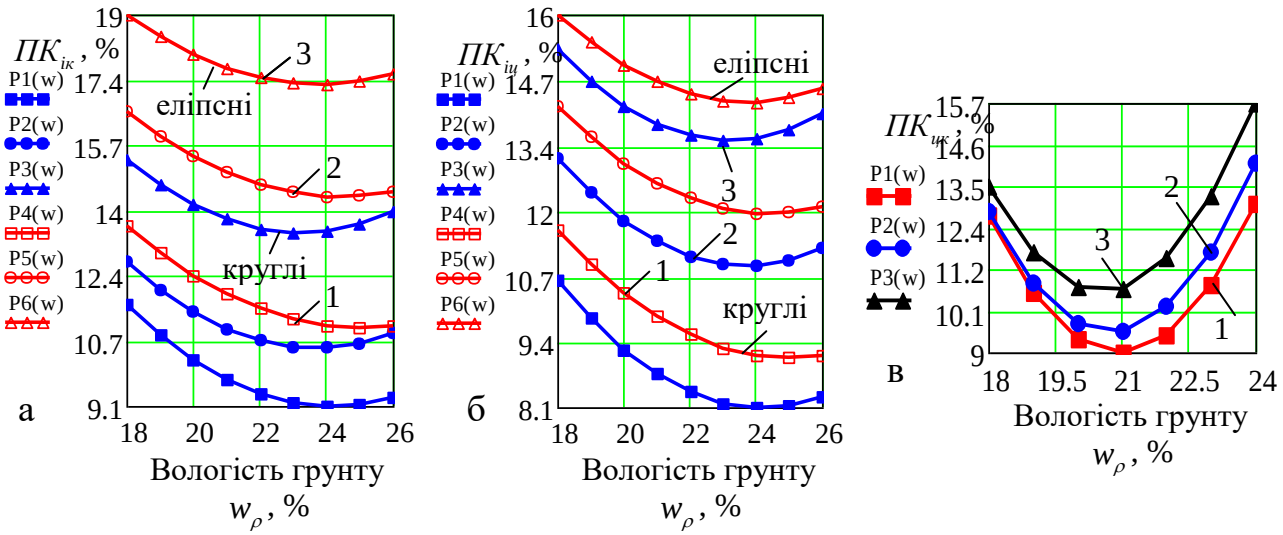



Рисунок 6.25 – Залежність зміни пошкодження коренеплодів як функція $ПК_{ік} = f_{ПК}(w_\rho)$: а – кормові буряки; б – цукрові буряки; 1, 2, 3 – $n_ш$ = 100, 150, 200 об/хв, $n_e$ = 500 об/хв, $\vartheta_M$ = 7 км/год; в – коренеплоди цикорію, 1, 2, 3 – $n_{ш.к}$ = 100, 150, 200 об/хв, $\vartheta_M$ = 7 км/год

За результатами проведених польових експериментальних досліджень визначено значення параметрів робочих органів ОТТМ за яких значення показників якості роботи є мінімальними.

При цьому встановлено:

1. Загальні домішки $ЗД_і \to \min$, рис. 6.26, табл. 6.5:

- кормові буряки $ЗД_{ік} \to \min$:

- шнеки круглого перерізу – $ЗД_{кк} \to \min$ = 5,5% за швидкості руху $\vartheta_M$ коренезбиральної машини до 5,5 км/год, частоти обертання шнеків $n_ш$ 140…180 об/хв, частоти обертання $n_e$ очисних пружних елементів 650…700 об/хв, вологості грунту $w_\rho$ від 21 до 23%;

- еліпсні шнеки – $ЗД_{ек} \to \min$ = 3,5% за швидкості руху $\vartheta_M$ коренезбиральної машини до 6,0 км/год, частоти обертання шнеків $n_ш$ 130…200 об/хв, частоти обертання $n_e$ очисних пружних елементів 600…700 об/хв, вологості грунту $w_\rho$ від 20 до 22%.

- цукрові буряки $ЗД_{іц} \to \min$:

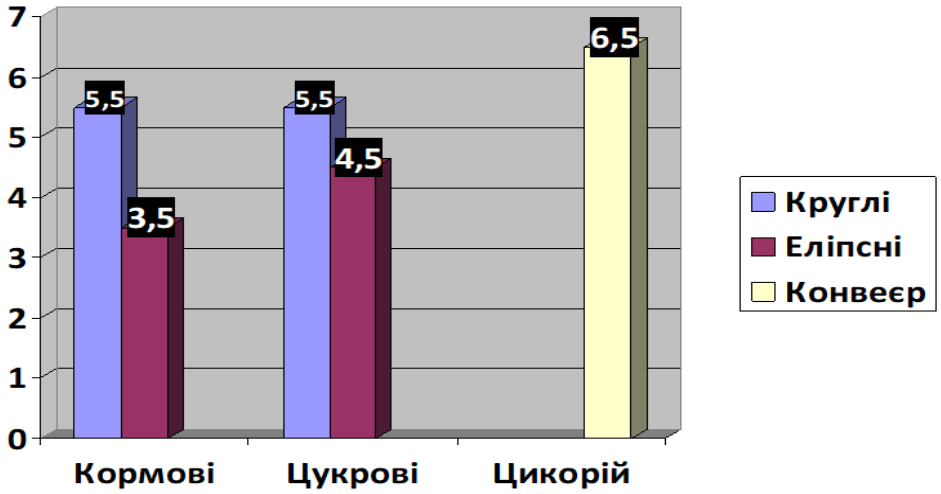



Рисунок 6.26 – Діаграма мінімальних значень загальних домішок ( $ЗД_i \to \min$ ) під час збирання коренеплодів

Таблиця 6.5 – Значення параметрів робочих органів ОТТМ згідно даних діаграми, рис. 6.26

| ОТТМ | | Показник, $ЗД_i$, % | $\vartheta_M$, км/год | $n_ш$, об/хв | $n_e$, об/хв | $w_\rho$, % | $n_{ш.к}$, об/хв |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Кормові | Круглі | 5,5 | До 5,5 | 140-180 | 650-700 | 20-22 | |
| | Еліпсні | 3,5 | До 6,0 | 130-200 | 600-700 | 20-22 | |
| Цукрові | Круглі | 5,5 | До 6,0 | 130-180 | 650-700 | 20-22 | |
| | Еліпсні | 4,5 | До 6,0 | 120-200 | 600-700 | 20-22 | |
| Цикорій | | 6,5 | До 6,0 | | | 20-22 | 100-170 |

- шнеки круглого перерізу – $ЗД_{кц} \to \min$ = 5,5% за швидкості руху $\vartheta_M$ коренезбиральної машини до 6,0 км/год, частоти обертання шнеків $n_ш$ 130…180 об/хв, частоти обертання $n_e$ очисних пружних елементів 650…700 об/хв, вологості грунту $w_\rho$ від 20 до 22%;

- еліпсні шнеки – $ЗД_{ец} \to \min$ = 3,5% за швидкості руху $\vartheta_M$ коренезбиральної машини до 6,0 км/год, частоти обертання шнеків $n_ш$ 120…200 об/хв, частоти обертання $n_e$ очисних пружних елементів 600…700 об/хв, вологості грунту $w_\rho$ від 20 до 22%:

Коренеплоди цикорію – $ЗД_{цк} \to \min$ = 6,5% за швидкості руху $\vartheta_M$ коренезбиральної машини до 6,0 км/год, частоти $n_{ш.к}$ обертання шнекового конвеєра 100…170 об/хв, вологості грунту $w_\rho$ від 20 до 22%.

2. Налиплий грунт на коренеплодах $НГ_i \to \min$, рис. 6.27, табл. 6.6:

- кормові буряки $НГ_{ік} \to \min$:

- шнеки круглого перерізу – $НГ_{кк} \to \min$ = 0,6% за швидкості руху $\vartheta_M$ коренезбиральної машини до 5,5 км/год, частоти обертання $n_ш$ шнеків 100…160 об/хв, частоти обертання $n_e$ очисних пружних елементів 500…700 об/хв, вологості грунту $w_\rho$ від 20 до 22%;

- еліпсні шнеки – $НГ_{ек} \to \min$ = 0,5 % за швидкості руху $\vartheta_M$ коренезбиральної машини до 6,0 км/год, частоти обертання $n_ш$ шнеків 100…180 об/хв, частоти обертання $n_e$ очисних пружних елементів 600…700 об/хв, вологості грунту $w_\rho$ від 20 до 22%.

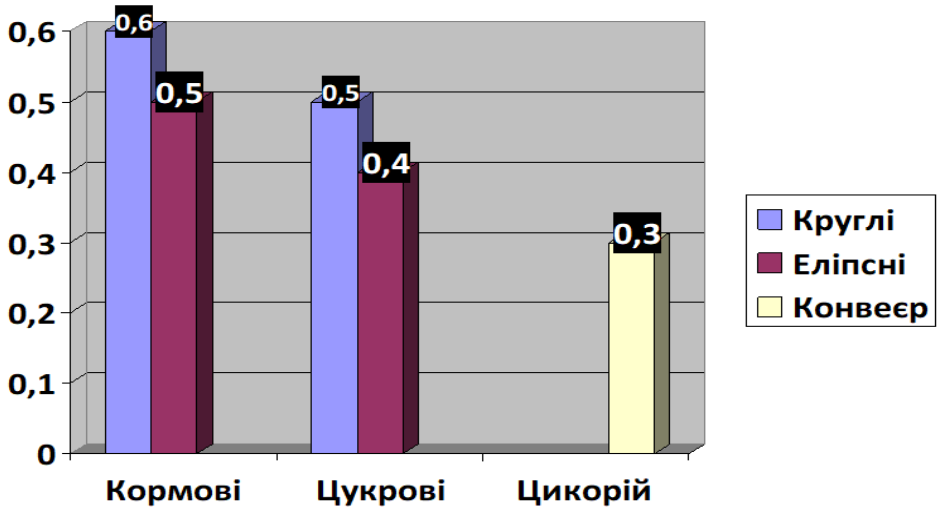



Рисунок 6.27 – Діаграма мінімальних значень маси налиплого грунту на коренеплодах ($НГ_i \to \min$) під час збирання коренеплодів

Таблиця 6.6 – Значення параметрів робочих органів ОТТМ згідно даних діаграми, рис. 6.27

| ОТТМ | | Показник, $НГ_i$, % | $\vartheta_M$, км/год | $n_ш$, об/хв | $n_e$, об/хв | $w_\rho$, % | $n_{ш.к}$, об/хв |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Кормові | Круглі | 0,6 | До 5,5 | 100-160 | 500-700 | 20-22 | |
| | Еліпсні | 0,5 | До 6,0 | 100-180 | 600-700 | 20-22 | |
| Цукрові | Круглі | 0,5 | До 6,5 | 100-200 | 550-700 | 20-22 | |
| | Еліпсні | 0,4 | До 6,5 | 100-200 | 650-700 | 20-22 | |
| Цикорій | | 0,3 | До 6,0 | | | 20-22 | 180-200 |

- цукрові буряки $НГ_{iц} \to \min$: $НГ_i$

- шнеки круглого перерізу – $НГ_{kц} \to \min$ = 0,5% за швидкості руху $\vartheta_M$ коренезбиральної машини до 6,5 км/год, частоти обертання $n_ш$ шнеків 100…200 об/хв, частоти обертання $n_e$ очисних пружних елементів 550…700 об/хв, вологості грунту $w_\rho$ від 20 до 22%;

- еліпсні шнеки – $НГ_{eц} \to \min$ = 0,4% за швидкості руху $\vartheta_M$ коренезбиральної машини до 6,5 км/год, частоти обертання $n_ш$ шнеків 100…200 об/хв, частоти обертання $n_e$ очисних пружних елементів 650…700 об/хв, вологості грунту $w_\rho$ від 20 до 22%.

- коренеплоди цикорію – $НГ_{цк} \to \min$ = 0,3% за швидкості руху $\vartheta_M$ коренезбиральної машини до 6,0 км/год, частоти обертання шнекового конвеєра 180…200 об/хв, вологості грунту від 20 до 22%.

3. Пошкодження коренеплодів $ПК_i \to \min$, рис. 6.28, табл. 6.7:

- кормові буряки $ПК_{iк} \to \min$:

- шнеки круглого перерізу – $ПК_{kк} \to \min$ = 8,0% за швидкості руху $\vartheta_M$ коренезбиральної 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 грунту $w_\rho$ від 20 до 22%;

- еліпсні шнеки – $ПК_{eк} \to \min$ = 10,0% за швидкості руху $\vartheta_M$ коренезбиральної машини до 5,0 км/год, частоти обертання $n_ш$ шнеків 100…110 об/хв, частоти обертання $n_e$ очисних пружних елементів 300…700 об/хв, вологості грунту $w_\rho$ від 20 до 22%.

- цукрові буряки:

- шнеки круглого перерізу – $ПК_{kц} \to \min$ = 6,0% за швидкості руху $\vartheta_M$ коренезбиральної машини до 6,5 км/год, частоти обертання $n_ш$ шнеків 100…150 об/хв, частоти обертання $n_e$ очисних пружних елементів 300…700 об/хв, вологості грунту $w_\rho$ від 20 до 22%;

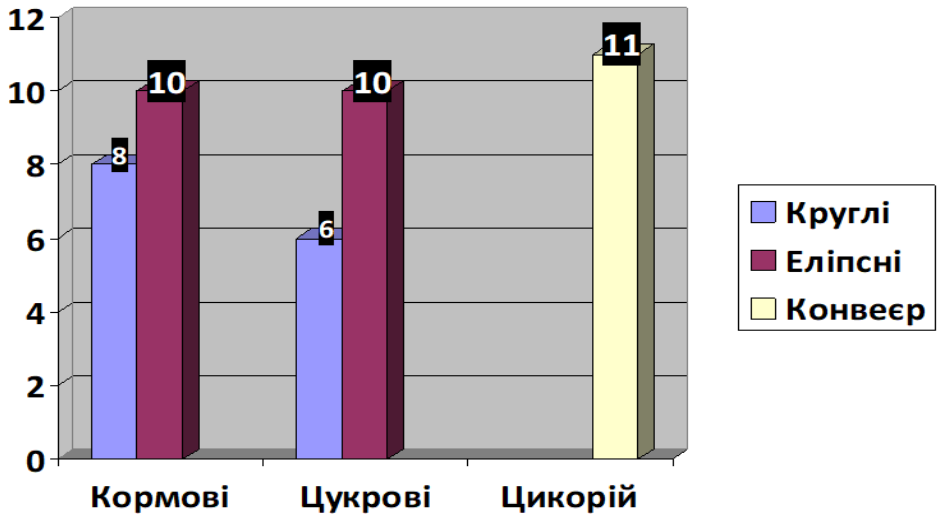



Рисунок 6.28 – Діаграма мінімальних значень пошкодження коренеплодів ( $ПК_i \to \min$ ) під час збирання коренеплодів

Таблиця 6.7 – Значення параметрів робочих органів ОТТМ згідно даних діаграми, рис. 6.28

| ОТТМ | | Показник, % | $\vartheta_M$, км/год | $n_ш$, об/хв | $n_e$, об/хв | $w_\rho$, % | $n_{ш.к}$, об/хв |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Кормові | Круглі | 8,0 | До 5,5 | 100-120 | 300-700 | 20-22 | |
| | Еліпсні | 10,0 | До 6,5 | 100-150 | 300-700 | 20-22 | |
| Цукрові | Круглі | 6,0 | До 6,5 | 100-150 | 650-700 | 20-22 | |
| | Еліпсні | 10,0 | До 5,5 | 100-120 | 600-700 | 20-22 | |
| Цикорій | | 11,0 | До 7,0 | | | 20-22 | 100-150 |

- еліпсні шнеки – $ПК_{ец} \to \min$ = 10,0% за швидкості руху $\vartheta_M$ коренезбиральної 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 грунту $w_\rho$ від 20 до 22%.

- коренеплоди цикорію – $ПК_{цк} \to \min$ = 11,0% за швидкості руху $\vartheta_M$ коренезбиральної машини до 7,0 км/год, частоти обертання $n_{ш.к}$ шнекового конвеєра 100…150 об/хв, вологості грунту $w_\rho$ від 20 до 22%.

Проте, значення параметрів робочих органів ОТТМ і швидкості руху $\vartheta_M$ коренезбиральної машини, за яких показники якості їх роботи під час збирання крупних коренеплодів є мінімальними з умови $ПЯ_i \to \min$ 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.

У цьому випадку критерієм оптимізації раціональних параметрів робочих органів ОТТМ коренезбиральних машин, є агротехнічні вимоги до процесу збирання крупних коренеплодів, які встановлюють максимально-допустимими значення основних показників якості роботи збиральних комплексів, при цьому [65, 66, 307, 319, 326 – 328]:

- кормові та цукрові буряки: загальних домішок – не більше 8%; маси налиплого грунту на коренеплодах – до 1,5%; пошкоджених коренеплодів – до 15%, із них сильнопошкоджених – до 8%;

- коренеплоди цикорію: загальних домішок – не більше 6%; маси налиплого грунту на коренеплодах – до 1,0%; пошкоджених коренеплодів – до 20%, із них сильнопошкоджених – до 10%.

Але при цьому, також необхідно знаходити компроміс між ступенем загальних домішок і відокремлення налиплого грунту з великорозмірних коренеплодів та ступенем пошкодження коренеплодів робочими органами (як правило – шнеками) ОТТМ.

У загальному було встановлено, що ОТТМ з еліпсними шнеками забезпечує:

- зменшення загальних домішок порівняно з шнеками круглого перерізу в середньому на 1,5…2,5 % за рахунок інтенсифікації процесу просіювання вільних домішок через зазори між валами шнеків, або виникаючого осцилюючого руху вороху в повздовжньому напрямку осі обертання еліпсних шнеків;

- збільшення пошкодження коренеплодів у середньому на 4,5…6,5 % знову ж таки за рахунок наявності осцилюючого руху вороху, що призводить до збільшення кількості випадків контакту коренеплоду з робочими поверхнями еліпсних шнеків.

Характер зміни маси налиплого грунту такий: при збільшенні вологості грунту $w_\rho$ від 18 до 22% маса налиплого грунту на поверхні тіла коренеплодів зменшується за рахунок зменшення необхідної сили зскрібання $F_c$ для руйнування налиплого грунту з видозміненими фізико-механічними властивостями. При цьому макроструктурні внутрішні зв'язки між частинками грунту значно змінюються за зменшення вологості грунту, а при подальшому збільшенні вологості грунту $w_\rho$ від 22 до 26% маса налиплого грунту зростає за рахунок аналогічної зміни фізико-механічних властивостей грунту вологістю від 22 до 26%.

На основі аналізу отриманих результатів апроксимованих значень згідно з емпіричними моделями (6.4)-(6.19) та графічною інтерпретацією результатів функціональної зміни показників якості роботи ОТТМ і урахуванням впливу всіх діючих факторів було 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 налиплого грунту $НГ_i \leq$ 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 компромісних 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 грунту $w_\rho$ 20…22%; швидкості руху коренезбиральної машини до 5…6 км/год;

- для еліпсних шнеків: частоти обертання $n_ш$ шнеків 120…160 об/хв; частоти обертання $n_e$ пружних елементів 500…700 об/хв; вологості грунту $w_\rho$ 20…22%; швидкості руху коренезбиральної машини до 6…7 км/год;

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

## 6.3. Польові порівняльні дослідження процесів роботи комбінованих очисних систем вороху

Порівняльні польові дослідження під час збирання крупних коренеплодів проводили з метою встановлення технологічної ефективності роботи порівнюваних ОТТМ в цілому та її окремих робочих органів у складі коренезбиральної машини згідно з методикою реалізації досліджень, яку наведено у п. 5.1 та п. 5.3 п'ятого розділу дисертаційної роботи.

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. 5.3 (базовий варіант);

- на операції збирання цукрових буряків коренезбиральною машиною МПК-4 з якої було демонтовано приводний очисний вал 5, рис. 5.5 (базовий варіант);

- на операції збирання коренеплодів цикорію причіпною трирядною коренезбиральною машиною з якої було демонтовано очисні пружні елементи 5, рис. 5.6 (базовий варіант).

У подальшому визначали агротехнічні показники якості роботи запропонованої компонувальної 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 однакова та становила 1,6 м/с у всіх випадках реалізації польових порівняльних досліджень, які провели впродовж одного дня та в однакових грунтово-кліматичних умовах.

Порівняльні польові дослідження показників якості роботи під час збирання коренеплодів кормових буряків коренезбиральною машиною МКК-6А (рис. 6.29) провели на полі компанії ПАП «Агропродсервіс» (Тернопільська обл., с. Настасів) біологічного сорту «Київський», додаток Ж.31.3.

Результати агротехнічних показників якості виконання технологічного процесу порівнюваних коренезбиральних машин під час збирання кормових буряків наведено у табл. 6.8 [209, 329].

Таблиця 6.8 – Показники якості виконання технологічного процесу збирання кормових буряків при проведенні порівняльних польових досліджень

| Найменування показників | Значення показників | | |
|---|---|---|---|
| | Модерні-зована | Базова | АТВ |
| Робоча швидкість руху, м/с | 1,6 | 1,6 | до 1,6 |
| Глибина підкопування: | | | |
| - середня, см | 9,0 | 9,0 | - |
| - середньоквадратичне відхилення, ± см | 0,85 | 0,85 | - |
| Якість підкопування і підбору коренеплодів, %: | | | |
| - зібрано машиною | 98,7 | 98,7 | - |
| - втрати, всього | 1,3 | 1,3 | 1,5 |
| у тому числі: | | | |
| - невикопаних коренеплодів | 0,4 | 0,4 | 0,5 |
| - на поверхні грунту | 0,3 | 0,4 | - |
| - присипаних грунтом | 0,6 | 0,5 | - |
| Склад вороху зібраних коренеплодів, %: | | | |
| - коренеплоди | 95,4 | 90,9 | - |
| - домішки, всього | 4,6 | 8,7 | 8,0 |
| у тому числі: | | | |
| - вільного грунту | 1,3 | 3,2 | 1,5 |
| - налиплого грунту на коренеплодах | 0,9 | 1,7 | - |
| - рослинних решток, всього | 2,4 | 3,8 | 3,5 |
| у тому числі: | | | |
| - вільної гички та бур’янів | 0,8 | 1,2 | 2,0 |
| - залишків гички на головках коренеплодів | 1,6 | 2,6 | 1,5 |
| Пошкодження коренеплодів, %: | | | |
| - всього | 9,4 | 9,7 | 15,0 |
| у тому числі: | | | |
| - сильнопошкоджених | 3,7 | 3,5 | 5,0 |

Аналіз наведених показників (табл. 6.8) якості викопування та підбирання кормових буряків показує, що втрати коренеплодів при їх викопуванні модернізованою та базовою коренезбиральною машиною МКК-6А однакові та становлять близько 1,3%. При цьому за групою втрат, яка відноситься до показника присипаних коренеплодів на поверхні поля грунтом, модернізована коренезбиральна машина МКК-6А перевищує показник базової на 0,1%.

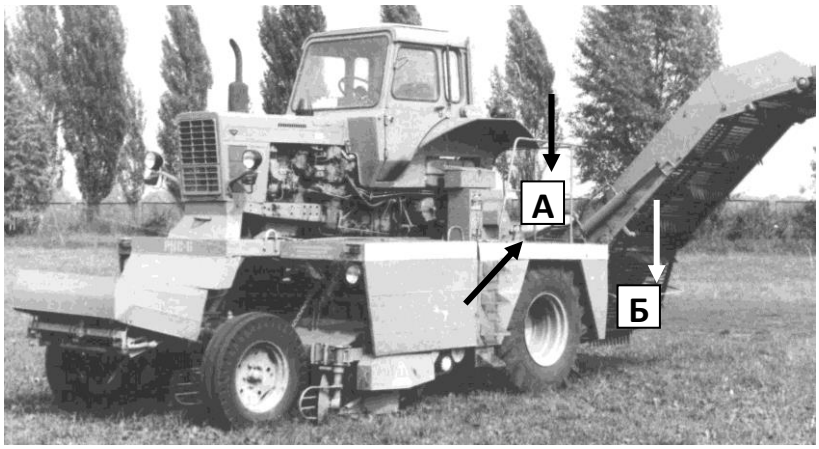



Рисунок 6.29 – Загальний вигляд базової машини МКК-:А

Це цілком реально пояснюється тим, що робочі органи модернізованої коренезбиральної машини МКК-6А КМ просіюють на поверхню поля значно більше (приблизно в 2,3 раза) вільного грунту, тим самим інтенсивніше присипаючи втрачені на поверхні поля коренеплоди.

Також модернізована коренезбиральна машина МКК-6А, порівняно з базовою, має незначно більший показник загальних пошкоджень кормових буряків – 9,7% проти 9,4% та сильнопошкоджених коренеплодів – 3,7% проти 3,5%, що пояснюється додатковим процесом ударної взаємодії коренеплодів з витком шнека очисного комбінованого робочого органу, проте значення сильнопошкоджених коренеплодів не виходить за межі агротехнічних вимог – до 8,0%.

Аналіз інших показників якості виконання технологічного процесу показує, що застосування розробленого ОТТМ на базовій коренезбиральній машині МКК-6А дозволяє значно покращити агротехнічні показники якості процесу відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів порівняно з базовою машиною.

Показник загальної кількості домішок у воросі зібраних коренеплодів модернізованої коренезбиральної машини МКК-6А, відносно показника базової, зменшується приблизно в 1,9 раза (4,6% проти 8,7% у базової), що підтверджує технологічну доцільність застосування комбінованого робочого органу ОТТМ та є суттєвим у плані подальшого удосконалення технологічного процесу збирання коренеплодів та робочих органів транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин.

Крім того, за окремими показниками складового компонента домішок, модернізована коренезбиральна машина МКК-6А також має значно менші показники відносно показників базової машини.

При цьому загальний показник рослинних домішок удосконаленої модернізованої, відносно аналогічного показника базової коренезбиральна машина МКК-6А, зменшується приблизно в 1,6 раза (2,4% проти 3,8% у базової).

Кількість налиплого грунту на боковій поверхні тіла коренеплодів при роботі модернізованої коренезбиральної машини МКК-6А становить 0,9%, тоді як у базової машини цей показник дорівнює 1,7 %, тобто зменшується в 1,9 рази, а кількість вільного грунту у воросі коренеплодів зменшується із 3,2 % у базової машини до 1,3 % у модернізованої, тобто приблизно в 2,3 рази.

При цьому загальний сумарний показник грунтових домішок модернізованої машини МКК-6А, відносно аналогічного показника базової машини, зменшується приблизно в 2,2 раза – 4,9% проти 2,2%.

Порівняльні польові дослідження показників якості роботи під час збирання коренеплодів цукрових буряків коренезбиральною машиною МКП-4 (рис. 6.30) провели на полі Львівської філії Державної наукової установи «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки та технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого» (Львівська обл., с. Магерів), додаток Ж.32.3.

Результати агротехнічних показників якості виконання технологічного процесу порівнюваних коренезбиральних машин під час збирання цукрових буряків наведено у табл. 6.9 [320, 321]

Аналіз наведених показників (табл. 6.10) якості викопування та підбирання коренеплодів цукрових буряків показує, що втрати коренеплодів при їх викопуванні модернізованою та базовою коренезбиральною машиною МПК-4 однакові і становлять 1,2 %.

При цьому за групою втрат, яка відноситься до показника присипаних коренеплодів на поверхні поля грунтом, модернізована машина перевищує показник базової МКП-4 на 0,2 %.

Рисунок 6.30 – Загальний вигляд коренезбиральної машини МПК-4

Таблиця 6.9 – Показники якості виконання технологічного процесу збирання цукрових буряків при проведенні порівняльних польових досліджень

| Найменування показників | Значення показників* | | |
|---|---|---|---|
| | Модернізована | Базова | АТВ |
| Швидкість руху, м/с | 1,6 | 1,6 | до 1,6 |
| Продуктивність, га/год. | 1,4 | 1,4 | до 1,4 |
| Глибина підкопування:<br>- середня, см<br>- середньоквадратичне відхилення, ± см | <br>9,2<br>0,95 | <br>9,2<br>0,95 | <br>-<br>- |
| Якість підкопування коренеплодів, %:<br>- зібрано машиною<br>- втрати, всього<br>у тому числі:<br>- не викопаних коренеплодів<br>- на поверхні грунту<br>- присипаних грунтом | <br>98,9<br>1,1<br><br>0,3<br>0,4<br>0,4 | <br>98,9<br>1,1<br><br>0,3<br>0,6<br>0,2 | <br>98,5<br>1,5<br><br>0,5<br>-<br>- |
| Склад вороху зібраних коренеплодів, %:<br>- коренеплоди<br>- домішки, всього<br>в тому числі:<br>- вільного грунту<br>- налиплого грунту на коренеплодах<br>- рослинних домішок | <br>95,0<br>5,0<br><br>1,1<br>1,5<br>2,4 | <br>91,4<br>5,9<br><br>1,5<br>1,9<br>2,5 | <br>-<br>8,0<br><br>1,5<br>-<br>3,5 |
| Пошкодження коренеплодів, %:<br>- усього<br>в тому числі сильно пошкоджених | <br>9,8<br>3,7 | <br>9,4<br>3,7 | <br>15,0<br>8,0 |

Це цілком реально пояснюється тим, що робочі органи удосконаленої машини просіюють на поверхню поля значно більше (приблизно в 1,4 раза – 1,1% проти 1,5%) вільного грунту, тим самим інтенсивніше присипаючи втрачені на поверхні поля коренеплоди. Показники сильнопошкоджених коренеплодів обох машин ідентичні та становлять 3,7 %.

Аналіз інших показників якості виконання технологічного процесу показує, що застосування розробленого ОТТМ на базовій машині МКП-4 дозволяє значно покращити агротехнічні показники якості процесу відокремлення домішок від коренеплодів порівняно з базовою машиною.

Загальна кількість домішок у воросі зібраних коренеплодів цукрових буряків зменшується приблизно в 1,2 рази – від 5,9% у базової до 5,0% в удосконаленої коренезбиральної машини МПК-4.

При цьому кількість налиплого грунту на бічній поверхні коренеплодів зменшується в 1,4 раза (1,5% проти 1,9%), що відбувається за рахунок додаткової інтенсифікації процесу відокремлення домішок від коренеплодів пружними очисними елементами комбінованого робочого органу.

Також позитивні показники порівняння загальної кількості рослинних домішок та вільного грунту. Вони, відповідно, зменшуються в 1,1 (2,4% проти 2,5%) та 1,4 раза (1,1% проти 1,5%) порівняно з показниками базової машини, що досягається за рахунок пригальмування компонентів вороху над шнеками пружними очисними елементами та збільшення часу їх знаходження в жолобі русла комбінованого очисника.

Показники втрат і пошкодження коренеплодів, з них сильнопошкоджених коренеплодів для обох порівновальних машин однакові.

Із порівняльного аналізу показників якості виконання технологічного процесу збирання цукрових буряків модернізованою та базовою коренезбиральною машиною МПК-4 (табл. 6.10) можна констатувати, що застосування приводного вала з очисними елементами у складі ОТТМ дозволяє значно підвищити агротехнічні показники якості роботи відносно аналогічних показників якості роботи базової машини.

Порівняльні польові дослідження показників якості роботи під час збирання коренеплодів цикорію причіпною коренезбиральною машиною провели на полі Хмельницької державної сільськогосподарської дослідної станції інституту кормів та сільського господарства Поділля Національної академії аграрних наук України (Хмельницька обл., с. Самчики), додаток Ж.33.3.

Результати агротехнічних показників якості виконання технологічного процесу порівнюваних коренезбиральних машин під час збирання коренеплодів цикорію наведено у табл. 6.10.

Таблиця 6.10 – Показники якості виконання технологічного процесу збирання коренеплодів цикорію

| Найменування показників | Значення показників | | |
|---|---|---|---|
| | Модерні-зована | Базова | АТВ |
| Робоча швидкість руху машини, м/с | 1,6 | 1,6 | до 1,5 |
| Продуктивність за годину основного часу, га/год. | 1,2 | 1,2 | до 1,4 |
| Глибина підкопування: | | | |
| – середня, см | 11,5 | 11,5 | - |
| – середньоквадратичне відхилення, ± см | 0,81 | 0,81 | - |
| Якість підкопування та підбору коренеплодів, %: | | | |
| – зібрано машиною | 97,3 | 97,3 | - |
| – втрати, всього | 2,7 | 2,7 | 2,5 |
| у тому числі: | | | |
| – не викопаних коренеплодів | 2,1 | 2,1 | 2,0 |
| – на поверхні грунту | 0,3 | 0,4 | - |
| – присипаних грунтом | 0,3 | 0,2 | - |
| Склад вороху зібраних коренеплодів, %: | | | |
| – коренеплоди | 95,6 | 92,2 | - |
| – домішки, всього | 6,1 | 6,9 | 8,0 |
| у тому числі: | | | |
| – грунтові домішки: | 2,5 | 3,2 | 5,0 |
| – вільного грунту | 1,5 | 1,8 | - |
| – налиплого грунту на коренеплодах | 1,0 | 1,4 | 1,5 |
| – рослинні домішки: | 3,6 | 3,8 | 3,0 |
| – вільні рослинні домішки | 2,5 | 2,6 | - |
| – залишки гички на головках коренеплодів | 1,1 | 1,2 | 0,5 |
| Пошкодження коренеплодів, %: | | | |
| – всього | 22,5 | 22,5 | 20,0 |
| у тому числі сильно пошкоджених | 11,5 | 11,5 | 9,0 |

На основі порівняльного аналізу показників якості виконання технологічного процесу збирання коренеплодів цикорію встановлено, що загальна кількість домішок у зібраному воросі базової коренезбиральної машини становить 6,9%, а модернізованої машини – 6,1%, тобто показник модернізованої машини зменшується приблизно в 1,2 раза, рис. 6.31, 6.32.

Рисунок 6.31 – Діаграма показників якості роботи модернізованої коренезбиральної машини

Рисунок 6.32 – Діаграма показників якості роботи базової коренезбиральної машини

При цьому кількість налиплого грунту на бічній поверхні коренеплодів зменшується в 1,4 раза – 1,0% проти 1,4%. Також позитивні показники порівняння загальної кількості рослинних домішок та вільного грунту. Вони, відповідно, зменшуються майже в 1,1 (3,6% проти 3,8%) та в 1,2 (1,5% проти 1,8%) раза порівняно з показниками базової машини, що відбувається за рахунок додаткової інтенсифікації процесу відокремлення домішок від коренеплодів пружними очисними елементами шнекового конвеєра.

Показники втрат і пошкодження коренеплодів, з них сильнопошкоджених коренеплодів для обох порівновальних машин однакові, проте не відповідають агротехнічним вимогам: втрати коренеплодів становлять 2,7% проти 2,5%; пошкодження коренеплодів становлять 22,5% проти 20,0%; сильнопошкоджених коренеплодів 11,5% проти 9,0% згідно з агротехнічними вимогами.

На основі аналізу та порівняння показників якості виконання технологічного процесу (табл. 6.10) можна констатувати, що застосування ОТТМ дозволяє покращити агротехнічні показники якості збирання коренеплодів цикорію відносно показників базової машини.

Крім того, також встановлено, що еліпсні шнеки порівняно з шнеками круглого перерізу забезпечують:

- зменшення загальних домішок $ЗД_i$ у 1,6 раза (кормові буряки) та в 1,3 раза (цукрові буряки);

- зменшення маси налиплого грунту на коренеплодах у 1,2 раза (кормові буряки) та в 1,3 раза (цукрові буряки);

- збільшення пошкодження коренеплодів у 1,3 раза (кормові буряки) та в 1,7 раза (цукрові буряки).

Таким чином, аналіз показників якості виконання технологічного процесу збирання крупних коренеплодів показує, що кількість загальних домішок із застосуванням ОТТМ порівняно з базовою машиною зменшується в середньому приблизно в 1,9 раза під час збирання коренеплодів кормових буряків, у 1,2 раза під час збирання коренеплодів цукрових буряків і в 1,2 раза 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.

## 6.4 Висновки до розділу

6.4.1. Встановлено, що за зміни швидкості руху коренезбиральної машини в межах $5 \le \vartheta_M \le 7$ км/год., кута встановлення $10 \le \varepsilon \le 30$ град та частоти обертання приводного вала похилого транспортера $90 \le n_m \le 150$ об/хв загальний коефіцієнт $\mu_{зде}^{(Z)}$ та коефіцієнти $\mu_{зде}^{(Z_{1l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{2l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ сепарації загальних домішок першої $l_1$, другої $l_2$ та третьої $l_3$ ділянок становлять, відповідно, від 54 до 72 %, від 52 до 67 % та від 54 до 71 %.

6.4.2. Раціональні параметри похилого транспортера досягаються за максимальних значень вхідних факторів: швидкості руху коренезбиральної машини $\vartheta_M =$ 7 км/год (2,1 м/с), кута встановлення похилого транспортера до горизонту $\varepsilon =$ 30 град., частоти обертання приводного вала похилого транспортера $n_m =$ 150 об/хв за існуючих параметрів стандартного пруткового транспортера: ширини пруткового транспортера $b_m =$ 0,9 м, діаметра прутків $d_{n.m} =$ 0,025 м, зазору між прутками $c_{n.m} =$ 0,045 м.

6.4.3. За раціональних значень параметрів похилого транспортера, значення коефіцієнтів технологічної ефективності його роботи є наступними: загальний коефіцієнт $\mu_{зде}^{(Z)}$ та коефіцієнти $\mu_{зде}^{(Z_{1l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{2l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ сепарації загальних домішок першої $l_1$, другої $l_2$ та третьої $l_3$ ділянок похилого транспортера становлять, відповідно, 65 %, 60 % та 70 %, а розбіжність теоретичних $\mu_{зд}^{(Z)}$ та експериментальних $\mu_{зде}^{(Z)}$ значень коефіцієнта сепарації загальних домішок знаходиться в межах 10…15%.

6.4.4. Зміна апроксимованих значень дальності польоту коренеплодів цикорію залежно від зміни вхідних факторів в межах кута встановлення похилого транспортера $20 \le \varepsilon \le 40$ град., частоти обертання приводного вала похилого транспортера $90 \le n_m \le 150$ об/хв знаходиться в діапазоні: від 0,7 до 1,4 м для коренеплодів масою $m_k =$ 0,35 кг; від 0,7 до 1,3 м для коренеплодів масою $m_k =$ 0,5 кг; від 0,4 до 1,0 м для коренеплодів масою $m_k =$ 0,65 кг.

Розбіжність теоретичних $L_A$ і апроксимованих експериментальних $L_{Ae}^{(m_{ki})}$ значень дальності польоту коренеплодів цикорію знаходиться в межах 6…15%.

6.4.5 Максимально-допустимі значення показника якості роботи згідно з агротехнічними вимогами, отримано за таких компромісних 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 грунту $w_\rho$ 20…22%; швидкості руху коренезбиральної машини до 5…6 км/год; для еліпсних шнеків: частоти обертання $n_ш$ шнеків 120…160 об/хв; частоти обертання $n_e$ пружних елементів 500…700 об/хв; вологості грунту $w_\rho$ 20…22%; швидкості руху коренезбиральної машини до 6…7 км/год; коренеплоди цикорію: частоти обертання $n_{ш.к}$ шнекового конвеєра 140…150 об/хв; вологості грунту $w_\rho$ 20…22%; швидкості руху коренезбиральної машини до 6…7 км/год.

6.4.6. 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 середньому в 1,9 раза під час збирання коренеплодів кормових буряків, у 1,2 раза під час збирання коренеплодів цукрових буряків і в 1,8 раза під час збирання коренеплодів цикорію.

Основні наукові результати розділу опубліковані у працях [315, 316, 320, 321, 329, 332].

# РОЗДІЛ 7
# УЗАГАЛЬНЕНІ РЕЗУЛЬТАТИ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 7.1. Енергетична оцінка очисних транспортно-технологічних модулів

Загальними критеріями або показниками оцінки ефективності роботи комбінованих ОТТМ, є технологічно-експлуатаційні показники або показники якості виконання технологічного процесу (відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплодів, продуктивність роботи та енергетичні показники.

Розробка та впровадження в післявоєнний аграрний сектор України нових високоефективних та ресурсозберігаючих технологічних процесів збирання крупних коренеплодів шляхом мінімізації витрат споживаної потужності на виконання технологічного процесу відокремлення домішок від коренеплодів, за умови забезпечення необхідних показників якості збирання згідно з агротехнічними вимогами [65, 66, 257, 319, 326 – 328], потребує інтегрованого наукового підходу для вирішення завдань подальшого вдосконалення робочих органів коренезбиральних машин [1].

Поряд із викопними робочими органами, на які припадає близько 50% затрат споживаної потужності коренезбиральної машини загалом [25, 163], дослідження енергетичних показників комбінованих очисних робочих органів є актуальним питанням у плані загального контексту побудови конструктивно-компонувальних схем коренезбиральних машин та розрахунку параметрів комбінованих ОТТМ.

Витрати споживаної потужності, які необхідні для виконання технологічного процесу роботи ОТТМ (рис. 2.9) визначали паралельно під час реалізації експериментальних досліджень з визначення показників якості під час збирання цукрових буряків коренезбиральною машиною МПК-4.

Дослідження споживаної потужності ОТТМ визначали за такими окремими напрямками:

- витрати споживаної потужності $P_г$ (кВт) очисною гіркою 2 (рис. 2.9, рис. 5.13);

- витрати споживаної потужності правою 4 (рис. 2.9) та лівою 5 системою шнеків (шнеки 9 круглого перерізу $P_{кш}$ та еліпсні 14 шнеки $P_{ешн}$), кВт;

- сумарні витрати споживаної потужності для шнеків круглого перерізу $\sum P_{(г+кш)}$ очисною гіркою $P_г$ та правою 4 (рис. 2.9) та лівою 5 системою шнеків (шнеки 9 круглого перерізу $P_ш$), кВт;

- сумарні витрати споживаної потужності для еліпсних шнеків $\sum P_{(г+ешн)}$ очисною гіркою $P_г$ та правою 4 (рис. 2.9) та лівою 5 системою шнеків (еліпсні 14 шнеки $P_{ешн}$), кВт;

- витрати споживаної потужності $P_{кр}$ (кВт) комбінованим робочим органом 3 (рис. 2.9, шнеки 9 круглого перерізу), кВт;

- витрати споживаної потужності $P_{ер}$ (кВт) комбінованим робочим органом 3 (рис. 2.9, еліпсні 14 шнеки), кВт;

- сумарні витрати споживаної потужності ОТТМ $\sum P_{кОТТМ} = P_г + P_{кр}$ для шнеків 9 (рис. 2.9) круглого перерізу (очисна гірка $P_г$ + комбінований робочий орган $P_{кр}$), кВт;

- сумарні витрати споживаної потужності ОТТМ $\sum P_{еОТТМ} = P_г + P_{ер}$ для еліпсних 14 (рис. 2.9) шнеків (очисна гірка $P_г$ + комбінований робочий орган $P_{ер}$), кВт.

При проведенні польових експериментів використовували стандартну методику [66], при цьому визначали крутні моменти й кутові швидкості приводних валів окремих складових вузлів ОТТМ та розрахункові значення витрат споживаної потужності.

Як контрольні пристрої використовували безконтактні ємнісні датчики виробництва науково-виробничої фірми “Полтвіль” [330], що визначають крутні моменти та кутові швидкості обертання приводних валів.

Засобами вимірювання параметрів витрат споживаної потужності були технічні засоби у вигляді багатоканальної реєстраційної системи ALTIVAR 71 і комп'ютерного осцилографа на базі програмного продукту Power suite [331], додаток З.1.1.

Методика проведення досліджень і обробки експериментальних даних наведена у розділі 5 підрозділу 5.3.

Зміну витрат споживаної потужності для шнеків круглого перерізу $P_{г}$, $P_{кш}$, $\sum P_{(г+кш)}$, $P_{кр}$ та $\sum P_{kOTTM}$ залежно від двох факторів (швидкості руху машини $\vartheta_M \to x_1$ (5-6-7 км/год) та частоти обертання шнеків $n_ш \to x_2$ (100-150-200 об/хв), записаного у вигляді функціонала $P_{ki} = f_P(x_1; x_2)$, знаходили у вигляді математичної моделі полінома другої степені.

Адекватність моделі перевіряли за $F$-критерієм Стюдента, а статистичну значимість коефіцієнтів емпіричної моделі проводили за $t$- критерієм Стьюдента. При цьому було встановлено, що всі розрахункові значення коефіцієнтів моделі є значимими, крім коефіцієнта $b_{12} = 2{,}72\ \ 10^{-16}$ моделі $P_{кш} = f_P(\vartheta_M; n_ш)$.

У табл. 7.1 представлені значення коефіцієнтів емпіричної моделі, яка функціонально характеризує витрати споживаної потужності $P_i = f_P(\vartheta_M; N_k)$ робочими органами ОТТМ для шнеків круглого перерізу під час збирання коренеплодів цукрових буряків.

Після обробки експериментального масиву даних (додаток З.2.1) отримані рівняння регресії в натуральних величинах, які характеризують зміну витрат споживаної потужності для шнеків круглого перерізу:

- очисною гіркою $P_{г}$, кВт; шнеків круглого перерізу $P_{кш}$, кВт;

- сумарних витрат споживаної потужності $\sum P_{(г+кш)}$, кВт;

Таблиця 7.1 – Значення коефіцієнтів емпіричної моделі для шнеків круглого перерізу

| Витрати потужності | $b_o$ | $b_1$ | $b_2$ | $b_{12}$ | $b_{11}$ | $b_{22}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $P_г = f_P(\vartheta_M; n_ш)$ | -2,23 | -0,58 | 0,07 | -0,0005 | 0,07 | 0,0002 |
| $P_{кш} = f_P(\vartheta_M; n_ш)$ | -3,14 | 1,58 | 0,01 | $2{,}72\ 10^{-16}$ | -0,11 | $7{,}67\ 10^{-5}$ |
| $\sum P_{(г+кш)} = f_P(\vartheta_M; n_ш)$ | -5,37 | 1,0 | 0,06 | -0,0005 | -0,04 | $-8{,}67\ 10^{-5}$ |
| $P_{кр} = f_P(\vartheta_M; n_ш)$ | -1,61 | 1,08 | 0,004 | -0,0005 | -0,07 | $4{,}33\ 10^{-5}$ |
| $\sum P_{kOTTM} = f_P(\vartheta_M; n_ш)$ | -3,96 | 0,53 | 0,07 | -0,0005 | -0,01 | -0,0001 |

- витрат споживаної потужності $P_{кр}$, кВт;

- сумарних витрат споживаної потужності ОТТМ $\sum P_{kOTTM}$, кВт [332]:

$$\left.\begin{aligned}
&P_г = -2,23 - 0,58\vartheta_M + 0,07n_ш - 0,0005\vartheta_M n_ш + 0,07\vartheta_M^2 + 0,0002n_ш^2;\\
&P_{кш} = -3,14 + 1,58\vartheta_M + 0,01n_ш - 0,11\vartheta_M^2 + 7,67\cdot 10^{-5} n_ш^2;\\
&\sum P_{(г+кш)} = -5,37 + 1,0\vartheta_M + 0,06n_ш - 0,0005\vartheta_M n_ш - 0,04\vartheta_M^2 - 8,67\cdot 10^{-5} n_ш^2;\\
&P_{кр} = -1,61 - 1,08\vartheta_M + 0,004n_ш - 0,0005\vartheta_M n_ш - 0,07\vartheta_M^2 + 4,33\cdot 10^{-5} n_ш^2;\\
&\sum P_{kOTTM} = -3,96 + 0,53\vartheta_M + 0,07n_ш - 0,0005\vartheta_M n_ш - 0,01\vartheta_M^2 - 0,0001n_ш^2
\end{aligned}\right\}. \quad (7.1)$$

Отримані рівняння регресії (7.1) характеризують взаємозв'язок зміни витрат споживаної потужності $P_г$, витрат споживаної потужності $P_{кш}$, сумарних витрат споживаної потужності $\sum P_{(г+кш)}$, витрат споживаної потужності $P_{кр}$ та сумарних витрат споживаної потужності ОТТМ $\sum P_{kOTTM}$ робочими органами ОТТМ і загалом для шнеків круглого перерізу в межах зміни натуральних факторів: поступальної швидкості руху коренезбиральної машини 5-7 (км/год); частоти обертання шнеків 100-200 об/хв.

Для проведення аналізу зміни кількісних показників витрат споживаної потужності $P_г$, витрат споживаної потужності $P_ш$, сумарних витрат споживаної потужності $\sum P_{(г+ш)}$, витрат споживаної потужності $P_{к.о}$ та сумарних витрат

споживаної потужності ОТТМ $\sum P_{OTTM}$ для шнеків круглого перерізу, будували графічне відтворення емпіричних регресійних моделей (7.1) у вигляді поверхонь відгуку та двомірних перерізів поверхонь відгуку як функції від двох змінних факторів (рис. 7.1 – рис. 7.5):

- швидкості руху машини $\vartheta_M$;

- частоти обертання шнеків $n_ш$.

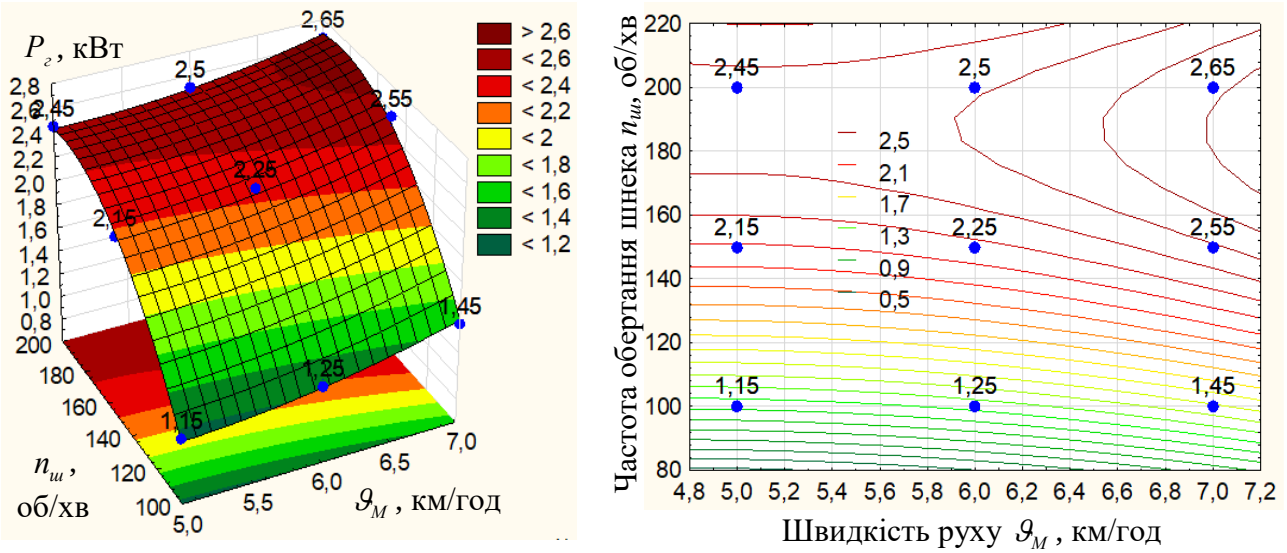



Рисунок 7.1 – Поверхня відгуку та її двомірний переріз як функція $P_г = f_P(\vartheta_M; n_ш)$

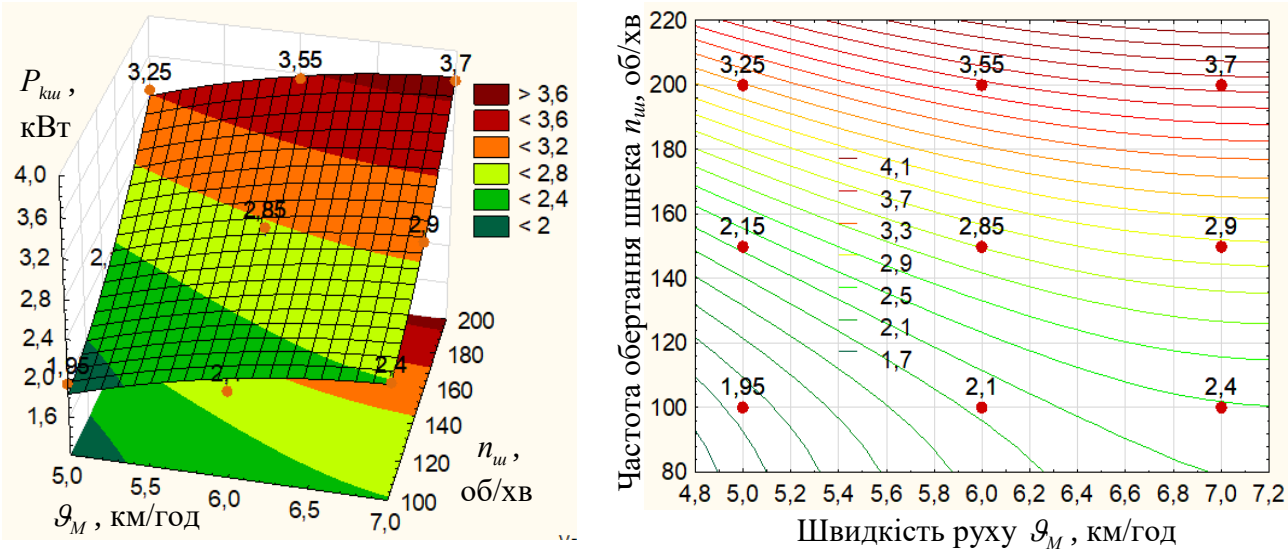



Рисунок 7.2 – Поверхня відгуку та її двомірний переріз як функція $P_{кш} = f_P(\vartheta_M; n_ш)$

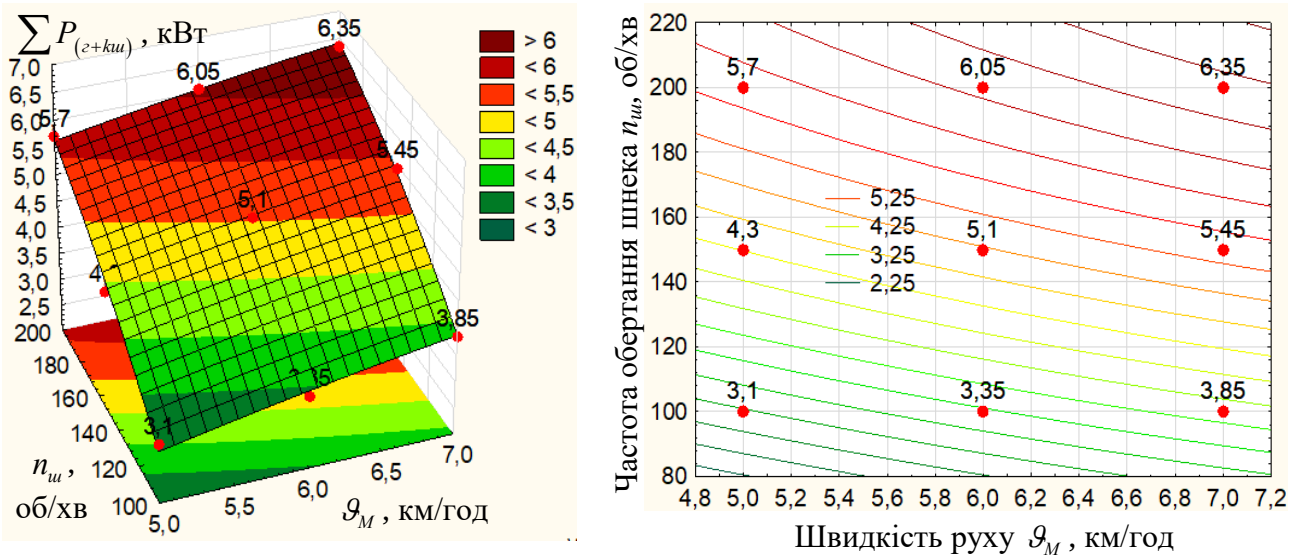



Рисунок 7.3 – Поверхня відгуку та її двомірний переріз як функція $\sum P_{(г+ки)} = f_P(\vartheta_M; n_ш)$

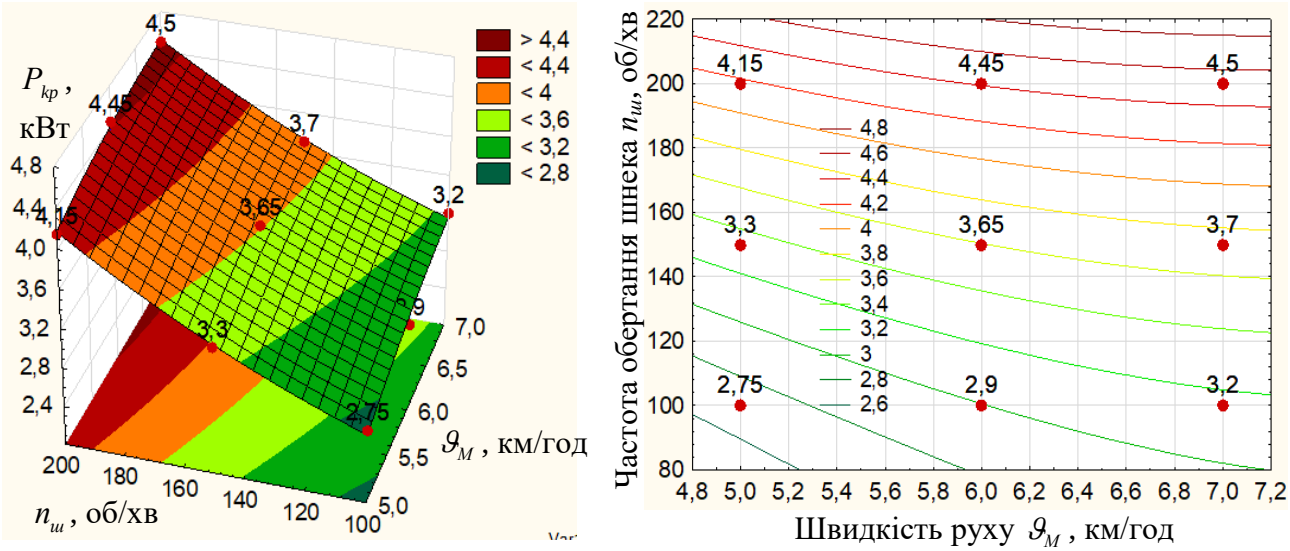



Рисунок 7.4 – Поверхня відгуку та її двомірний переріз як функція $P_{кр} = f_P(\vartheta_M; n_ш)$

Аналіз побудованих графічних моделей (рис. 7.1-рис. 7.5) дозволяє констатувати наступні положення:

- апроксимовані значення витрат споживаної потужності $P_г$ становлять від 1,15 до 2,65 кВт та пропорційно зростають залежно від збільшення швидкості руху машини в межах $5 \le \vartheta_M \le 7$ км/год за рахунок зростання секундної подачі вороху $\sum_{i=1}^{2} Q_{ів}$, або збільшення масового навантаження ворохом робочої гілки очисної гірки, рис. 7.1;

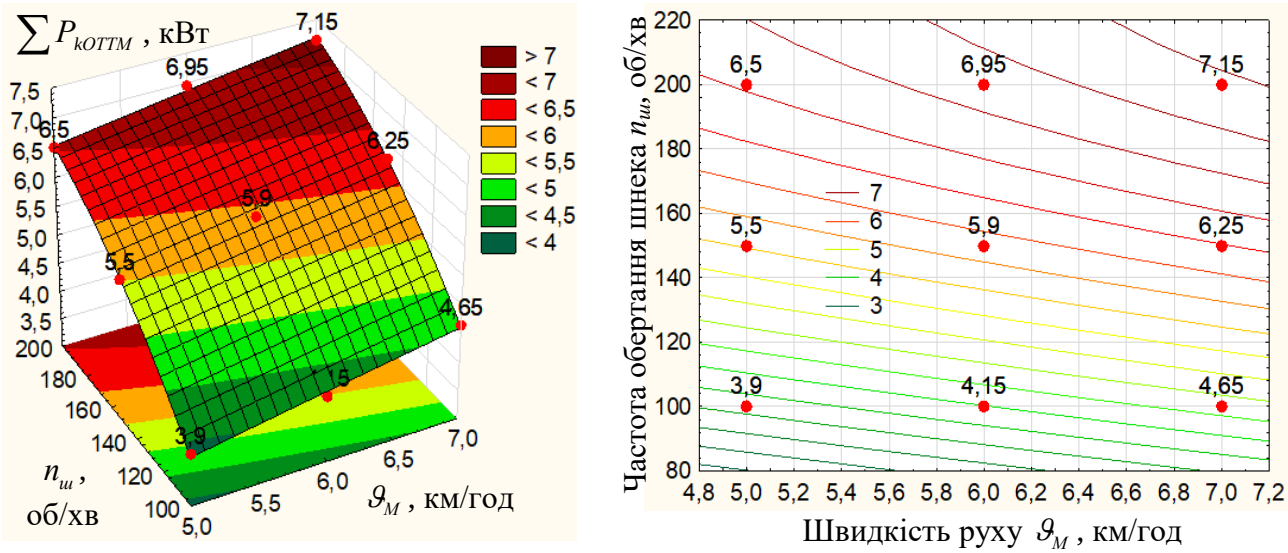



Рисунок 7.5 – Поверхня відгуку та її двомірний переріз як функція $\sum P_{кОТТМ} = f_P(\vartheta_M; n_ш)$

- апроксимовані значення витрат споживаної потужності $P_{кш}$ становлять від 1,95 до 3,7 кВт та пропорційно зростають залежно від збільшення швидкості руху машини в межах $5 \le \vartheta_M \le 7$ км/год за рахунок зростання секундної подачі вороху $\sum_{i=1}^{2} Q_{iв}$, або збільшення масового навантаження ворохом робочої гілки очисної гірки та збільшення частоти обертання шнеків в межах $100 \le n_ш \le 200$ об/хв за рахунок зростання силового навантаження на привод шнеків, рис. 7.2;

- апроксимовані значення сумарних витрат споживаної потужності $\sum P_{(г+кш)}$ становлять від 3,1 до 6,35 кВт та мають характер функціональної зміни аналогічний характеру зміни $P_г$ та $\sum P_{(г+кш)}$, рис. 7.3;

- апроксимовані значення сумарних витрат споживаної потужності $P_{кр}$ становлять від 2,75 до 4,5 кВт та пропорційно зростають залежно від збільшення швидкості руху машини в межах $5 \le \vartheta_M \le 7$ км/год за рахунок зростання секундної подачі вороху $\sum_{i=1}^{2} Q_{iв}$, або збільшення масового навантаження ворохом робочої гілки очисної гірки та збільшення частоти

обертання шнеків в межах $100 \le n_ш \le 200$ об/хв за рахунок зростання силового навантаження на привод шнеків, а також додаткового силового навантаження на привод 6 (рис. 2.9) очисного вала, рис. 7.4;

- апроксимовані значення сумарних витрат споживаної потужності $\sum P_{kOTTM}$ становлять від 3,9 до 7,15 кВт та мають характер функціональної зміни аналогічний характеру зміни $P_г$, $P_ш$ $P_{kp}$ та $\sum P_{(г+kш)}$, рис. 7.5.

За результатами обробки експериментального масиву даних витрат споживаної потужності робочих органів ОТТМ для еліпсних шнеків (додаток З.3.1) було встановлено, що витрати споживаної потужності при застосуванні еліпсних шнеків зростають порівняно з шнеками круглого перерізу в межах 0,3…0,5 кВт, що наглядно підтверджується діаграмами витрат споживаної потужності, які наведено на рис. 7.6-рис. 7.8.

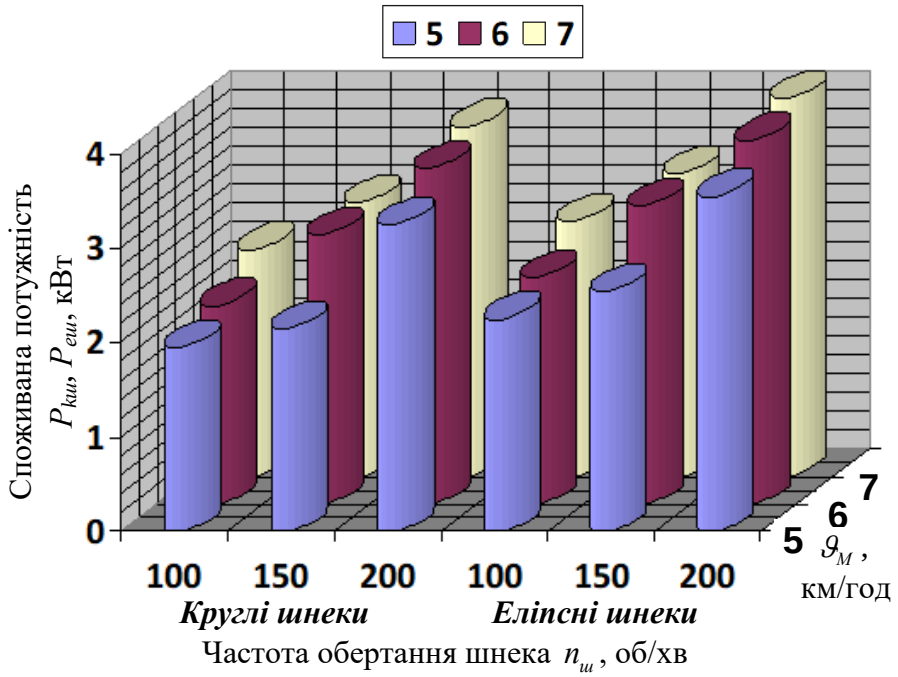



Рисунок 7.6 – Діаграма витрат споживаної потужності $P_{кш}$ і $P_{еш}$

Функціональна зміна витрат споживаної потужності окремих робочих органів ОТТМ $P_{еш}$ і $P_{ер}$ та сумарних витрат $\sum P_{eOTTM}$ еліпсних шнеків залежно від зміни вхідних факторів $5 \le \vartheta_M \le 7$ км/год і $100 \le n_ш \le 200$ об/хв має аналогічний характер функціональної зміни $P_{кш}$, $P_{kp}$ та $\sum P_{kOTTM}$.

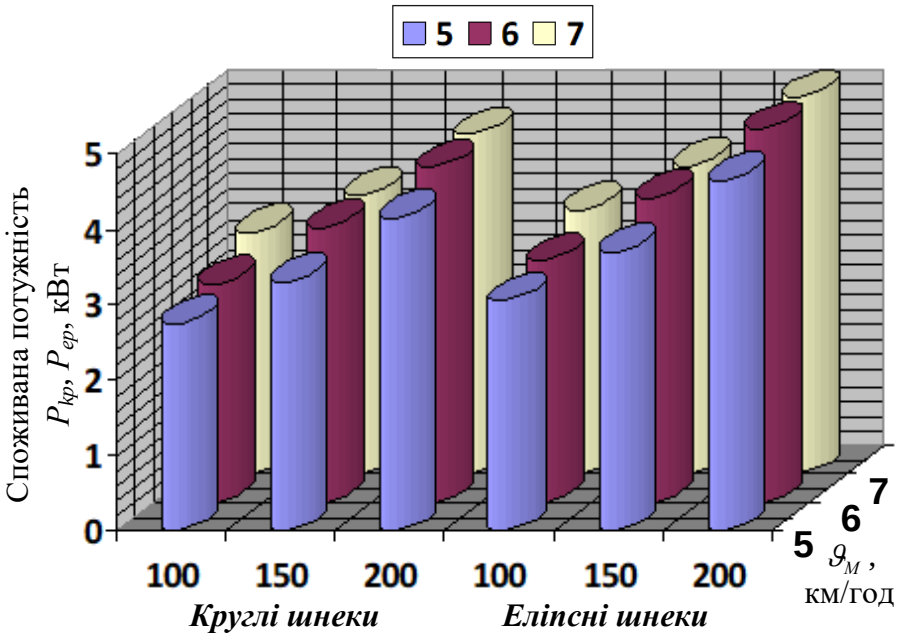



Рисунок 7.7 – Діаграма витрат споживаної потужності $P_{kp}$ і $P_{ep}$

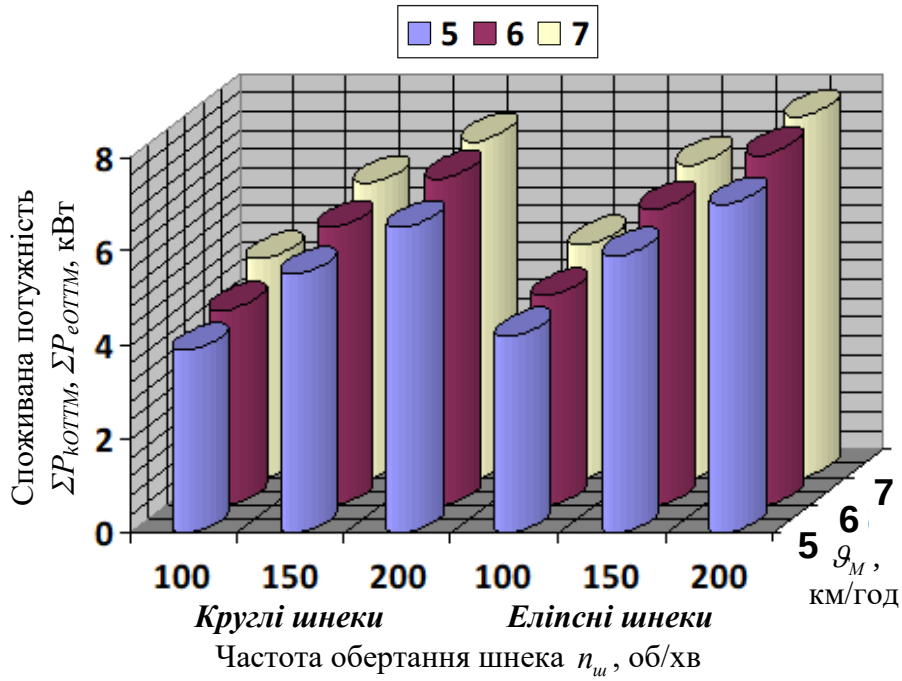



Рисунок 7.8 – Діаграма сумарних витрат споживаної потужності $\sum P_{kOTTM}$ і $\sum P_{eOTTM}$

Також було встановлено, що максимальне значення загальних витрат споживаної потужності холостого ходу, які необхідні лише на привод робочих органів ОТТМ у 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, еліпсних шнеків – 0,3 кВт, очисного вала – 0,15 кВт, комбінованого робочого органу для шнеків круглого перерізу – 0,4 кВт, комбінованого робочого органу для еліпсних шнеків – 0,45 кВт.

При максимальній подачі вороху, яка відповідає одночасному викопуванні 4-х рядків цукрових буряків, сумарні витрати споживчої потужності ОТТМ становлять 7,15 кВт, що складає біля 12% затрат наявної потужності енергетичного засобу – трактора МТЗ-82.

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

## 7.2. Економічна ефективність застосування очисних транспортно-технологічних модулів у складі коренезбиральних машин

Економічну ефективність застосування удосконаленого ОТТМ в складі коренезбиральної машини, або визначення економічного ефекту технологічного процесу відокремлення домішок від коренеплодів, розрахуємо згідно положень і рекомендацій, які викладено в [333, 334] з урахуванням функціональних показників якості роботи запропонованого ОТТМ та показників якості роботи базової машини, за яку приймає серійну коренезбиральну машину МПК-4, додаток З.4.2.

За базу при проведенні економічних розрахунків приймали показники якості відокремлення домішок від коренеплодів цукрових буряків базової та модернізованої коренезбиральної машини МПК-4, рис. 6.34.

При цьому згідно з результатми досліджень загальні домішки модернізованої машини становлять 5,0%, а базової – 8,6%.

Економічну ефективність процесу роботи коренезбиральної машини МПК-4, яку було обладнано ОТТМ визначали на площі збирання цукрових буряків $S_Б =$ 300 га [333, 334] та їх відвезення до пункту призначення на відстань $L_T =$ 15 км.

Загальний річний економічний ефект $E_p$ (грн) від експлуатації модернізованої машини МПК-4 (у подальшому – базової) становить

$$E_P = E_B + E_Д + E_M, \tag{7.1}$$

де $E_B$ – економічний ефект від зниження втрат, грн;

$E_Д$ – економічний ефект від зниження загальної кількості домішок, грн;

$E_M$ – економічний ефект від зниження пошкоджень коренеплодів, грн.

Згідно з даними табл. 6.10, за однакових показників втрат коренеплодів і їх пошкодження базової машини та аналога, показник $E_p$ будемо визначати лише за економічним ефектом $E_Д$ від зниження загальної кількості домішок *ЗД* у зібраному воросі, тобто $E_P = E_Д$.

Цей показник регламентує видатки, які необхідно витратити для перевезення зібраного вороху від місця його завантаження в причіп транспортного засобу до кінцевого пункту призначення (зберігання, переробки, споживання тощо) та видатки, які необхідно витрати на додаткове очищення коренеплодів від домішок при підготовці сировини до переробки.

Розрахунок видатків, які необхідно витратити для перевезення зібраного вороху від місця його завантаження в причіп транспортного засобу до кінцевого пункту призначення, проведемо в такій послідовності:

1. Продуктивність транспортного засобу МТЗ-82+2ПТС-4 $W_T$ (т/год.), який відвозить зібраний ворох до пункту призначення визначаємо за формулою

$$W_T = \frac{B}{T_Z} = \frac{q}{100T_Z} M_K = \frac{q}{100T_Z}\left(100 - ЗД\right), \tag{7.2}$$

де $B = q\left(100 - ЗД\right)/100$ – вантажомісткість причепа чистих коренеплодів, т;

$T_z$ – час одного циклу при відвезенні вороху коренеплодів, год;

$q = 4$ т – паспортна вантажомісткість причепа [335];

$M_k = 100\% - ЗД$ – показник чистих коренеплодів, т.

2. Час одного циклу $T_Z$ (год) при відвезенні коренеплодів визначається

$$T_z = T_H + T_P + T_B + T_П, \tag{7.3}$$

де $T_H$ – час завантаження причепа ворохом, год;

$T_P$ – час транспортування вороху до пункту призначення, год;

$T_B = 0{,}15$ год – час вивантаження причепа [336];

$T_П$ – час повернення транспортного засобу до місця завантаження вороху, год.

Час навантаження $T_H$ (год) транспортного засобу

$$T_H = \frac{B}{U_K W_З}, \tag{7.4}$$

де $U_K =$ 32,5 т/га – урожайність цукрових буряків, додаток Д.12.2;

$W_З = 0{,}85$ га/год – продуктивність машини за зміну, додаток Д.3.1.

За швидкості транспортування вороху до пункту призначення $\vartheta_T =$ 15 км/год, час транспортування вороху до пункту призначення дорівнює

$$T_P = L_T / \vartheta_T = 15/15 = 1 \text{ год.}$$

За швидкості руху повернення транспортного засобу до місця завантаження вороху $\vartheta_П =$ 20 км/год, час повернення транспортного засобу до місця завантаження вороху дорівнює

$$T_П = L_T / \vartheta_П = 15/20 = 0{,}75 \text{ год.}$$

Згідно з рівнянням $B = q(100 - ЗД)/100$ маємо:

$$B_А = 4 \cdot (100 - 8{,}6)/100 = 3{,}66 \text{ (т)}; \; B_Б = 4 \cdot (100 - 5{,}0)/100 = 3{,}8 \text{ (т)}.$$

Згідно формули (7.4) час навантаження транспортного засобу базовою машиною $T_{НБ}$ та аналогом $T_{НА}$ дорівнює:

$$T_{НА} = 3{,}66/(32{,}5 \cdot 0{,}85) = 0{,}13 \text{ год;}$$

$$T_{НБ} = 3{,}8 / \left(32{,}5 \cdot 0{,}85\right) = 0{,}15 \text{ год.}$$

Згідно формули (7.3) визначаємо $T_Z$:

$$T_{ZA} = 0{,}13 + 1{,}0 + 0{,}15 + 0{,}75 = 2{,}03 \text{ (год);}$$

$$T_{ZБ} = 0{,}15 + 1{,}0 + 0{,}15 + 0{,}75 = 2{,}05 \text{ (год).}$$

Тоді, продуктивність транспортного засобу МТЗ-82+2ПТС-4 $W_T$, який відвозить зібраний ворох до пункту призначення згідно з (5.2) становить:

$$W_{TA} = 3{,}66 / 2{,}03 = 1{,}78 \text{ (т/год);}$$

$$W_{TБ} = 3{,}8 / 2{,}05 = 1{,}88 \text{ (т/год).}$$

3. Визначимо приведені витрати $P_B$ (грн./га), які необхідні для збирання коренеплодів з площі 1 га за формулою

$$P_B = k_e \cdot K_П + B_П, \tag{7.5}$$

де $k_e = 0{,}15$ – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень [335];

$K_П$ – питомі капіталовкладення, грн/га;

$B_П$ – прямі експлуатаційні видатки, грн/га.

Питомі капіталовкладення $K_п$ визначаємо за формулою

$$K_П = Б_{т.а} \cdot U_K / W_T \cdot T_{р.тр}, \tag{7.6}$$

де $Б_{т.а}$ = 450000 грн – балансова вартість транспортного засобу МТЗ-82 + 2ПТС-4 (б/у), грн [336, 337];

$T_{р.тр} = 1000$ год – нормативне річне завантаження трактора на відвезені коренеплодів до пункту призначення, год [334].

Тоді, згідно формули (7.6) маємо:

$$K_{ПА} = 450000 \cdot 32{,}5 / 1{,}78 \cdot 1000 = 8216{,}3 \text{ грн/га;}$$

$$K_{ПБ} = 450000 \cdot 32{,}5 / 1{,}88 \cdot 1000 = 7779{,}3 \text{ грн/га;}$$

Прямі експлуатаційні видатки $B_П$ (грн/га) складуть:

$$B_п = P_P + P_T + P_K + P_U, \tag{7.7}$$

де: $P_P$; $P_T$, $P_K$, $P_U$ – заробітна плата тракториста на операції відвезення вороху

з площі 1 га; грн/га; відповідно, питомі витрати на реновацію транспортних засобів, на планові ремонти та технічне обслуговування, на паливно-мастильні матеріали, грн/га.

При цьому, заробітна плата тракториста на операції відвезення вороху з площі 1 га $P_P$, відповідно, питомі витрати $P_T$ на реновацію транспортних засобів, на планові ремонти та технічне обслуговування $P_K$, на паливно-мастильні матеріали $P_U$ визначаються за формулою:

$$P_P = (\sum K_M \cdot r_j) / (T_Z \cdot k_e); \tag{7.8}$$

$$P_T = \frac{Б_{m.a} \cdot a_P \cdot U_k}{T_{p.mp} \cdot W_T}; \tag{7.9}$$

$$P_K = \frac{Б_{m.a} \left(R_k + R_n\right) \cdot U_k}{T_{p.mp} \cdot W_T}; \tag{7.10}$$

$$P_U = N_{mp} \cdot q_d \cdot A_d \cdot a_n \cdot K_M \cdot T_Z, \tag{7.11}$$

де $K_M$ – кількість механізаторів, які зайняті на відвезенні вороху, яку приймемо згідно розрахунків необхідної кількості транспортних засобів $N_T$ для відвезення вороху до пункту призначення, чол.;

$r_j =$ 36, 8 грн/год – погодинна ставка механізатора [338];

$k_e = 0,7$ – коефіцієнт використання експлуатаційного часу [334];

$a_P = 0,16$ – нормативний коефіцієнт амортизаційних відрахувань на реновацію [334];

$\left(R_k + R_n\right)$ = 0,34 [334], де $R_k$ – нормативний коефіцієнт щорічних відрахувань на капітальний ремонт, $R_n$ – нормативний коефіцієнт щорічних відрахувань на поточний ремонт;

$N_{mp} = 51,5$ кВт – номінальна потужність двигуна трактора [336];

$q_d =$ 0,242 кг/год – питомі витрати пального [336];

$A_d =$ 42,8 грн/кг – вартість дизельного пального [339];

$a_n = 80\%$ – середній відсоток використання потужності трактора [334].

Кількість транспортних засобів $N_T$ (шт.), які необхідні для відвезення вороху з площі 1 га визначаємо за формулою

$$N_T = U_K / B, \tag{7.12}$$

або

$$N_{TA} = 32,5 / 3,66 = 8,9 \text{ (шт.)}; \; N_M = 32,5 / 3,8 = 8,3 \text{ (шт.)}.$$

Тоді приймаємо: $N_{TA} = K_{MA} = 9$; $N_{TБ} = K_{MБ} = 8$.

Згідно з (7.8)-(7.11) маємо:

$$P_{PA} = 8 \cdot 36,8 / 2,03 \cdot 0,15 = 966,8 \text{ (грн/га)};$$

$$P_{PБ} = 9 \cdot 36,8 / 2,03 \cdot 0,15 = 1087,7 \text{ (грн/га)};$$

$$P_{TA} = 450000 \cdot 0,16 \cdot 32,5 / 1,88 \cdot 1000 = 1244,7 \text{ (грн/га)};$$

$$P_{TБ} = 450000 \cdot 0,16 \cdot 32,5 / 1,78 \cdot 1000 = 1314,6 \text{ (грн/га)};$$

$$P_{KA} = 450000 \cdot 0,34 \cdot 32,5 / 1,88 \cdot 1000 = 2645,0 \text{ (грн/га)};$$

$$P_{KБ} = 450000 \cdot 0,34 \cdot 32,5 / 1,78 \cdot 1000 = 2793,5 \text{ (грн/га)};$$

$$P_{UA} = 51,5 \cdot 0,242 \cdot 42,8 \cdot 8 \cdot 2,05 = 8748,0 \text{ (грн/га)};$$

$$P_{UБ} = 51,5 \cdot 0,242 \cdot 42,8 \cdot 9 \cdot 2,03 = 9745,5 \text{ (грн/га)}.$$

Тоді, згідно формули (7.7) прямі експлуатаційні видатки $B_П$ будуть дорівнювати:

$$B_{ПA} = 966,8 + 1244,7 + 2645,0 + 8748,0 = 13604,5 \text{ (грн/га)};$$

$$B_{ПБ} = 1087,7 + 1314,6 + 2793,5 + 9745,5 = 14941,3 \text{ (грн/га)}.$$

Таким чином, згідно формули (7.5) приведені витрати $P_B$, які необхідні для збирання коренеплодів з площі 1 га будуть становити:

$$P_{BA} = 0,15 \cdot 7779,3 + 13604,5 = 14771,4 \text{ (грн/га)};$$

$$P_{BБ} = 0,15 \cdot 8216,3 + 14941,3 = 16173,8 \text{ (грн/га)}.$$

Тоді економічний ефект $E_{1Д}$ (грн/га) від зменшення кількості домішок у зібраному воросі цукрових буряків з площі 1 га визначається за формулою

$$E_{1Д} = P_{BБ} - P_{BA}, \tag{7.13}$$

або

$$E_{1Д} = 16173,8 - 14771,4 = 1402,4 \text{ грн/га}.$$

Річний економічний ефект $E_P$ від зменшення кількості домішок у зібраному воросі цукрових буряків визначається за формулою

$$E_P = E_Д \cdot W_C, \tag{7.14}$$

де $W_C = 0,8 \cdot 8 \cdot 30 \cdot 0,7 = 134,4$ (га) – наробіток причіпної чотирирядної машини [333, 334].

Тоді економічна ефективність застосування ОТТМ на площі 134,4 га становить

$$E_{1Д} = 1402,4 \cdot 134,4 = 188482,6 \text{ грн.}$$

Економічні показники ефективності застосування ОТТМ у складі коренезбиральної машини МПК-4 зведені у табл. 7.2.

Таблиця 7.2 – Показники розрахунку економічної ефективності

| Показник | Значення показника | | Ступінь зміни показника, % |
|---|---|---|---|
| | Модерніз. | Базова | |
| Продуктивність за 1 год змінного часу на вивезенні коренеплодів, т/год | 1,88 | 1,78 | +2,9 |
| Транспортні засоби відвезення коренеплодів з 1 га, шт.. | 8 | 9 | -16,7 |
| Заробітна плата працівників на відвезенні коренеплодів з 1 га, грн | 966,8 | 1087,7 | -12,0 |
| Витрати на реновацію транспортних засобів, грн/га | 1244,7 | 1314,6 | -5,3 |
| Витрати на капітальний ремонт і технічне обслуговування, грн/га | 2645,0 | 2793,5 | -5,3 |
| Витрати на паливо-мастильні матеріали, грн/га | 8748,0 | 9745,5 | -11,2 |
| Прямі експлуатаційні видатки, грн./га | 13604,5 | 14941,3 | -10,0 |
| Приведені витрати на 1 га, грн/га | 14771,4 | 16173,8 | -8,7 |
| Економічний ефект від зменшення кількості домішок на 1га, грн/га | 1402,4 | - | - |
| Річний економічний ефект від зниження забрудненості коренеплодів, грн | 188482,6 | - | - |

Проведені економічні розрахунки підтверджують доцільність застосування ОТТМ у складі коренезбиральної машини під час збирання коренеплодів цукрових буряків.

## 7.3. Пропозиції та рекомендації застосування очисних транспортно-технологічних модулів на виробництві

Основні наукові результати дисертаційної роботи теоретичного та експериментального характеру виконані у відповідності наукових тематик, які виконувалися в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя: державні науково-технічні проекти (науково-дослідні роботи) на тему «Механіко-технологічне обгрунтування розроблення адаптованих коренезбиральних машин» (№ держ. реєстрації 0113U000254) та «Розробка та комплексне дослідження синтезованих транспортно-технологічних механізмів виробничих систем» (№ держ. реєстрації 0117U003998), які є відповідною складовою цільових державних науково-технічних програм 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 2005 р. та «Питання Міністерства розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства», затвердженої Постановою Кабінету Міністрів України від 2019 р.

Довідки, які підтверджують апробацію отриманих результатів наукових досліджень на Міжнародних науково-практичних конференціях наведено в додатках З.5.3, З.6.3. У повному обсязі дисертаційна робота була заслухана та схвалена на: розширеному науковому фаховому семінарі кафедри інжинірингу машинобудівних технологій ТНТУ ім. І. Пулюя, 2024 р.; розширеному засіданні відділу механіко-технологічних проблем овочівництва Інституту механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України, с-ще Глеваха, Київська обл., 2024 р., додаток З.7.3.

Отримані результати аналітично-емпіричних досліджень передано інженерним працівникам і науковцям Львівської філії Державної наукової установи «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки та технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого» (Львівська обл., с. Магерів) та Хмельницької державної сільськогосподарської дослідної станції Інституту кормів та

сільського господарства Поділля Національної академії аграрних наук України (Хмельницька обл., с. Самчики), додаток З.8.З, З.9.З.

Очисний транспортно-технологічний модуль застосовано в технологічній лінії приготування кормів для сільськогосподарських тварин виробничої компанії ПАП «Агропродсервіс» (Тернопільська обл., с. Настасів), додаток З.10.З.

Часткові результати, а саме конструкції ОТТМ, теоретичні, експериментальні та графічні моделі, які безпосередньо обґрунтовують параметри робочих органів ОТТМ застосовуються в навчальному процесі кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машини Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя під час викладання дисципліни «Сільськогосподарські машини: конструкції та розрахунок», додаток З.11.З.

Основні рекомендовані для виробництва конструктивно-кінематичні параметри робочих органів ОТТМ наведені у табл. 7.3.

Таблиця 7.3. Рекомендовані виробництву параметри робочих органів ОТТМ

| Рекомендовані параметри робочих органів | Значення параметрів |
|---|---|
| ОТТМ, рис. 2.9 | |
| Швидкість руху горизонтального транспортера, м/с | 1,6 |
| Діаметр шнека модуля, м | 0,6 |
| Крок шнека, м:<br>- кормові буряки<br>- цукрові буряки, коренеплоди цикорію | <br>0,7<br>0,5 |
| Висота витків шнека, м | 0,25 |
| Швидкість руху очисної гірки, м/с | 1,3 |
| Кут встановлення очисної гірки, град. | 55 |
| Діаметр шнека круглі/еліпсні, м | 0,2/0,18 |
| Частота обертання шнека, об/хв | 180 |
| Висота рифа шнека, м | 0,3 |
| Крок рифа шнека, м:<br>- кормові буряки<br>- цукрові буряки, коренеплоди цикорію | <br>0,45<br>0,35 |

| | |
|---|---|
| Діаметр приводного очисного вала, м | 0,4 |
| ОТТМ, рис. 2.10 | |
| Швидкість руху похилого транспортера | 1,6 |
| Швидкість руху очисної гірки, м/с | 1,3 |
| Кут встановлення очисної гірки, град. | 55 |
| Діаметр шнека круглі/еліпсні, м | 0,2/0,18 |
| Частота обертання шнека, об/хв | 180 |
| Висота рифа шнека, м | 0,3 |
| Крок рифа шнека, м:<br>- кормові буряки<br>- цукрові буряки, коренеплоди цикорію | <br>0,45<br>0,35 |
| Діаметр приводного очисного вала, м | 0,4 |
| Частота обертання очисних елементів, об/хв | 700 |

Як окремі транспортно-технологічні модулі, яким є запропоновані ОТТМ, необхідно застосовувати для модернізації очисних систем існуючих причіпних (начіпних) 3-х та 4-х рядних коренезбиральних машин, копачів-валкоутворювачів і підбирачів-навантажувачів, які реалізують двофазний (прямий або валковий) спосіб збирання коренеплодів різними типами машин для виконання збиральних робіт у невеликих фермерських господарствах (площа збирання 30…50 га) [340]:

- прямий спосіб: перша фаза – збирання гички, друга фаза – викопування, очищення коренеплодів від домішок і їх завантаження в транспортний засіб;

- валковий спосіб: перша фаза – збирання гички з укладанням викопаних коренеплодів у валок; друга фаза – підбирання, очищення коренеплодів від домішок і їх завантаження в транспортний засіб (підбирач-навантажувач ПНБВ-1,6 (Борекс), АЗК-6-03 («Уманьфермаш), зарубіжні підбирачі-навантажувачі, наприклад, фірми «Кляйне» (Німеччина), «Moreau» (Франція).

Наявні комплекси машин у достатній мірі задовольняють необхідні показники якості їх роботи згідно з агротехнічними вимогами під час збирання крупних коренеплодів (показники викопування та очищення коренеплодів цукрових і кормових буряків, показники очищення коренеплодів цикорію) в умовах нормальної вологості грунту (19-22%) та стійких нормальних природно-кліматичних показників умов роботи коренезбиральних машин.

Але за умов сухого (зменшеної вологості грунту від 18 до 15% ) або перезволоженого грунту (збільшеної вологості грунту від 23 до 26%) очисні робочі органи наявних очисників не задовольняють необхідні функціональні показники якості роботи або відокремлення структурних компонентів домішок від коренеплоді згідно з існуючими вимогами, які регламентовані агротехнічними вимогами до коренезбиральних машин.

При цьому: за збільшеної вологості грунту у викопаному воросі є наявна значна кількість грудок грунту та налиплого грунту на коренеплодах, які в загальному важко піддаються руйнуванню та зскрібанню; за зниженої вологості грунту у викопаному воросі присутня значна кількість вільного грунту, який неспроможний просіюватися через сепарувальні зазори внаслідок підвищення липкості грунту.

Тому запропоновані ОТТМ рекомендується застосовувати в складі коренезбиральних машин, які призначені для збирання крупних коренеплодів у важких умовах збирання – підвищеної вологості грунту та погіршених природно-кліматичних умовах роботи збиральних комплексів.

ОТТМ з еліпсними 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.

### 7.4. Висновки до розділу

7.4.1. 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.

7.4.2. Річний економічний ефект від впровадження ОТТМ у складі коренезбиральної машини складає 188482,6 грн. а застосування ОТТМ раціональне в умовах надмірної вологості грунту та погіршених природно-кліматичних умовах роботи коренезбиральних машин.

Основні результати досліджень розділу опубліковано в працях [329, 332].

# 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 (ґрунту – 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 і 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/ м$^2$ (60-120 ц/га) й урожайності коренеплодів 2,5 кг/м$^2$.

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 раза; для другої (***2***) ділянки – приблизно в 1,2 раза; для *k*-ї ділянки – приблизно в 1,1 раза.

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 грунту 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 грунту 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 грунту 20…22%; швидкості руху коренезбиральної машини – до 6…7 км/год; коренеплоди цикорію: частоти обертання шнекового конвеєра 140…150 об/хв; вологості грунту 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 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 грунтові домішки – у середньому в 1,7 раза; налиплий грунт 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 грунту за погіршення природно-кліматичних умов під час роботи коренезбиральних машин.

# СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Погорелый Л.В. Свеклоуборочные машины: история, конструкция, прогноз. К.: Феникс, 2004. 231 с.

2. Барановський В.М. Основні етапи та сучасні тенденції розвитку коренезбиральних машин. Вісник Тернопільського національного технічного університету. 2006. № 11(2). С. 67 – 75.

3. Сучасні тенденції розвитку конструкції сільськогосподарських машин / Під ред. Кравчука В.І., Грицишина М.І., Коваля С.М. К.: Аграрна наука, 2004. 353 с.

4. Karwowski T. Pure agricultural machinery technology. Theory and construction of agricultural machines. Root crop harvesting machines. Berlin, 1974. 287 p.

5. Гуков Я.С., Грицишин М.І. Стан механізації сільськогосподарського виробництва в Україні. Механізація сільськогосподарського виробництва. 2003. Т. XIV. С.64 – 70.

6. Барановський В. М. Механіко-технологічні основи розроблення адаптованих коренезбиральних машин : дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук : 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва / Барановський Віктор Миколайович. Тернопіль, 2013. 401 с.

7. Барановський В.М. Напрямки вдосконалення шнекових очисників вороху / В.М. Барановський, М.Р. Паньків, О.В. Барановський, О.М. Постол. Науковий вісник НАУ. 2005. Вип. 80. Частина 1. С. 249 – 255.

8. Волоха М. П. Підвищення якості цукросировини шляхом інтенсифікації очищення коренеплодів при їх викопуванні. Наукові горизонти. 2020. № 9 (94). С. 18 – 24.

9. Курило В. Л., Волоха М. П., Войтюк П. О. Удосконалення технологій вирощування і збирання цукрових буряків. Цукрові буряки. 2005. № 5 (47). С. 20 – 21.

10. Калетнік Г.М. Основи перспективних технологій виробництва продукції тваринництва / Г.М. Калетнік, М.Ф. Кулик. В.Ф. Петриченко та ін. ; під ред. Г.М. Калетніка, М.Ф. Кулика. В.Ф. Петриченка, В.Д. Хорішка. Вінниця : Ензоніс, 2007. 584 с.

11. Братішко В.В. Механіко-технологічні основи приготування повнораціонних комбікормів гвинтовими грануляторами : автореф. дис. докт. технічних наук : спец. 05.05.11 – машини та засоби механізації сільськогосподарського виробництва / В.В. Братішко ; Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства». Глеваха, 2017. 43 с.

12. Валієв Т.О., Поліщук В.М. Генерація біогазу при поступовому завантаженні субстрату в біогазові установки : тез доп. X Міжн. наук.-техн. конф. «Крамаровські читання» з нагоди 116-ї річниці від дня народження д.т.н., професора, чл.-кор. ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) 23-24 лют. 2023 р., м. Київ. – К.: Вид. центр НУБіП України, 2023. С. 294 – 296.

13. Дубровин В. Идентификация процесса разработки адаптированной корнеуборочной машины / В. Дубровин, Г. Голуб, В. Барановский, В. Теслюк. Commission of motorization and energetics in agriculture, MOTROL. 2013. № 15(3). P. 243 – 255.

14. Дубровін В.О. Механіко-технологічне обґрунтування диференціації засобів механізації оранки: дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук : 05.20. 01 – механізація сільськогосподарського виробництва / Дубровін Валерій Олександрович. Глеваха, 1997. 347 с.

15. Барановський В.М., Паньків М.Р., Дубчак Н.А. Аналіз процесу роботи доочисних пристроїв коренезбиральних машин. Науковий журнал. Вісник ТДТУ. Тернопіль, 2007. Том 12. № 1. С. 76 – 81.

16. Smith D.W., Sims B.G., O'Neill D.H. Testing and evalution of agricultural machinery and equioment. FAO Agricultural services bulletin. 1994. No 110. P. 288.

17. Bulich C. Biotechnische Einflussfaktoren auf die Köpfgualität von Zuckerrüben: inang. diss…/ C. Bulich. Bonn, 1990. 153 s.

18. Mindin R.D. Calculation of mass descriptions of root crops. Proc. First. at. Cong. Appl. Mech. Chicago. 2003. P. 25 – 30.

19. Паньків М.Р., Дубчак Н.А., Барановський В.М. Очисна система вороху коренеплодів. Вісник ХНТУСГ. “Механізація сільськогосподарського виробництва”. Х.: 2007. Вип. 59. Том 1. С. 33 – 36.

20. 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.

21. Герасимчук Г.А. Основи розроблення робочих органів комбінованих систем коренезбиральних машин : монографія / Г.А. Герасимчук, В.М. Барановський, А.Ю. Виговський, М.В. Потапенко, О.Ю. Скальський. К. : ЦП Компринт, 2016. 286 с.

22. Скальський О.Ю. Обгрунтування параметрів комбінованого копача коренеплодів цикорію : дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва / Скальський Олександр Юрійович. Тернопіль, 2019. 243 с.

23. Береженко Є.Б. Обгрунтування параметрів робочих органів гичкозбирального модуля : дисертація на здобуття ступеня доктора філософії : 133 – Галузеве машинобудування / Береженко Євген Богданович. Тернопіль, 2021. 217 с.

24. Барановський В.М. Енергоощадний спосіб збирання гички коренеплодів / Барановський В.М., Паньків М.Р., В.В.Теслюк, Ч.В. Пулька. Всеукр. наук.-техн. журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК». Вінниця : ВНАУ, 2016. №. 3 (95). С. 21 – 26.

25. 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.

26. Baranovskiy V., Pankiv M., Dubchak N. Experimental research of stripping the leaves from root crops. Acta Technologica Agriculturae. Nitra : Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae. 2017. Vol. 20. Is. 3 (Sep 2017). P. 69 – 73.

27. Baranovskiy V.M., Pankiv M.R., Skalsky O.Yu., Pastushenko A.S. Chicory root crops combined harvester. INMATEH – Agricultural Engineering. 2017. Vol. 53. No. 3/2017. P. 41 – 50.

28. 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.

29. Барановський В.М., Паньків М.Р., Герасимчук Г.А. Обгрунтування основних параметрів комбінованого однодискового копача коренеплодів. Зб. наук. праць Вінницького націон. аграр. ун-ту. Серія: Технічні науки. Вінниця : ВНАУ, 2011. № 6. С. 29 – 36.

30. Потапенко М.В. Обгрунутування параметрів очисної системи вороху коренеплодів цикорію : дисисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних. наук : спеціальність 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва / Потапенко Микола Валентинович. Бережани, 218. 259 с.

31. Волоха М.П. Принципи моделювання технологічних процесів виробництва цукрових буряків. Електронне видання. Проблеми екологічної біотехнології. НУБіП України, 2013. №. 2. Режим доступу: http://ecobio.nau. edu.ua/index.php/ecobiotech/article/view/5503/6215

32. Мартынов В.М. Проектирование рабочих органов и машин для уборкп корнеплодов : монографія. Уфа : Изд-во Башкирского ГАУ, 2011. 250 с.

33. Організація збирання цукрових буряків : електронний ресурс : https://propozitsiya.com/ua/organizaciya-zbirannya-cukrovih-buryakiv

34. Смолінський С., Смолінська А., Марченко В. Чим збирати солодкі корені. Пропозиція. 2017. №. 9. С. 18 – 25.

35. Татьянко Н.В., Погорелый Л.В., Цымбал А.Г. Раздельная уборка сахарной свеклы. Сахарная свекла. 1972. № 1. С. 24 – 28.

36. Примак І.Д., Гудзь В.П. Операційні технології вирощування кормових культур. К.: Урожай, 1995. 286 с.

37. Волоха М.П. Технологічний комплекс машин для виробництва буряків цукрових: ширина міжрядь. Теорія, моделювання, результати випробувань : монографія. Київ : ТОВ Центр учбової літератури, 2015. 220 с.

38. Підгурський М.І. Методи прогнозування ресурсу несучих і функціональних систем бурякозбиральних комбайнів : дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук : 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва / Підгурський Микола Іванович. Тернопіль, 2007. 395 с.

39. Пришляк В.М. Дослідження особливостей механізованого збирання кормових буряків і наукові основи поліпшення цього процесу : електронний ресурс : http://repository.vsau.org/getfile.php/3636.pdf

40. Сидорчук О.В. Структурний аналіз проектів технологічних систем збирання врожаю / О.В.Сидорчук, В.Л. Пукас, П.М. Луб, А.О. Шарибура. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами. 2018. № 2(1278). С. 10 – 15.

41. Адамчук В.В., Баранов Г.Л., Барановський О.С. Сучасні тенденції розвитку сільськогосподарської техніки. К. : Аграрна наука, 2004. 396 с.

42. Кравчук В.І., Мельник Ю.Ф. Машини для збирання зернових та технічних культур. Дослідницьке : УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, 2009. 296 с.

43. Булгаков В.М. Теорія бурякозбиральних машин :монографія. Київ: Видавничий центр НАУ, 2005. 245 с.

44. https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/%D0%97%D1%96%D0%BD%D1%87%D1%83%D0%BA%20%D0%9C.%D0%86/other/lekcziya_11_fizichni_vlastivosti_gruntiv.pdf

45. Зуев Н.М. Исследование качества работы свеклоуборочных комбайнов в зависимости от агрофизических свойств сахарной свеклы при различных способах формирования растений : автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : спец. 05.20.01 – механизация сельскохозяйственного производства / Н.М. Зуев. Харьков, 1971. 20 с.

46. Мартиненко В.Я. Розробка конструкцій і визначення експлуатаційних параметрів очисників головок коренеплодів : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.20.01 – механізація сільськогосподарського виробництва / В.Я. Мартиненко. Тернопіль, 1992. 153 с.

47. 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.

48. Фомічов А.М. Кормові коренеплоди. К.: Урожай, 1987. 248 с.

49. 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, Andrii Babii, Myroslav Burda. Scientific Journal of TNTU. Tern.: TNTU, 2021. Vol. 104. No 4. P. 74 – 86.

50. Барановський В.М., Підгурський М.І., Паньків М.Р. Методологічні та конструктивно-технологічні аспекти розроблення адаптованих коренезбиральних машин. Вісник Тернопільського національного технічного університету. 2014. № 2(74). С. 106 – 113.

51. Гевко Б.М. Технологія сільськогосподарського машинобудування / Гевко Б.М. та ін. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2015. 420 с.

52. Мироненко В.Г. Технічні засоби забезпечення якості виконання технологічних процесів у рослинності : монографія. К.: Національний аграрний університет, 2005. 202 с.

53. Гевко Р.Б. Системи доочищення коренеплодів при їх механізованому збиранні : монографія / Р.Б. Гевко, І.Г. Ткаченко, Р.М. Рогатинський, С.В. Синій та ін. Тернопіль : Осадца Ю.В., 2020. 216 с.

54. Головач І.В., Гнучій Ю.Б. Математичне моделювання технологічних процесів у агровиробництві : монографія. К.: ЦП КОМПРИНТ, 2013. 490 с.

55. Шабельник Б.П. Механико-технологические основы процесса очистки корнеплодов от почвы на корнеуборочных машинах : автореф. дис. на соискание уч. степени докт. техн. наук : спец. 05.20.01 – механизация сельско-хозяйственного производства / Б.П. Шабельник. Ростов-на-Дону, 1986. 43 с.

56. Булгаков В.М. Теоретичне обґрунтування процесу переміщення та сепарації коренеплодів стрічковими транспортерами / В.М. Булгаков, Р.Б. Гевко, Ю.Б. Гладьо, І.І. Павх. Збірник наукових праць Національного аграрного університету. “Сучасні проблеми механізації сільського господарства”. Том 5. Київ: НАУ, 1999. С. 15 – 18.

57. Гевко Р.Б. Викопувально-очисні пристрої бурякозбиральних машин. Тернопіль : Поліграфіст, 1997. 202 с.

58. Гевко Р.Б. Напрямки вдосконалення транспортно-сепаруючих органів коренезбиральних машин / Р.Б. Гевко, Ю.Б. Гладьо, І.І. Павх. Вісник Тернопільського державного технічного університету. Том 4. № 1. Тернопіль: ТДТУ, 1999. С. 152 – 156.

59. Гевко Р.Б. Розрахунок конструктивно-кінематичних параметрів стрічкового транспортера / Р.Б. Гевко, І.І. Павх, Ю.Б. Гладьо, І.Г. Ткаченко. Сільськогосподарські машини. Луцьк: ЛДТУ, 1999. Вип. 5. С. 48 – 55.

60. Данильченко М.Г. Розробка і дослідження шнекових та роторних очисників коренеплодів бурякозбиральних комплексів : дисертація на здобуття наук. ступеня кандидата технічних наук: 05.20.04 / Данильченко Михайло Григорович. Тернопіль, 1992. 153 с.

61. Барановський В.М. Основи розроблення адаптованих транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин : монографія / В.М. Барановський, М.І. Підгурський, М.Р. Паньків, В.В. Теслюк, В.Б. Онищенко. Видавництво Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя, 2014. 351 с.

62. Сарапулов А.К. Исследование процесса очистки корней от земли при уборке сахарной свеклы : автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : спец. 05.20.01 – механизация сельскохозяйственного производства / А.К. Сарапулов. К.: УСХА, 1965. 20 с.

63. Булгаков В., Головач І. Розробка математичної моделі вилучення коренеплоду з ґрунту. Техніка АПК. 2006. Том 1. С. 36 – 38.

64. Wei Z., Li H., Sun C., Li X., Su G., Liu W. Design and experiment of potato combined harvester based on multi-stage separation technology. Nongye Jixie Xuebao. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery. 2019. Vol. 50 (1). P.129 – 140.

65. ДСТУ 2258-93. Машини бурякозбиральні. Київ : Держстандарт України,1993. 18 с.

66. КД 46.16.01.005 – 93 “Випробування сільськогосподарської техніки. Основні положення”. К., 2003. 34 с.

67. Рамш В.Ю. Обгрунтування параметрів комбінованого очисника вороху цукрових буряків : дисисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: спеціальність 05.05.11 / Рамш Василь Юрійович. Тернопіль, 2012. 237 с.

68. Влас Н.Є. Обґрунтування параметрів гвинтового циліндричного сепаратора з радіально зміщеними геометричними осями шнеків : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва / Влас Наталя Євгенівна. Тернопіль, 2004. 182 с.

69. Вплив рівня техніко-технологічного забезпечення на ефективність виробництва цукрових буряків / М.І. Грицишин, М.Г. Цибуля, Н.М. Коньок, Г.М. Бражевська. Вісник аграрної науки. 2011. № 9. С. 37 – 40.

70. Ziegler K. Trends in sugar beet harvesting technology. Agritechnika, 2019. 217 p.

71. 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. Науковий журнал. Вісник Інженерної Академії України. 2014. Вип. 3-4. С. 46 – 52.

72. Паньків М.Р., Гевко Іг.Б. Кінематичний режим роботи гвинтово-еліпсного сепаратора. Вісник ХДТУСГ “Механізація сільськогосподарського виробництва”. 2003. Вип. 17. С. 197 – 203.

73. Гандзюк М.О. Розробка конструкції та обгрунтування параметрів доочисника коренеплодів: дис…кандидата техн. наук : спец. 05.05.11 – машини та засоби механізації сільськогосподарського виробництва / Гандзюк Микола Олексійович. Луцьк, 2002. 163 с.

74. Voytyuk V., Olijnyk E. Trends in the constructive improvement of combined purifiers of the hulls of root crops chicory. Innovative solutions in modern science. 2019. No. 8(35). P. 16 – 30.

75. Паньків М.Р. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів гвинтово-еліпсного очисника коренезбиральних машин : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва / Паньків Марія Романівна. Тернопіль, 2003. 235 с.

76. Hevko R., Zalutskyi S., Tkachenko I., Lyashuk O. Design development and study of an elastic sectional screw operating tool. Acta Polytechnica. 2021. Vol. 61(5). P. 624 – 632.

77. Hevko R.B., Tkachenko I.G., Synii S.V., Flonts I.V. Development of design and investigation of operation processes of small-sclale root crop and potato harvesters. INMATEH : Agricultural Engineering. 49/2. 2016. p. 53 – 60.

78. Тунік І.Г. Розробка та обґрунтування параметрів доочисних транспортерів коренезбиральних машин : дис. на здобуття наукового ступення канд. техн. наук : спеціальність 05.05.11. Луцьк : ЛДТУ, 2000. 149 с.

79. 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.

80. Теслюк В.В., Барановський В.М., Хаєцький А.М. Обгрунтування технологічного процесу очищення вороху коренеплодів кормових буряків : тези доп. XXI Міжнародної наукової конференції „Сучасні проблеми землеробської механіки”. Харків : ХНТУСГ, 2020. С. 175 – 176.

81. Барановський В.М. Конструктивно-технологічні принципи адаптації транспортно-очисного комбінованого робочого органу коренезбиральних машин. Сільськогосподарські машини. 2013. № 13. С. 18 – 24.

82. 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.

83. Патент на корисну модель 8017 Україна, МПК A 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.

84. Патент на корисну модель 14391 Україна, МПК A 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.

85. Патент України 7358, МПК A 01D 33/08. Пристрій для відокремлення домішок від коренеплодів / О.П. Гурченко, В.М. Барановський, А.Ф. Завгородній, Л.О. Гурченко; заявник і власник Інститут механізації та електрифікації сільського господарства Української академії аграрних наук; № 4672819/SU; заявл. 03.04.1989; опубл. 29.09.1995. Бюл. № 3/1995. 6 с.

86. Патент на корисну модель 34881 Україна, МПК A 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 імені Івана Пулюя; № u200803995; заявл. 31.03.2008; опубл. 26.08.2008. Бюл. № 16/2008. 4 с.

87. Патент на корисну модель 643572 Україна, МПК A 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.

88. Патент на корисну модель 64373 Україна, МПК A 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.

89. Патент на корисну модель 64631 Україна, МПК A 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.

90. Патент на корисну модель 65050 Україна, МПК A 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.

91. Патент на корисну модель 65051 Україна, МПК A 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.

92. Патент на корисну модель 72184 Україна, МПК A 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. 4 с.

93. Патент на корисну модель 73137 Україна, МПК A 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.

94. Патент на корисну модель 74625 Україна, МПК A 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.

95. Патент на корисну модель 74629 Україна, МПК A 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.

96. Патент на корисну модель 77981 Україна, МПК A 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.

97. Патент на корисну модель 80477 Україна, МПК A 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів / О.О. Труханська, В.М. Барановський, Н.А. Дубчак, В.Р. Паньків; заявник і власник Вінницький національний аграрний університет; № u201300245; заявл. 08.01.2013; опубл. 27.05.2013. Бюл. № 10/2013. 4 с.

98. Патент на корисну модель 80478 Україна, МПК A 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.

99. Патент на корисну модель 80479 Україна, МПК A 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.

100. Патент на корисну модель 144339 Україна, МПК A 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів. Барановський В.М., Паньків М.Р., Марченко Л.О., Олійник Є.О, Паньків В.Р., Герасимчук Г.А.; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; № u202001766; заявл. 13.03.2020; опубл. 25.09.2020. Бюл. № 18/2020. 4 с.

101. Труханська О.О. Обгрунтування параметрів і режимів роботи комбінованої системи очистки коренеплодів : дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : спеціальність 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва / Труханська Олена Олександрівна. Вінниця : Вінницький національний аграрний університет, 2015. 219 с.

102. Патент на корисну модель 82076 Україна, МПК A 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.

103. Патент на корисну модель 82076 Україна, МПК A 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

104. Патент на корисну модель 88194 Україна, МПК A 01D 33/08. Пристрій для очистки коренеплодів від домішок / О.О. Труханська, Д.Г. Кондратюк, В.М. Барановський, І.Є. Кравченко; заявник і власник Вінницький національний аграрний університет; № u201308495; заявл. 08.07.2013; опубл. 11.03.2014. Бюл. № 5/2014. 4 с.

105. Bulgakov V. Study of the oscillation processes of a front-mounted haulm harvester when it moves on the inequalities of the ground surface / V. Bulgakov, O. Trokhaniak, I. Holovach, Z. Ruzhylo, Ye. Ihnatiev, O. Dubrovina. VII International scientific conference «Conserving soils and water» 24-27.08.2022. Varna, Bulgaria, 2022. P. 18 – 22.

106. Дубчак Н.А. Обгрунтування параметрів і режимів роботи очисника вороху кормових буряків : дисертація на здобуття наукового ступеня канидат технічних наук : спеціальність 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва / Дубчак Наталя Андріївна. Тернопіль, 2011. 215 с.

107. Kanafojski Cz., Karwowski T. Teoria i konstrukcja maszyn rolniczych. Maczyny do zbioru ziemioplodow. Warszawa: PWRiL, 1972. T. 2. 233 str.

108. 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.

109. 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.

110. Лурье А.Б. Моделирование сельскохозяйственных агрегатов. Л.: Колос, 1979. 312 с.

111. Ковбаса В.П. Механіко-технологічне обгрунтування оптимізації взаємодії робочих органів з грунтом : дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук : 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва / Ковбаса Володимир Петрович. Національний аграрний університет. К., 2006. 324 с.

112. Кушнарьов А.С. Чорна Т.С. Енергетична концепція розвитку систем технологій в землеробстві. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. Видавництво ТДАТУ : Мелітополь, 2016. Вип. 6. Т. 3. С. 41 – 71.

113. Ляшук О.Л. Науково-прикладні основи створення транспортно-технологічних механізмів неперервної дії сільськогосподарських машин : дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук : 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва / Ляшук Олег Леонтійович. Тернопіль: ТНТУ, 2015. 451 с.

114. Нагорный Н.Н. Энергетическая оценка почвообрабатывающих орудий /Н.Н. Нагорный, М.П. Белоткач// Тракторы и сельхозмашины. 1980. № 7. С. 15 – 17.

115. Механізація, електрифікація та автоматизація сільськогосподарського виробництва: підручник [у 2-х т.]: рекомендовано М-вом аграр. політики / А.В. Рудь, І.М. Бендера, Д.Г. Войтюк, …, А.І. Панченко; за ред. А.В. Рудя. К.: Агроосвіта. 2012. Т.1. 584 с. Т.2. 432 с.

116. Рибак Т.І. Пошукове конструювання на базі оптимізації ресурсу мобільних сільськогосподарських машин : монографія. Тернопіль: Збруч, 2003. 332 с.

117. Рогатинський Р.М. Механіко-технологічні основи взаємодії шнекових робочих органів з продуктами сільськогосподарського виробництва : дис. на здобуття наук. ступеня доктора технічних наук : 05.20.01 / 05.05.05 – механізація сільськогосподарського виробництва / підіймально-транспортні машини / Рогатинський Роман Михайлович. Київ : НАУ, 1997. 425 с.

118. Хайліс Г.А., Коновалюк Д.М. Основи проектування і дослідження сільськогосподарських машин. К.: НМК ВО, 1991. 200 с.

119. Козаченко О.В. Дослідження витрат механічної енергії сільськогосподарськими машинами на вирощування продукції рослинництва. Механізація та електрифікація сільського господарства. Міжвідомчий збірник тематичних наукових праць. 2004. Вип. 88. С. 91 – 98.

120. Паньків М.Р., Паньків В.Р. Оптимізаційний синтез компонувальних схем технологічних систем : мат. XV наук.-практ. конф. ТНТУ, 2012. С. 71.

121. Надикто В. Основи наукових досліджень. Херсон: ОЛДІ-Плюс, 2017. 268 с.

122. Antille D.L., Peets S., Galambošová J., Botta G.F., Rataj V., Macak M., Tullberg J.N., Chamen W.C.T., White D.R., Misiewicz P.A., Hargreaves P.R., Bienvenido J.F. & Godwin R.J. Review: Soil compaction and controlled traffic farming in arable and grass cropping systems. Agronomy Research. 2019.Vol. 17(3). P. 653 – 682.

123. Hevko R., Rohatynskyi R., Hevko M., Lyashuk O., Trokhaniak O. Investigation of sectional operating elements for conveying agricultural materials. Research in Agricultural Engineering. 2020. Vol. 66(1). P. 18 – 26.

124. Manjula E.V.P.J., Hiromi W.K. Chandana A.B., Melaaen M.C. A review of CFD modelling studies on pneumatic conveying and challenges in modelling offshore drill cuttings transport. Powder Technology. 2017. No. 305. P. 782 – 793.

125. Ямков О.В. Обґрунтування параметрів технологічного процесу і робочих органів бурякозбирального агрегату з системним трактором : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва / О.В. Ямков. К., 2007. 20 с.

126. Смолінський С. Моделювання подачі грунтових домішок робочими органами картоплезбиральних машин. Вісник Львівського національного аграрного університету. «Агроінженерні дослідження». ЛНАУ, 2008. № 12(2). С. 332 – 336.

127. Kozachenko O., Pahuchiy A. Modeling of interaction with plants linseed occupancy drum TEKA. An International quarterly journal on motorization, Vehicle operation, energy efficiency and mechanical engineering. 2019. Vol. 19. No. 1. P. 59 – 64.

128. Baranovsky V.M., Potapenko M.V. Theoretical analysis of the technological feed of lifted root crops. INMATEH – Agricultural Engineering. 2017. Vol. 51(1). С. 29 – 38.

129. Бабій А.В. Методи розрахунку ресурсу і вдосконалення конструкцій широкозахватних штанг сільськогосподарських обприскувачів : дис. на здобуття наук. ступеня доктора технічних наук : 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва / Бабій Андрій Васильович. Тернопіль, 2021. 356 с.

130. Гудь В.З. Механіко-технологічні основи розроблення багатофункціональних секційних шнеків для зернового матеріалу : дис. на здобуття наук. ступеня доктора технічних наук : 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва / Гудь Віктор Зіновійович. Тернопіль, 2021. 410 с.

131. Гевко Б.М. Научные основы разработки винтовых транспортирующих механизмов сельскохозяйственных машин : дис. на соискание науч. степени докт. техн. наук : спец. 05.20.01 – механизация сельскохозяйственного производства / Гевко Богдан Матвеевич. Ростов-на-Дону, 1987. 450 с.

132. Špokas L., Adamčuk V., Bulgakov V., Nozdrovický L. The experimental research of combine harvesters. Research in Agriculture Engineering. 2016. Vol. 62. P. 106 – 112.

133. Адамчук В.В. Малогабаритні сільськогосподарські машини (конструкція, теорія і розрахунок : монографія / В.В. Адамчук, І.В. Головач, М.В. Усенко, Г.Д. Калетнік. 2016

134. Калетнік Г. Про концепцію сучасного розвитку вітчизняної сільськогосподарської техніки / Г. Калетнік В. Адамчук, В. Булгаков, В. Кравчук. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: збірник наук. пр. / ДНУ «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого». Дослідницьке, 2014. Вип. 18 (32). Кн. 1. С. 19 – 28.

135. Bulgakov V., Ivanovs S., Adamchuk V., Smolinskyi S. Theoretical studies of interaction of the drum cleaner with the sugar beet head. Res. Agr. Eng. 2018. Vol. 64. P. 143 – 150.

136. Herasymchuk H.A., Baranovsky V.M., Herasymchuk O.O., Pastushenko A.S. Analytical research results of the combined root digger. INMATEH-Agricultural Engineering. Vol. 54. No. 1/2018. P. 63 – 72.

137. 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.

138. Василенко А.А. Шляхи створення радянського бурякозбирального комбайна. Наукові праці інституту машинознавства і сільськогосподарської механіки. 1950. Том II. 54 с.

139. Василенко П.М. Введение в земледельческую механику К.: Сільгоспосвіта, 1996. 241 с.

140. Василенко П.М. Вибрационный способ уборки корнеплодов. Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. 1970. № 2. С. 9 – 13.

141. Шабельник Б.П., Мартынов В.М., Полупанов В.Н. Обобщенный критерий оптимизации рабочего процесса свеклоуборочной машины. Тракторы и сельхозмашины. 1987. № 10. С. 40 – 42.

142. Мартынов В.М. Разработка технологии и универсальных технических средств с многофункциональными рабочими органами для уборки свеклы : дис. на соискание уч. степени докт. техн. наук : 05.20.01 – технология и средства механизации сельского хозяйства / Мартынов Владимир Михайлович. Уфа, 2012. 376 с.

143. Підгурський М.І., Барановський В.М., М.І., Паньків М.Р. Технологічні аспекти розроблення модулів транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин. Вісник Львівського національного аграрного університету : агроінженерні дослідження. Львів : Львів. нац. аграр. ун-т, 2018. № 22. С. 65 – 76.

144. Теслюк Віктор, Барановський Віктор, Онищенко Володимир. Алгоритм розроблення адаптованих коренезбиральних машин. Сучасні проблеми землеробської механіки: зб. наук. праць XVIII міжн. наук. конф. (16-18 жовт. 2017 р., м. Кам'янець-Подільський). Тернопіль : Крок, 2017. С. 15 –18.

145. Булгаков В.М. Совершенствование технологического процесса и машин для уборки корнеплодов свеклы : автореф. дис. на соискание уч. степени доктота технических наук в форме научного доклада : спец. 05.20.01 – механизация сельскохозяйственного производства / В.М. Булгаков. М.: ВИСХОМ, 1993. 61 с.

146. Волоха М.П. Моделювання механізованих технологічних процесів вирощування і збирання буряків цукрових : дис. на здобуття наук. ступеня докт. технічних наук : 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва / Волоха Микола Петрович. Київ, 2020. 343 с.

147. Войтюк Д.Г. Универсальный комплекс свеклоуборочных машин для фермерских хазяйств. Вісник аграрної науки. 1995. № 9. С. 93 – 98.

148. Гевко Р.Б., Ткаченко І.Г., Павх І.І. Система машин і механізмів АПК. Тернопіль, 2002. 264 с.

149. Погорелый Л.В. Технологические и технические основы совершенствования механизированных процессов уборки сахарной свеклы : автореф. дисс. на соиск. уч. степени докт. техн. наук : спец. 05.20.01 – механизация сельскохозяйственного производства / Л.В. Погорелый. К., 1974. 41 с.

150. Полупанов В.М. Розробка викопувально-сепаруючого пристрою машини для збирання коренеплодів кормового буряка та обґрунтування його параметрів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва / В.М. Полупанов. Харків, 2003. 20 с.

151. Хелемендик М.М. Підвищення механіко-технологічної ефективності трудомістких процесів у буряківництві : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.20.01 – механізація сільськогосподарського виробництва / М.М. Хелемендик. Луцьк, 1996. 33 с.

152. Mawla, H.A.; Yehia, I.; El Lithy, A.M.; Faisal, A. An appropriate sugar-beet harvesting mechanization for big-scale project. MISR J. Agric. Eng. 2012. Vol. 29. P. 1213 – 1238.

153. 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.

154. Viktor Baranovsky, Olena Truchanska, Maria Pankiv, Valentina Bandura. Research of a contact impact of a root crop with a screw auger. Research in Agricultural Engineering (RAE). Czech Academy of Agricultural Sciences. 2020. No. 66 (2020). P. 33 – 42.

155. Пришляк В.Н. Разработка и обоснование параметров стабилизирующего устройства самоходных кореуборочных машин для работы на склонах : автореф. дисс. на соиск. науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.20.01 – механизация сельскохозяйственного производства / В.Н. Пришляк. К. : НАУ, 1990. 24 с.

156. Барановський В.М. Математична модель інтенсифікації процесу відокремлення домішок від коренеплодів. Науковий вісник НУБіПУ. Серія «Техніка та енергетика АПК». К., 2014. Вип. 196. Ч. 1. С. 196 – 204.

157. Барановський В.М. Основні етапи та загальні принципи сучасних тенденцій розвитку коренезбиральних машин. Науковий журнал. Вісник Тернопільського державного технічного університету ім. І Пулюя. 2006. Том. 11. № 2. С. 67 – 75.

158. Гевко Р.Б. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів робочих органів бурякозбиральних машин: дисертація на здобуття наукового ступеня докора технічних наук: спеіальність. 05.05.11 – машини та засоби механізації сільськогосподарського виробництва / Гевко Роман Богданович. К.: НАУ, 2000. 362 с.

159. Hevko R.B., Tkachenko I.G., Hlado Y.B., Sinii S.V., Gandziuk M.O., Trohaniak O.M. Mathematical model of a root harvester after-cleaning system. Bulletin of Karaganda University. 2019. No 4(96). P. 81 – 89.

160. Головач І.В., Присяжний В.Г., Marian Wesołowski. Розробка вдосконаленої очистки причіпної коренезбиральної машини. Зб. наук. праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. 2012. Випуск № 11 Том 1 (65). С. 128 – 131.

161. Bulgakov V., Golovach I., Boris A. Traffic study of the elements sinking rotary separator topper on the head of root crops. Agricultural Engineering. 2013 Vol. 45(2). P. 55 – 63.

162. Головач І.В. Розробка вдосконалених очисників коренебульбоплодів від домішок / І.В. Головач, В.С. Лукач, В.І. Василюк, М.А. Скориков. Механізація та електрифікація сільського господарства. 2014. № 99 (1). С. 237 – 245.

163. Kozachenko O., Pakhuchyi A., O.Shkregal, Sorokin S., S. Dyakonov, Gusarenko N., Kadenko V. Experimental substantiation of the rational parameters for a reaping machine of the comb type for harvesting oil flax seeds. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 5. Is. 1 (107). P. 52 – 59.

164. Козаченко О.В., Сєдих К.В., Шкрегаль О.М. Математичне моделювання стабільності механічної системи дискатора. Техніка та енергетика / Machinery & Energetics. 2020. № 12(4). С. 61 – 66.

165. Козаченко О.В., Сєдих К.В., Волковський О.М. Фізико-математична модель взаємодії диска з грунтом. Інженерія природокористування. 2020. № 2(16). С. 69 – 77.

166. Погорелый Л.В. Инженерные методы испытания сельскохозяйственных машин. К.: Техніка, 1981. 176 с.

167. Погорелый Л.В., Анилович В.Я. Испытания сельскохозяйственной техники: научно-методические основы оценки и прогнозирования надежности сельскохозяйственных машин. К.: «Феникс», 2004. 208 с.

168. Jones Morgan, Peet Matthew M. A generalization of Bellman’s equation with application to path planning, obstacle avoidance and invariant set estimation. Automatica. 2021. 127 c. doi:10.1016/j.automatica.2021.109510

169. Рогатинський Р.М. Моделювання процесів взаємодії шнекових робочих органів із коренебульбоплодами. Вісник Національного аграрного університету. К. : НАУ, 1997. Т. 1. С. 103 – 108.

170. Шабельник Б.П. Разработка технологического процесса очистки корнеплодов и создание конвейеров-очистителей свеклоуборочных машин : Тракторы и сельхозмашины. 1986. № 9. С. 31 – 37.

171. Шабельник Б.П. Конвейеры-очистители корнеуборочных машин: теория и расчет : монографія. К.: Міносвіта, 1998. 243 с.

172. Черновол М.І., Аулін В.В., Солових Є.К. Проблеми та задачі теорії надійності машин : Зб. наук. праць І-ої Міжн. наук.-техн. конф. «Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин» (DSR-AM-I). Тернопіль : ТДТУ, 2004. С. 567 – 569.

173. Prikner P., Kotek M., Jindra P. Field compaction capacity of agricultural tyres. Agron. Res. 2017. Vol. 15. P. 806 – 816.

174. Merkes R. 50 Jahre Produktionstechnik im Zucker. Benbau in Deutschland. Zucker. 2001. N 4. P. 214–217. 5. Karwowsk Merkes R. 50 Jahre Produktionstechnik im Zucker. Benbau in Deutschland. Zucker. 2001. N 4. P. 214–217. 5. Karwowsk

175. Адамчук В.В., Булгаков В.М., Іванишин В.В. Про розробку і створення в Україні сільськогосподарських машин сучасного рівня. Зб. наук. праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. 2012. Вип. 11. Т. 2 (66). С. 8 – 14.

176. Адамчук В.В. Техніка для землеробства майбутнього / В.В. Адамчук, В.К. Мойсеєнко, В.І. Кравчук, Д.Г. Войтюк. Механізація та електрифікація сільського господарства. 2002. № 35. С. 20 – 32.

177. Василенко П.М., Василенко В.П. Методика построения расчетных моделей функционирования механических систем (машин и машинных агрегатов). К.: РИО УСХА, 1980. 187 с.

178. Гевко Б.М. Механізми з гвинтовими пристроями / Б.М. Гевко, М.Г. Данильченко, Р.М. Рогатинський, М.І. Пилипець, А.В. Матвійчук. Львів : Світ, 1993. 208 с.

179. Гевко Б.М., Рогатынский Р.М. Винтовые подающие механизмы сельскохозяйственных машин. Львов : Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те, 1989. 176 с.

180. Адамчук В.В. Математична модель коливального руху спіралі очисника картоплі від домішок / В.В. Адамчук, В.М. Булгаков, І.В. Головач, З.В. Ружило. Вісник аграрної науки. 2019. № 9(798). С. 52 – 57.

181. Погорілий Л.В. Сучасні проблеми землеробської механіки і машинознавства при створенні сільськогосподарської техніки нового покоління / Л.В. Погорілий // Механізація сільськогосподарського виробництва // Х. : ХДТУСГ, 2003. – Вип. 20. – С. 10–28.

182. Погорелый Л.В. Свеклоуборочная техника. Конструирование и расчет / Л.В. Погорелый, Н.В. Татьянко, В.В. Брей и др. К.: Техніка, 1983. 168 С.

183. Хелемендик М.М. Напрями і методи розроблення робочих органів сільськогосподарських машин. К. : Аграрна наука, 2001. 280 с.

184. Шабельник Б.П. Теорія і практика обгрунтування параметрів робочих органів бурякозбиральних машин. Х., 2001. 314 с.

185. Yablonskyi P., Volokha M., Rogovskii I. tt al. Modelling of transportation process in technological complex of beet harvesting machines. Journal of Engineering Sciences. 2023. Vol. 10. No 2. P. F1 – F9.

186. Зелінський А.М. Основи математичного моделювання. К.: НМКВО, 1992. 243 с.

187. Павленко П.М. Математичне моделювання систем і процесів: навч. пос. / П.М. Павленко, С.Ф. Філоненко, О.М. Чередніков, В.В. Трейтяк. К. : НАУ, 2017. 392 с.

188. Macharis C., Meers D., Lier T.V. Modal choice in freight transport: combining multi-criteria decision analysis and geographic information systems. International Journal of Multicriteria Decision Making. 2015. Vol. 5(4). P. 355.

189. Mou X. Kinematic analysis and experiments of elastic dentations in process of sugarcane leaf sheath stripping / X. Mou, Y. Ou, Q. Liu, Feng J., Y. Li // Agricultural mechanics report, Journal of shandong agricultural university. 2014. Vol. 2. P. 122 – 129.

190. Volokha M., Rogovskii I., Fryshev S., Sobczuk H., Virchenko G., Yablonskyi P. Modeling of transportation process in a technological complex of beet harvesting machines. Journal of Engineering Sciences (Ukraine). 2023. Vol. 10(2). P. F1–F9.

191. Online interactive simulation models//XJTEK.COM:XJ technologies. Simulation software and services.1992-2011.
URL.http://www.xjtek.com/anylogic/demo_models/?page=all&

192. Мількевич В.М. Підвищення ефективності цукрового виробництва шляхом прогнозування технологічних показників переробки буряків та вдосконалення технології їх зберігання : дис. на здобуття наук. ступ. кандидата технічних наук : спеціальність 05.18.05 – технологія цукристих речовин / В.М. Мількевич. Український державний університет харчових технологій, Київ. 2000. 130 с.

193. https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D0%B5%D0%BA%D1%81%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%83.

194. Білецький В.С. Методологія наукових досліджень технічних об’єктів та їх оптимізація. Національний технічний університет «Харків. політехнічний інститутт». Київ: ФОП Халіков Руслан Халікович, 2023. 118 с.

195. Пилипчук М.І., Григор’єв А.С., Шостак В.В. Основи наукових досліджень. К.: Знання, 2007. 270 с.

196. Box, G.E.P, Behnken D.W. Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables. Technometrics. 1960. Vol. 2. №4. P. 455 – 475.

197. Хайліс Г.А., Коновалюк Д.М. Основи проектування і дослідження сільськогосподарських машин. К.: НМКВО, 1992. 320 с.

198. https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D0%B5%D0%BA%D1%81%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%83

199. Петренко М.М. Основи наукових досліджень в сільськогосподарському машинобудуванні. Кіровоград: Кіровоградське державне видавництво, 1997. 148 с.

200. Соловйов С.М. Основи наукових досліджень. Навчальний посібник. – К.: Центр учбової літератури, 2007. – 176 с.

201. Романчиков В.І. Основи наукових досліджень: Навчальний посібник. – К.: Центр учбової літератури, 2007. – 254 с.

202. Смолінський С.В. Моделювання робочих процесів і машин. К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2020. 182 с.

203. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки / В. Б. Струтинський. Житомир: ЖІТІ, 2001. 616 с.

204. Hevko R. Advances in methods of cleaning root crops / R. Hevko, R. Brukhanskyi, I. Flonts, S. Synii, O. Klendii // Bulletin of the Transilvania University of Brasov. 2018. Ser. II. No. 11(60). P. 127 – 138.

205. Шпокас Л. Розробка вдосконаленого способу очищення коренеплодів збиральних машин / Л. Шпокас, В. Адамчук, І. Головач, В. Присяжний. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія «Технічні науки». 2012. №. 11. Серія І(65). С. 133 – 141.

206. Сироткин М.Е. Методы моделирования производственных процессов предприятия машиностроения. Наука и образование : электронный журнал. Август 2011. № 8. http://technomag.edu.ru/doc/203858.html

207. Паньків М.Р. Моделювання – метод оптимізації робочих процесів транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин : тези доп. Міжн. наук.-практ. конф. Присвяченої 90-річчю від дня народження проф. Рибака Т. І. та 60-річчю кафедри технічної механіки та с.-г. машин «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики. (Тернопіль, 29–30 вересня 2022). Терн. Націон. Техн. Ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. С. 31 – 32.

208. Frey S., Dadalau A., Verl A. Expedient modeling of ball screw feed drives. Production Engineering. 2012. Vol. 6(2). P. 205 – 211.

209. Булгаков В.М. Теорія і технічні засоби збирання гички цукрових буряків: монографія / В.М. Булгаков, Головач І.В., Ружило З.В. [та ін.]. Київ: Аграрна наука, 2021. 212 с.

210. Frey S., Dadalau A., Verl A. Expedient modeling of ball screw feed drives. Production Engineering. 2012. Vol. 6(2). P. 205 – 211.

211. Паньків М.Р., Паньків В.Р. Методи розв'язування задач лінійного програмування : тези доп. наук. конф. «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій АНКТ-2011». Хмельницький : ХНУ, 2011. С. 32 – 36.

212. Паньків М.Р., Паньків В.Р. Побудова імітаційної моделі роботи систем масового обслуговування : мат. наук. конф. «Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті». Тернопіль : ТНТУ, 2011. С. 43 – 44.

213. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. М.: Наука, 1988. 640 с.

214. Горячкин В.П. Теория соломорезки и силосорезки. Сбор. соч. М.: Колос, 1965. Т.3. С. 112 – 127.

215. Желиговский В.А. Экспериментальная теория резания и основы резания лезвием. Труды МИМЭСХ. М., 1940. Вып. 9. 27 с.

216. Babii A. Study of the tfficiency of working mixture application in chemical crop protection. Journal of TNTU. Tern.: TNTU, 2019. Vol 96. No 4. P. 99 – 109.

217. Cesnieks Sandris, Vilde Arwids, Rueins Adolfs. Optimisation parameters of soil tillage aggregates. Механізація сільськогосподарського виробництва. К.: НАУ, 2003. Т. XV. С. 121 – 129.

218. Krumov I. Varringerung der Verluste beider Zuckerrübenernte. Akademie Landwirtschaftwissenschaften der DDR Tagungsbericht. 1985. Bd. 1. № 229. S. 163 – 168.

219. Завгородній А.Ф., Кравчук В.І., В.П. Юрчук. Геометричне конструювання робочих органів коренезбиральних машин. Під ред. Л.В. Погорілого. К.: Аграрна наука, 2004. 240 с.

220. Рогатинський Р. Дослідження потоку вантажу в гвинтових конвеєрах / Р. Рогатинський, О. Дмитрів, Д. Дмитрів, М. Грубенюк : мат. наук. конф. Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2019. С. 32 – 33.

221. Булгаков В.М., Черновол М.И., Свирень Н.А. Теория свеклоуборочных машин : монографія. Кировоград : ”КОД”, 2009. 256 с.

222. Барановський В.М., Паньків М.Р. Конструктивно-технологічні принципи адаптованого застосування коренезбиральних машин Зб. наук. праць 1-ої Міжн. наук.-практ. конф. “Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин” (DSR-AM-I). Тернопіль : ТДТУ, 2004. С. 411 – 419.

223. Hoffmann C., Engelhardt M., Gallmeier M., Gruber M., Märländer B. Importance of harvesting system and variety for storage losses of sugar beet. Sugar Industry. 2018. Vol. 143 (8). P. 474.

224. Pankiv M. Modeling of the technological functioning process transport and cleaning system of roots. Innovative solutions in modern science. 2019. No. 9(36). С. 50 – 60.

225. 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 д.т.н., професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) та 125 річниці НУБіП України. К.: Вид. центр НУБіП України, 2023. С. 353 – 356.

226. Jobbagy J. Evaluation of selected agro-physical properties of a root vegetable / J. Jobbagy, D. Gabaj, J. Arvay // In Acta Technologica Agriculturae. 2011. Vol. 14. No. 3. P. 61 – 65.

227. Паньків М.Р. Процес інтенсифікації очищення вороху коренеплодів. Науковий вісник Національного університету біотехнологій і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». 2014. Вип. 196. Ч.1. С. 303 – 309.

228. Євгеній Олійник, Валерій Войтюк. Аналіз технологічної подачі компонентів вороху коренеплодів цикорію до очисника. Вісник Львівського національного аграрного університету : агроінженерні дослідження. Львів : Львів. нац. аграр. ун-т, 2018. № 22. С. 53 – 64.

229. Viktor Baranovsky. Theoretical-experimental investigations of the second serve of the root crop pile components / Baranovsky Viktor, Pankiv Maria, Jobbagy Jan, Marynenko Sergey, Komar Roman // Acta Technologica Agriculturae. 2023. Vol. 26. Issue 1/2023. P. 49 – 58.

230. 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, 2015. С.128 – 131.

231. Патент на корисну модель 42654 Україна, МПК A 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів. Паньків М.Р., Барановський В.М, Постол О.М., Рамш В.А. ; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; № u200803995; заявл. 31.03.2008; опубл. 26.08.2008. Бюл. № 16/2008. 4 с.

232. Патент на корисну модель 42979 Україна, МПК A 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів. Паньків М.Р., Барановський В.М, Постол О.М., Дубчак Н.А.; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; № u200902464; заявл. 19.03.2009; опубл. 27.07.2009. Бюл. № 14/2009. 4 с.

233. Патент на корисну модель 44750 Україна, МПК A 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів. Паньків М.Р., Барановський В.М, Дубчак Н.А., Рамш В.Ю. ; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; № u200905077; заявл. 22.05.2009; опубл. 12.10.2009. Бюл. № 19/2009. 4 с.

234. Патент на корисну модель 46920 Україна, МПК A 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів. Паньків М.Р., Барановський В.М, Дубчак Н.А., Рамш В.Ю. ; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; № u200907498; заявл. 17.07.2009; опубл. 11.01.2010. Бюл. № 1/2010. 4 с.

235. Патент на корисну модель 82973 Україна, МПК A 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів. Барановський В.М., Паньків М.Р., Дубчак Н.А., Паньків В.Р. ; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; № u201301440; заявл. 07.02.2013; опубл. 27.08.2013. Бюл. № 16/2013. 4 с.

236. Патент на корисну модель 93525 Україна, МПК A 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів. Труханська О.О., Барановський В.М., Кондратюк Д.Г., Паньків М.Р., Кравченко І.Є. ; заявник і власник Науково-дослідне господарство "Агрономічне" вінницького національного аграрного університету; № u201213815; заявл. 03.12.2012; опубл. 25.07.2013. Бюл. № 14/2013. 4 с.

237. Патент на корисну модель 93526 Україна, МПК A 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів. Труханська О.О., Барановський В.М., Кравченко І.Є., Паньків М.Р., Паньків В.Р. ; заявник і власник Науково-дослідне господарство "Агрономічне" вінницького національного аграрного університету; № u2014029743; заявл. 24.03.2014; опубл. 10.10.2014. бюл. № 19/2014. 4 с.

238. Патент на корисну модель 93527 Україна, МПК A 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів. Труханська О.О., Барановський В.М., Кравченко І.Є., Паньків М.Р., Дубчак Н.А., Спірін А.В. ; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; № u201402978; заявл. 24.03.2014; опубл. 10.10.2014. Бюл. № 19/2014. 4 с.

239. Патент на корисну модель 93528 Україна, МПК A 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів. Труханська О.О., Барановський В.М., Кондратюк Д.Г., Паньків М.Р., Кравченко І.Є. ; заявник і власник Науково-дослідне господарство "Агрономічне" вінницького національного аграрного університету; u201402979; заявл. 24.03.2014; опубл. 10.10.2014. Бюл. № 19/2014. 4 с.

240. Патент на корисну модель 108264 Україна, МПК A 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів. Барановський В.М., Потапенко М.В., Паньків М.Р., Дубчак Н.А., Паньків В.Р. ; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; № u2011600388; заявл. 18.04.2016; опубл. 11.07.2016. Бюл. № 13/2016. 4 с.

241. Патент на корисну модель 119844 Україна, МПК A 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів. Барановський В.М., Потапенко М.В., Паньків М.Р., Герасимчук Г.А. ; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; № u201704015; заявл. 24.04.2017; опубл. 10.10.2017. Бюл. № 19/2017. 4 с.

242. Патент на корисну модель 120853 Україна, МПК A 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів. Барановський В.М., Потапенко М.В., Паньків М.Р., Герасимчук Г.А ; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; № u201704002; заявл. 24.04.2017; опубл. 10.10.2017. Бюл. № 14/2017. 4 с.

243. Патент на корисну модель 143462 Україна, МПК A 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів. Барановський В.М., Паньків М.Р., Марченко Л.О., Паньків В.Р., Дубчак Н.А. ; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; № u202001772; заявл. 13.03.2020; опубл. 27.07.2020. Бюл. № 14/2020. 4 с.

244. Патент на корисну модель 143806 Україна, МПК A 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів. Барановський В.М., Паньків М.Р., Марченко Л.О., Паньків В.Р., Герасимчук Г.А. ; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; № u202001773; заявл. 13.03.2020; опубл. 10.08.2020. Бюл. № 15/2020. 4 с.

245. Патент на корисну модель 144808 Україна, МПК A 01D 33/08. Очисник вороху коренеплодів. Барановський В.М., Паньків М.Р., Марченко Л.О., Паньків В.Р., Дубчак Н.А. ; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; № u202003173; заявл. 26.05.2020; опубл. 27.10.2020. Бюл. № 20/2020. 4 с.

246. Патент на корисну модель 28465 Україна, МПК A01D/33.08. Очисна система вороху коренеплодів / Паньків М.Р., Барановський В.М., Дубчак Н.А., Олійник О.Ф.; заявник і власник Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя; № u200708888; заявл. 01.08.2007; опубл. 10.12.2007. Бюл. № 20. 6 с.

247. Прогнозування кількості грунту на поверхні тіла коренеплоду / В.М. Барановський, Д.Г. Войтюк, С.В. Кропивко [та ін.]. “MOTRO’L 03” IV. 2003. Т. 6. С. 164 – 172.

248. Рамш В.Ю., Барановський В.М. Оптимізаційні математичні моделі процесу викопування вороху коренеплодів пасивним сферичним диском. Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження. 2008. № 12(2). С. 337 – 349.

249. Ямков О.В. Обґрунтування параметрів технологічного процесу і робочих органів бурякозбирального агрегату з системним трактором : автореф. дис. на здоб. наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва” / О.В. Ямков. К., 2007. 20 с.

250. McLachlan N.W. Laplace Transforms and Their Applications to Differential Equations. Dover Publications, 2014. 241 p.

251. Барановський В.М., Паньків М.Р. Розрахунок масових характеристик коренеплодів. Сільськогосподарські машини. Зб. наук. статей. Луцьк : ЛДТУ, 2007. Вип. 15. С. 30 – 43.

252. Барановський В.М. Математичні моделі маси налиплого грунту на коренеплодах кормових буряків / В.М. Барановський, М.Р. Паньків, Н.А. Дубчак, В.Б. Онищенко // Вісник Львівського. національного аграрного університету: агроінженерні дослідження. Львів: Львівський національний аграрний університет, 2008. № 12(2). С. 314 – 326.

253. Мазуренко А. М. Механіко-технологічне обґрунтування збирання цукрових буряків з укладанням коренеплодів у потужний валок: автореф. дисертації кандидата техн. наук : спеціальність 05.05.11. Глеваха, 2012. 40 с.

254. Паньків М.Р., Постол О.М. Математична модель пропускної здатності комбінованого очисника. Науковий журнал. Вісник Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя. 2007. Т. 12. № 3. С. 76 – 83.

255. Гудименко Ф.С. Вища математика. Основи математичного аналізу. Київ: Видавництво Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 2019. 377 с.

256. Рослинництво. Технології вирощування сільськогосподарських культур / В. В. Лихочвор, В. Ф. Петриченко, П. В. Іващук, О. В. Корнійчук; за ред. В. В. Лихочвора, В. Ф. Петриченка. 3-тє вид., виправл., доповн. Львів: НВФ "Українські технології", 2010. 1088 с.

257. ДСТУ 4981:2008. Цикорій коренеплідний. Збирання. Показники якості та методи їх визначення. К., 2008. 8 с.

258. Baranovsky Viktor. The results of root crop cleaner experimental research / Viktor Baranovsky, Viktor Tesliuk, Vasil Lukach, Mikola Ikalchyk, Anatoly Kushnirenko, Vasil Kulyk. of the Ternopil National Technical University. – 2021. – № 1 (101). P. 47 – 55.

259. Барановський В.М. Результати теоретично-експериментальних досліджень секундної подачі вороху коренеплодів. Механізація сільськогосподарського виробництва. 2008. № 1. С. 111 – 120.

260. Гументик М.Я. Агрофізичні властивості цикорію коренеплідного як основа для обгрунтування технологічних процесів механізації його виробництва і параметрів робочих органів для їх здійснення. Зб. пр. ІЦБ УААН. 2000. С. 245 – 248.

261. Mou X. Kinematic analysis and experiments of elastic dentations in process of sugarcane leaf sheath stripping / X. Mou, Y. Ou, Q. Liu, Feng J., Y. Li // Agricultural Mechanics Report, Journal of Shandong Agricultural University. 2014. Vol. 2. P. 122 – 129.

262. Berezhenko Eugene. Experimental research of the module for gathering plant of chicory roots / Eugene Berezhenko, Maria Pankiv, Jan Jobbagy, Bogdan Berezhenko // Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. – 2021. – № 1 (101). P. 56 – 67.

263. Smith D.W., Sims B.G., O'Neill D.H. Testing and evalution of agricultural machinery and equioment. FAO Agricultural services bulletin. 1994. No 110. 288 p.

264. Nurmiev A. Optimization of main parameters of tractor working with soil-processing implement / A. Nurmiev, C. Khafizov, R. Khafizov, B. Ziganshin. Engineering for Rural Development. 2018. Vol. 17. P. 161 – 167.

265. Адамчук В., Корнюшин В. Обгрунтування конструкційно-технологічної схеми підкопувально-сепарувального робочого органу картоплезбиральної машини. Вісник аграрної науки. 2021. №. 6. С.50 – 56.

266. Kalinin A., Teplinsky I., Ruzhev V. Improvement of digging shares of root harvesting machines based on rheological model of soil state. Engineering for Rural Development. 2021. Vol. 20. P. 1051 – 1057.

267. Барановський В.М., Паньків М.Р., Потапенко М.В. Математична модель функціонування транспортно-очисної системи. Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». К.: Вид. центр НУБіП України, 2017. Вип. 258. С. 314 –322.

268. 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. Vol. 45. P. 58 – 61.

269. Синій С.В. Підвищення ефективності процесів очищення коренеплодів / С.В. Синій, Р.Б. Гевко, І.В. Фльонц, О.М. Клендій // Сільськогосподарські машини. 2018. № 40. С. 89 – 100.

270. Паньків М.Р., Барановський В.М. Кінематичний режим очищення коренеплодів. Зб. наук. праць 1-ої міжн. наук.-практ. конф. “Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин”. ТДТУ, 2004. С. 192 – 198.

271. Паньків М.Р. Технологічні аспекти процесу відокремлення домішок від коренеплодів : тези доп. VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів 16-17 листопада 2017 року. Тернопіль : ТНТУ, 2017. С. 191 – 192.

272. Григор’єв О.М., Преображенський П.А. Комплексна механізація і автоматизація вантажно-розвантажувальних і транспортних робіт в машинобудуванні і приладобудуванні. Київ : Наукова думка, 1967. 116 с.

273. Дереза О.О. Обґрунтування режиму роботи пруткових транспортерів овочезбиральних машин : дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.11. – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва. Таврійська державна агротехнічна академія, м. Мелітополь, 2005.

274. Шиманський І.Є. Математичний аналіз. Київ: Вища математика, 1972. 632 с.

275. Коробко М.М. Обгрунтування параметрів та режимів руху пруткових конвеєрів бурякозбиральних машин : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.05.11 / М.М. Коробко. К.: НАУ, 2007. 20 с.

276. Гевко Р.Б., Баліцький І.Б. Динамічна модель ударної взаємодії коренеплодів з прутками скребкових полотен транспортерів : тези доп. ІІ Міжн. наук.-практ. конф. «Агроінженерія: сучасні проблеми та перспективи розвитку», присвячена 90-й річниці з дня заснування механіко-технологічного факультету НУБіП України (7-8 листопада 2019 року). Київ. 2019. С. 42 – 44.

277. Павелчак О.Б., Ткаченко І.Г., Гладьо Ю.Б. Вибір раціональних параметрів транспортера-сепаратора. Зб. наук. праць Національного аграрного університету. “Механізація сільськогосподарського виробництва”. К.: НАУ, 2000. Т. 8. С. 41 – 47.

278. Дереза О.О. Машини безперервного транспорту. Мелітополь : Таврійський державний агротехнологічний університет, 2016. 108 с.

279. Панькив М.Р., Герасимчук Г.А. Анализ процесса движения корнеплода по скребку загрузочного транспортера : тези доп. XI Міжн. наук.-практ. конф. «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки», 1-3 листопада 2017 р., Кропивницький: ЦНТУ, 2017. С. 77 – 80.

280. Петрикович Ю.Я. Теоретичне обгрунтування конструктивної довжини робочого полотна очисної пальчикової гірки при її завантаженні технологічним ворохом цукрового буряка / Ю.Я. Петрикович // Механізація сільськогосподарського виробництва. К.: НАУ, 1999. Т V. С. 64 – 68.

281. Паньків М.Р., Потапенко М.В. Аналіз процесу роботи завантажувального транспортера транспортно-очисної системи вороху коренеплодів : тез доп. VI Міжн. наук.-техн. конф. з нагоди 112-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича, 22 лютого 2018. НУБіП України, 2018. С. 133 – 135.

282. Павловський М.А. Теоретична механіка : підручник для студентів вищих навчальних закладів. К.: Техніка, 2002. 512 с.

283. Шкіль М.І. Математичний аналіз. Ч.2. Київ, 1981. 456 с.

284. Timoshenko S.P. Theory of Elastic Stability / S. P. Timoshenko, J. M. Gere. New York : McGraw Hill Kogakusha Ltd., 1961. 541 p.

285. Pankiv M. Mathematical model of the process of interaction of cleaning elements with the biggest soil on roots. Innovative Solutions In Modern Science. 2019. Vol. 9(36). P. 50 – 60.

286. Калетнік Г.М. Технічна механіка / Г.М. Калетнік, В.М. Булгаков, О.М. Черниш та ін. М.: Наука, 1980. 347 с.

287. Клепко В.Ю., Голець В.Л. Теорема Лагранжа (про скінчені прирости функції). Вища математика в прикладах і задачах : 2-ге видання. К.: Центр учбової літератури, 2009. 594 с.

288. Andrei D. Polyanin and Alexander V. Manzhirov Handbook of Integral Equations. CRC Press, Boca Raton, 1998. ISBN 0-8493-2876-4.

289. Вірченко Н.О., Січкар Ю.В. Про деякі інтегральні рівняння з узагальненою функцією Лежандра. Український математичний журнал. 1999. Т. 51. № 2. С. 263 – 267.

290. Грицай Ю.В. Обґрунтування параметрів комбінованого шнекового транспортера-подрібнювача : дис. на здобуття наук. ступеня кандидата технічних наук : спеціальність 05.05.05 / Грицай Юрій Володимирович. Тернопіль, 2020. 186 с.

291. Pankiv Maria. Methodology for refining the performance of screw conveyor / Maria Pankiv, Mykhailo Pylypets, Vitalii Pankiv, Yulia Pankiv, Natalia Dubchak. Scientific Journal of TNTU. Tern.: TNTU, 2022. Vol 105. No 1. P. 95 – 107.

292. Булгаков В.М. Методика оцінки ступеня пошкодження коренеплодів коренезбиральною машиною / В.М. Булгаков, О.Б. Павелчак, Р.Б. Гевко, І.Г. Ткаченко Зірник наукових праць НАУ “Механізація сільськогосподарського виробництва”. К.: НАУ, 2000. Том 7. С. 14 – 19.

293. Барановський В.М., Дубчак Н.А., Паньків М.Р. Визначення коефіцієнта динамічної взаємодії коренеплодів. Сільськогосподарські машини. Зб. наук. статей. Луцьк : ЛДТУ, 2007. Вип. 15. С. 14 – 22.

294. Петрикович Ю.Я. Обґрунтування параметрів технологічного процесу сепарації коренеплодів цукрових буряків очисною пальчиковою гіркою : дис. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва / Петрикович Юрій Ярославович. Луцьк: ЛДТУ, 1999. 162 с.

295. Рамш В.Ю., Барановський В.М., Паньків М.Р. Аналіз взаємодії коренеплоду з рифом шнека. Науковий вісник НУБіПУ. Серія «Техніка та енергетика АПК». К.: НУБіПУ, 2010. Вип. 144. Част. 5. С. 157 – 163.

296. Рогатинський Р.М. Дослідження напружено-деформівного стану гвинтових робочих органів. Вісник національного аграрного університету. Сучасні проблеми сільськогосподарського машинобудування. К.:НАУ, 1997. Т.1. С. 34 – 39.

297. Панькив М.Р., Панькив В.Р. Коэффициент кинематического взаимодействия корнеплодов с рифом шнека. Materialele Simpozionului Ştiinţific Internaţional «Realizări şi perspective în ingineria agrară şi transport auto», dedicat aniversării a 85 de ani de la fondarea Universităţii Agrare de Stat din Moldova. – Chişinău : UASM, 2018. Vol. 51. P. 58 – 64.

298. Паньків М.Р. Моделювання процесу взаємодії очисних елементів з налиплим грунту на коренеплодах : зб. мат. XII Міжн. науково-практичної конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки». Кропивницький, 2019. С. 50 – 54.

299. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів : [підручник : за ред. Г.С. Писаренка]. К.: Вища школа, 1993. 655 с.

300. Паньків М.Р., Барановський В.М., Рамш В.Ю. Дослідження продуктивності комбінованого очисника вороху коренеплодів. Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. 2012. Вип. 121. С. 102–109.

301. Булгаков В.М., Головач І.В. Уточнена теорія очистки коренеплодів на корені гнучкою лопаттю. Збірник наукових праць Національного аграрного університету “Механізація сільськогосподарського виробництва”. 2002. Том XIII. С. 11 – 42.

302. Гевко Б.М. Технология изготовления спиралей шнеков. Львов: Вища школа. Издательство при Львовском университете, 1986. 128 с.

303. Барановський В.М., Паньків М.Р., Пилипець М.І., Барановський О.В. Теоретичні дослідження імпульсу сили удару коренеплоду. Науковий вісник НАУ. Зб. наук. праць. Вип. 92. Частина ІІ. 2006. С. 65 – 70.

304. Дьомічев К.Е. Математичне моделювання пружно-пластичних циліндричних тіл під дією температурного та силового навантаження : дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи / Дьомічев Костянтин Едуардович. Черкаси, 2016. 224 с.

305. Самойчук К.О., Верхоланцева В.О. Методи теоретичних і експериментальних досліджень : електронний посібник. ТДАТУ, 2021. URLS: elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/ophv_12/page9.html.

306. Бабицький Л.Ф. Основи наукових досліджень // Л.Ф. Бабицький, В.М. Булгаков, Д.Г. Войтюк, В.И. Рябцев. К.: НАУ, 1999. 228 с.

307. ДСТУ 4981:2008. Цикорій коренеплідний. Збирання. Показники якості та методи їх визначання. Київ, 2008. 8 с.

308. Теорія планування експериментів: Виконання розрахунково-графічної роботи : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізації «Технологія машинобудування» / С.М. Лапач ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 86 с.

URLS: https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/e80b3665-5324-4155-a675-a1f0a11f9bdb/content.

309. Герасимчук Г.А. Обгрунтування параметрів однодискового копача кормових буряків : дисертація на здобуття наук. ступ. кандидата техн. наук : спеціальність 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва / Герасимчук Галина Андріївна. Тернопіль: ТНТУ, 2011. 267 с.

310. Mykola Pidgurskyi, Halina Gerasymchuk, Maria Pankiv. Theoretical studies of the technological process of harvesting chicory root crops. Scientific Journal of the TNTU. 2023.Vol. 111. No 3. P. 139 – 151.

311. Барановський В.М., Паньків М.Р. Розрахунок масових характеристик коренеплодів. Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей. Луцьк : ДТУ, 2007. Вип. 15. С. 30 – 43.

312. Барановський В.М., Герасимчук Г.А., Паньків М.Р. Експериментальні дослідження секундних подач складових компонента домішок коренеплодів. Сільськогосподарські машини. Луцьк : ЛНТУ, 2011. Вип. 21. Т. 1. С. 119–123.

313. Рамш В.Ю. Технологічний розрахунок подачі вороху до очисника / В.Ю. Рамш, В.М. Барановський, М.І. Підгурський, М.Р. Паньків. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. Вінниця : ВНАУ, 2011. № 9. С. 105 – 115.

314. Черняк О.І., Ставицький А.В. Динамічна економетрика. К.: КВІЦ, 2000. 120 с.

315. Рамш В.Ю., Барановський В.М., Паньків М.Р., Герасимчук Г.А. Методика та результати експериментальних досліджень комбінованого очисника вороху коренеплодів. Наукові нотатки. 2011. Вип. 35. С. 146–152.

316. Барановський В. Результати експериментальних досліджень коефіцієнта проходження коренеплодів / В. Барановський, М. Паньків, В. Теслюк та ін. Вісник ЛНАУ: агроінженерні дослідження. 2017. № 21. С. 58 – 69.

317. Марія Паньків, Микола Підгурський. Результати експериментальних досліджень транспортно-очисних систем вороху коренеплодів. Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження. 2020. № 24. С. 44 – 52. https://doi.org/10.31734/agroengineering2020.24.045.

318. 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.

319. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 (ISO/IEC 17025:2006) – випробування коренезбиральних машин. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. 26 с.

320. 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.

321. 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

322. Барановський В.М., Паньків М.Р. Експериментальні дослідження маси та товщини шару налиплого грунту на коренеплодах. Науковий вісник НУБіПУ. Зб. наук. праць. К. : НУБіПУ, 2010. Вип. 144. Част. 2. С. 351 – 356.

323. Барановський В.М., Дубчак Н.А., Спірін А.В. Експериментальні дослідження поправочного коефіцієнта та маси налиплого грунту на бічній поверхні тіла коренеплоду. / В.М. Барановський, М.Р. Паньків, Н.А. Дубчак, А.В. Спірін. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. Вінниця : ВНАУ, 2011. № 6. – С. 64–71.

324. Fechler P. (1977). Hinweise und Erfahrungen zur Senkung der Ernte-verluste bein Kopfen von Zuckerruben mit dem Kopflader. Landtechnik Information. 1997. Vol. 16. No. 10. P. 170 – 172.

325. Карташов М.В. Імовірність, процеси, статистика. Київ : ВПЦ Київський університет, 2007. 504 с.

326. ДСТУ 4778:2007. Буряки цукрові. Методи визначення якості коренеплодів. [Чинний від 2009-01-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2009. 18 с. 168

327. ДСТУ 4983:2008. Буряки цукрові. Експрес-методи визначання технологічних показників якості коренеплодів. [Чинний від 2009-01-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2009. 11 с.

328. ДСТУ 7062:2009. Буряки цукрові. Збирання. Показники якості та методи їх визначання. [Чинний від 2011-01-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2011. 12 с

329. 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.

330. Безконтактні датчики, фірма Полтвіль. URL: https://business-guide.com.ua/enterprises?q=&v=638&o=449.

331. Перетворювач частоти ALTIVAR 71. URL: https://www.se.com/ua/uk/product-range/1155-altivar-71/#software-and-firmware.

332. Паньків М.Р., Барановський В.М. Енергетична оцінка очисної системи вороху коренеплодів. Науковий журнал. Вісник ТДТУ. 2006. Т. 11. № 1. С. 57 – 60.

333. Техніко-економічне обґрунтування застосування машин, обладнання і технологій / Гевко Р.Б., Гладич Б.Б., Павх І.І., Кириленко Т.П. Тернопіль, 2003. С. 138–144.

334. Адамчук В.В. Методичні рекомендації з експлуатаційно-технологічної оцінки сільськогосподарської техніки (Керівний документ) / В.В. Адамчук, М.І. Грицишин, В.М. Третяк, В.Т. Надикто, В.М. Кюрчев, О.Г. Караєв. Глеваха, 2017.

335. Методики економічного оцінювання техніки на етапі випробування : ДСТУ 4397:2005. [Чинний від 2006-01-01]. К. : Держспоживстандарт України, 2005. 16 с. (Міждержавний стандарт).

336. https://agro.ria.com/ru/marka-mtz/model-82-belarus/.

337. https://www.olx.ua/uk/transport/q%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%86%D0%B5%D0%BF-2%D0%BF%D1%82%D1%814/.

338. https://agro.expertus.com.ua/10012698.

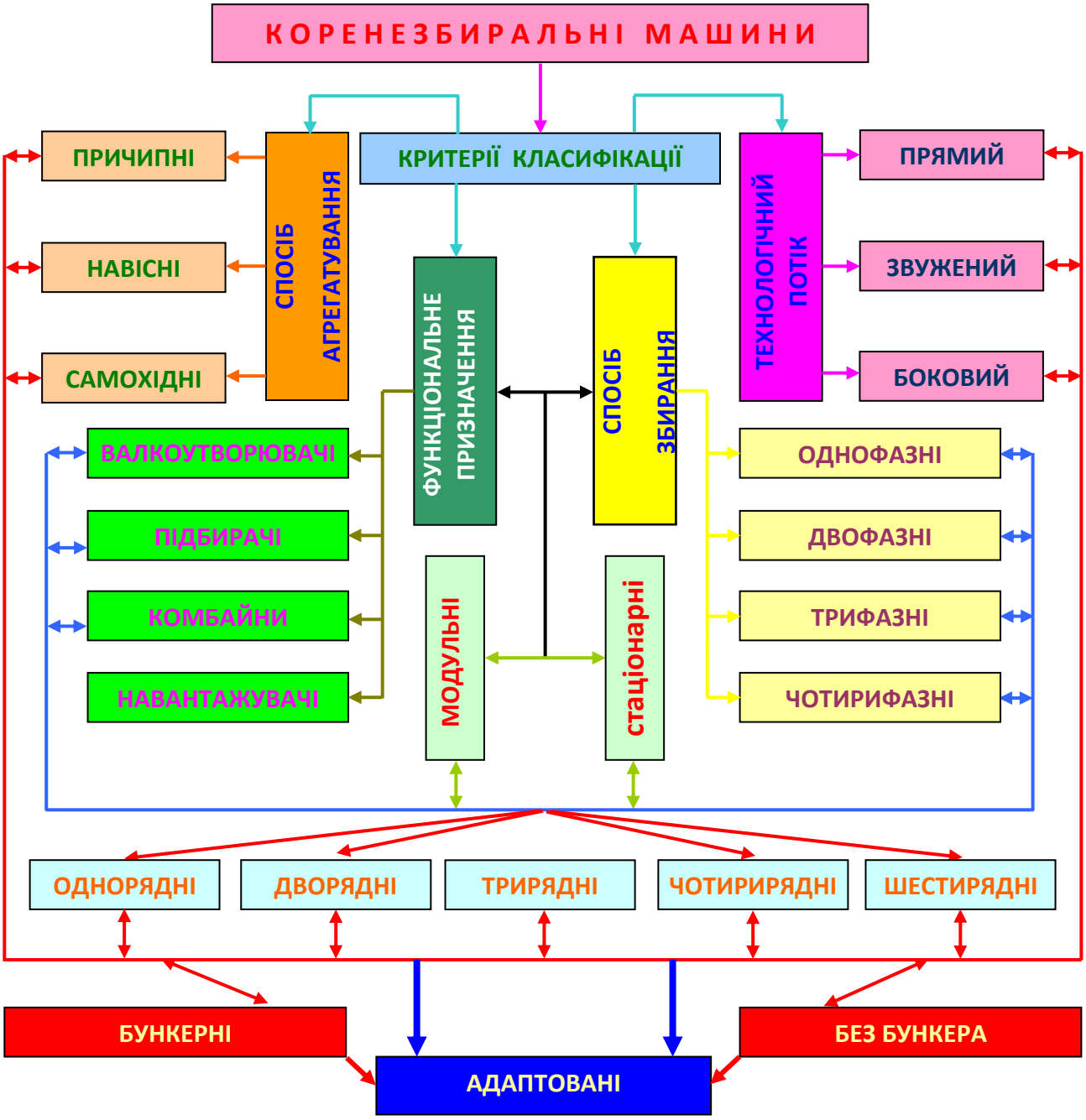
339. https://auto.ria.com/uk/toplivo/.

340. https://propozitsiya.com/ua/buryakozbiralni-mashini-dlya-valkovoyi-tehnologiyi-vikopuvannya-koreneplodiv.

# ДОДАТКИ

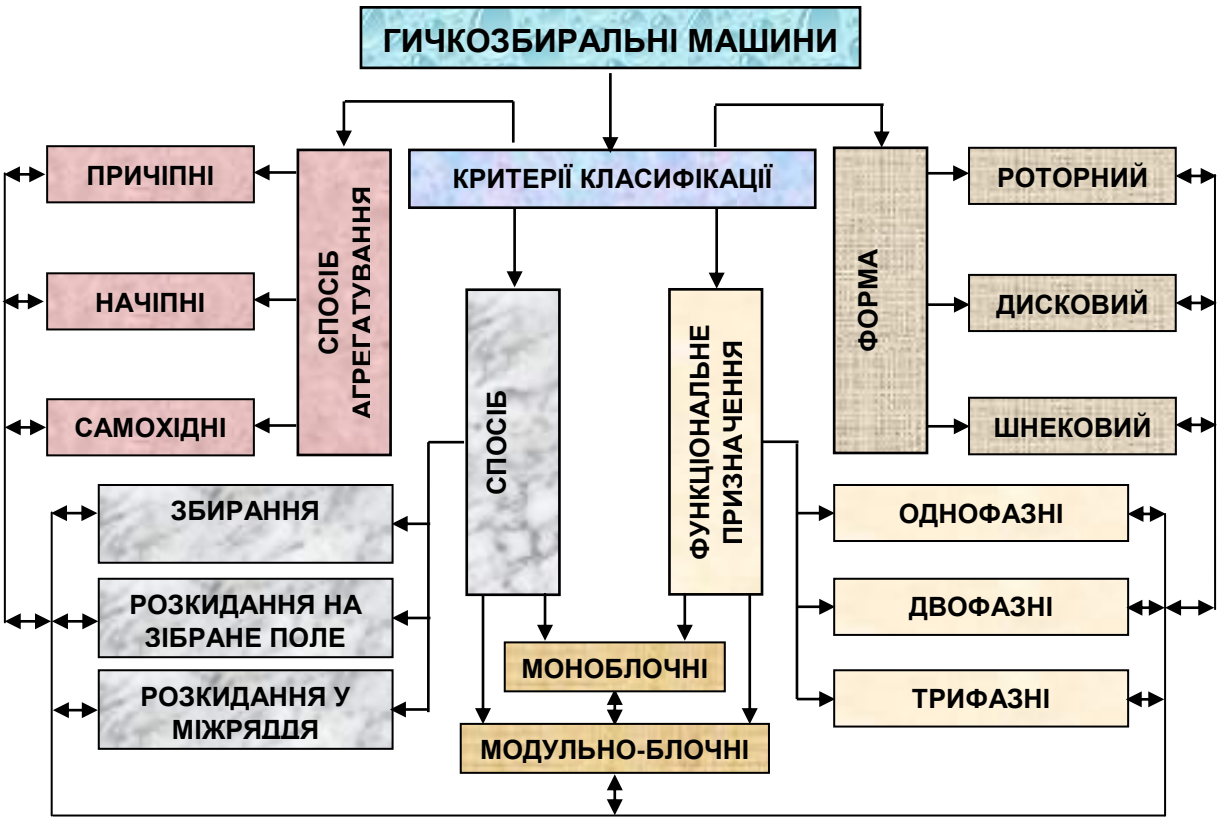
Додаток А.1.1

Класифікація машин для збирання коренеплодів [40]

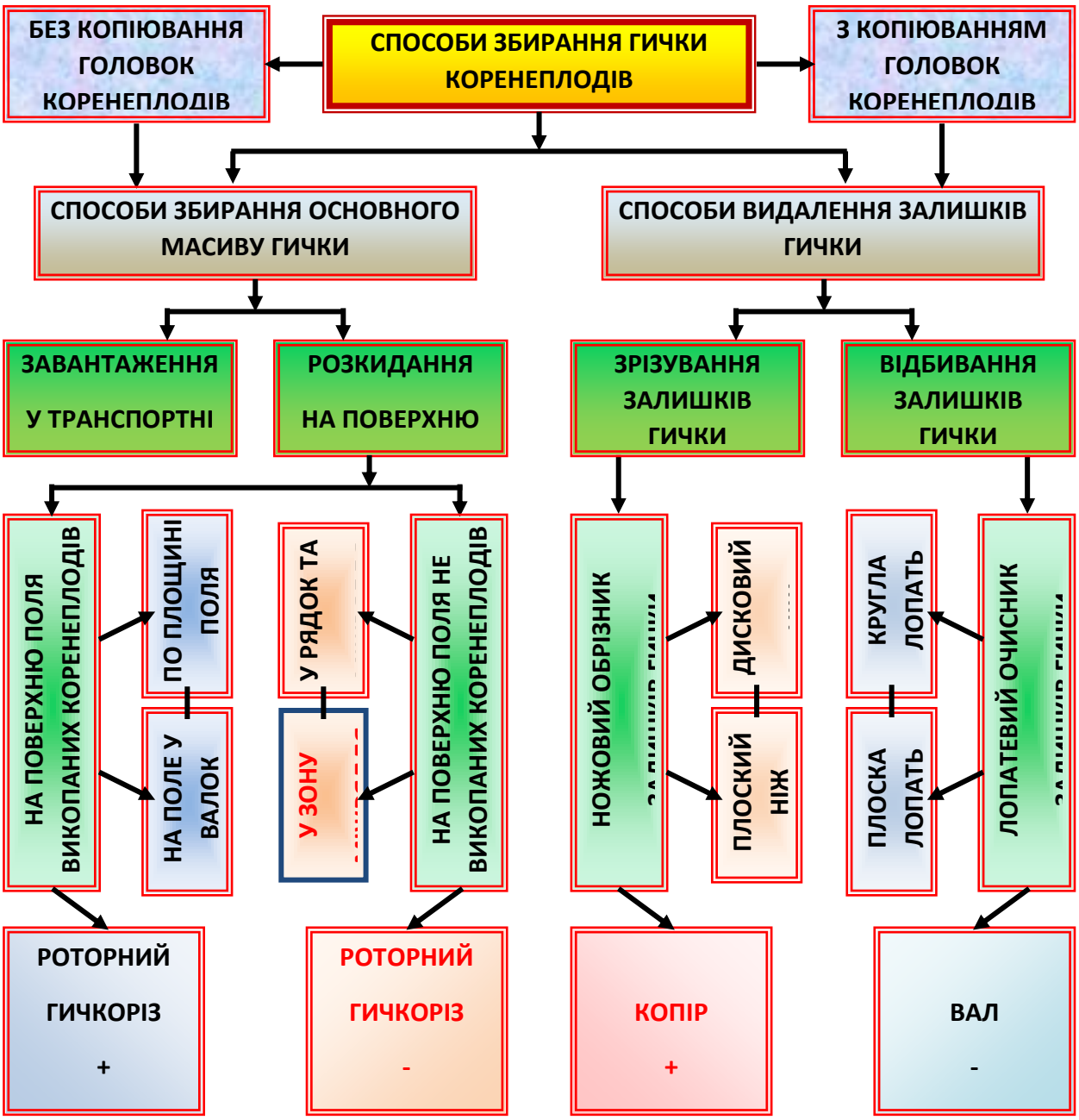


Додаток А.2.1

Класифікація машин для збирання гички коренеплодів [69]



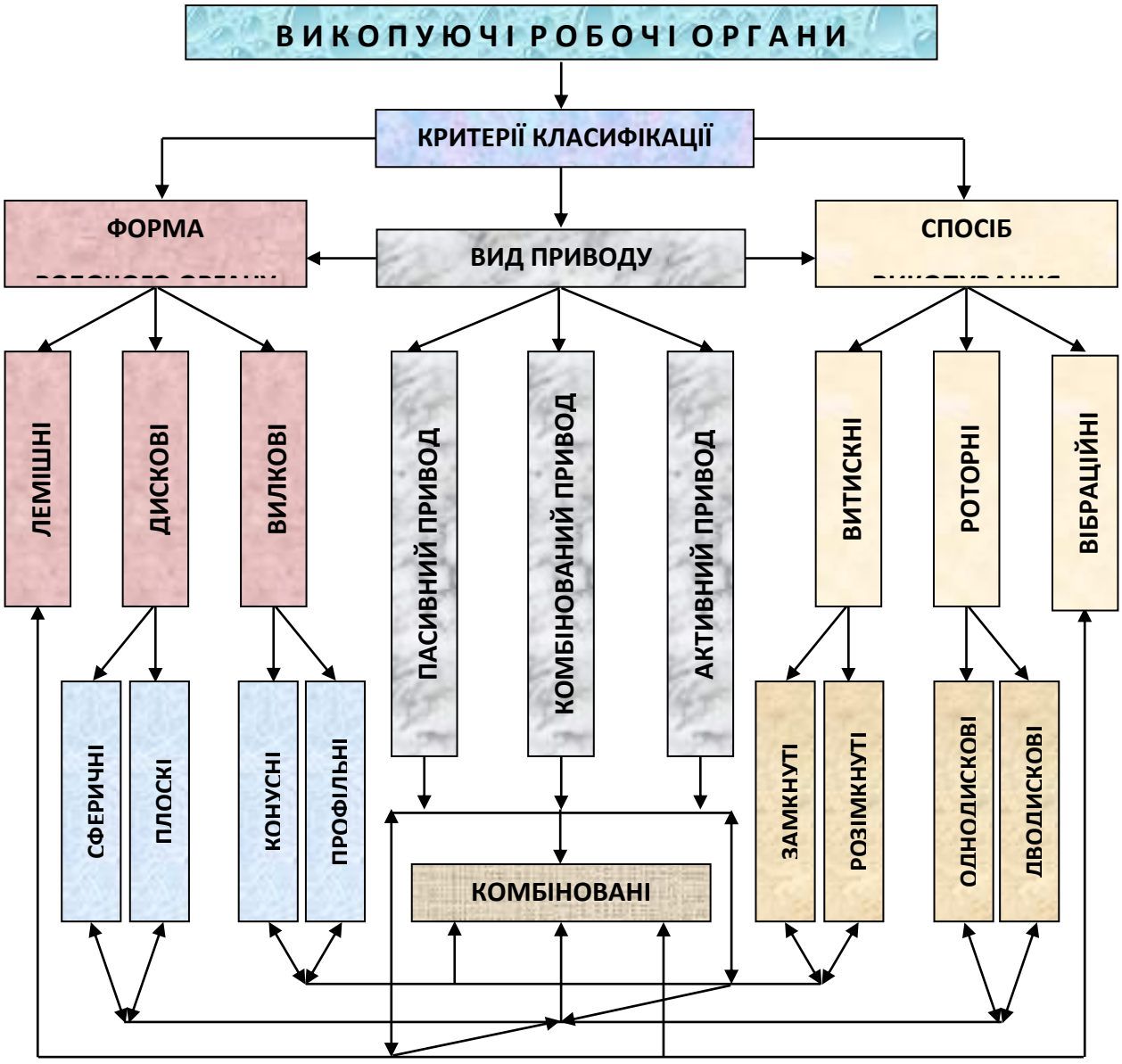
Додаток А.3.1




Класифікація реалізації способів збирання гички коренеплодів

Додаток А.4.1

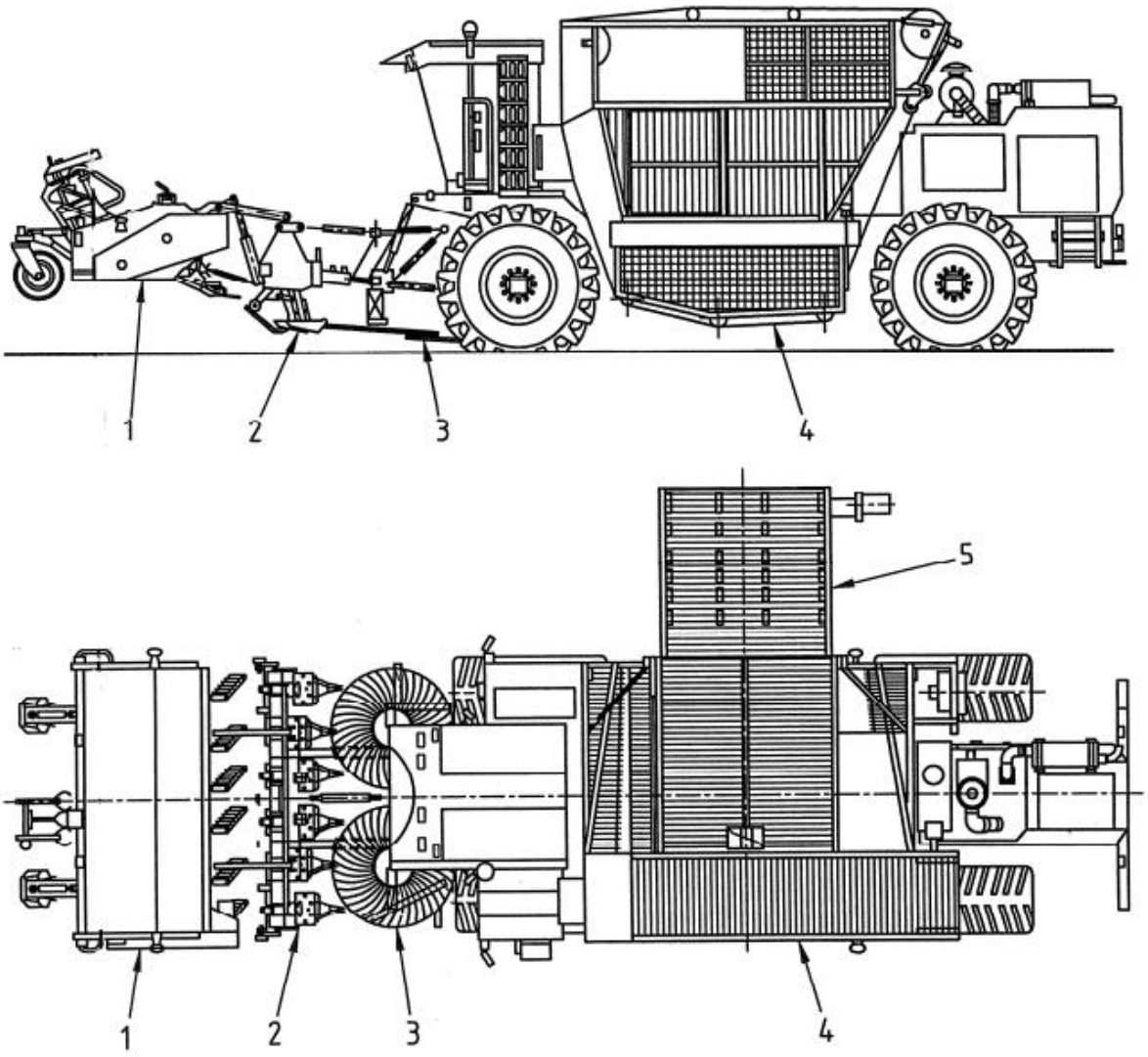
Класифікація робочих органів для викопування коренеплодів [68]



Додаток А.5.1

Структурно-модульна схема побудови

сучасних самохідних бункерних комбайнів

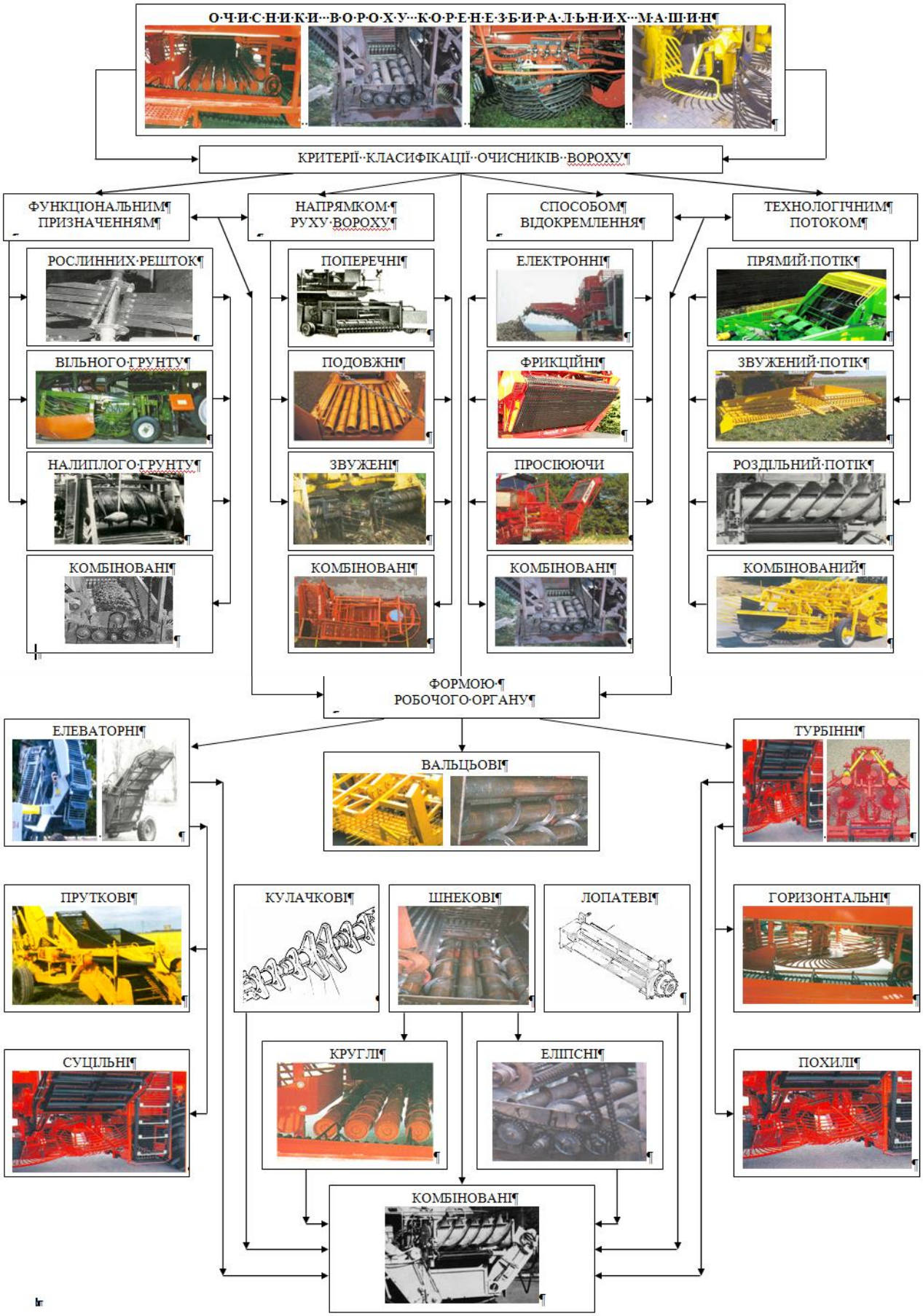



1 – модуль зрізування гички коренеплодів; 2 – модуль викопування коренеплодів; 3 – модуль очищення коренеплодів від домішок;

4 – завантажувальний модуль; 5 – бункер-накопичувач коренеплодів

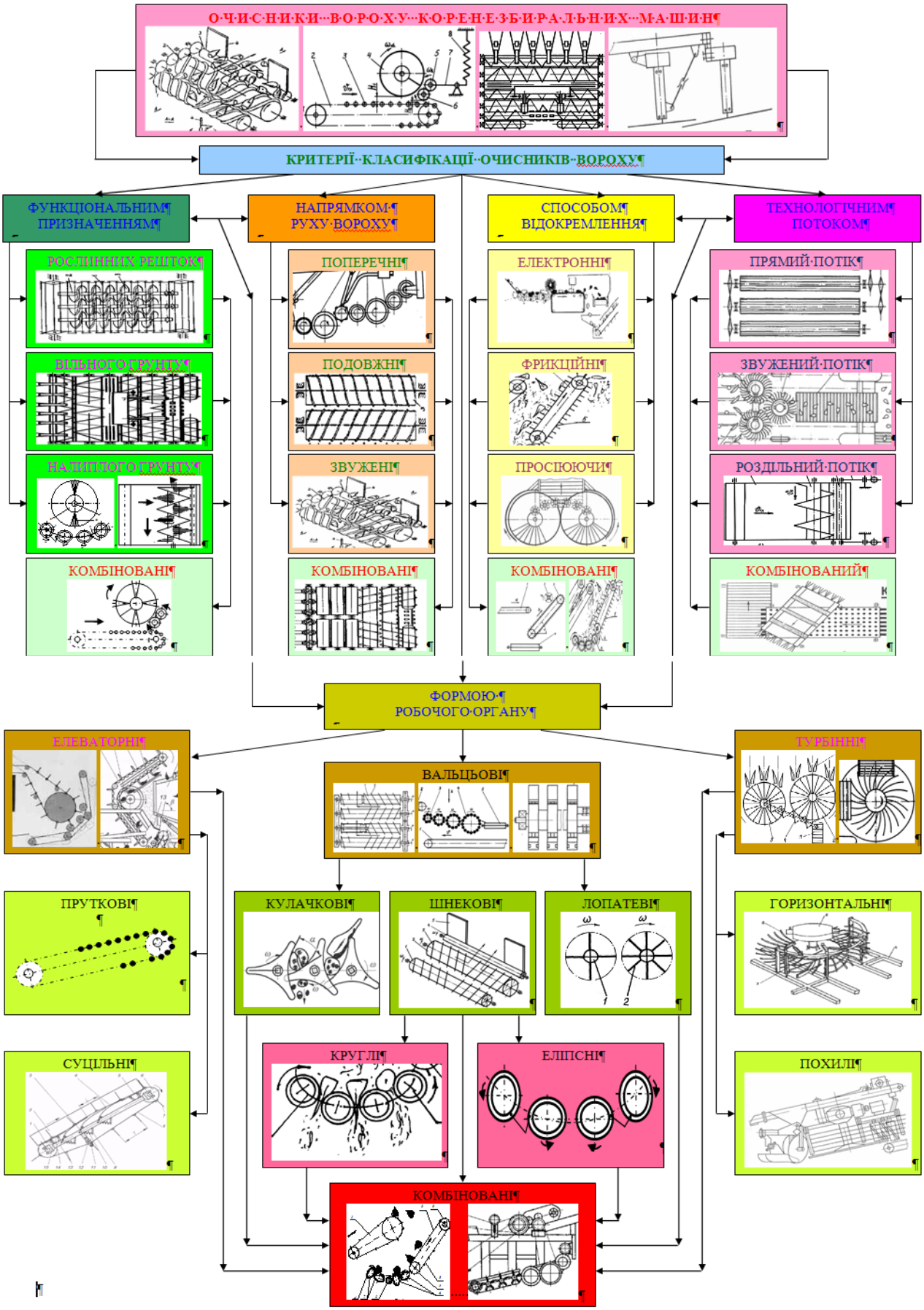
Додаток А.6.1

Загальні вигляди очисних робочих органів



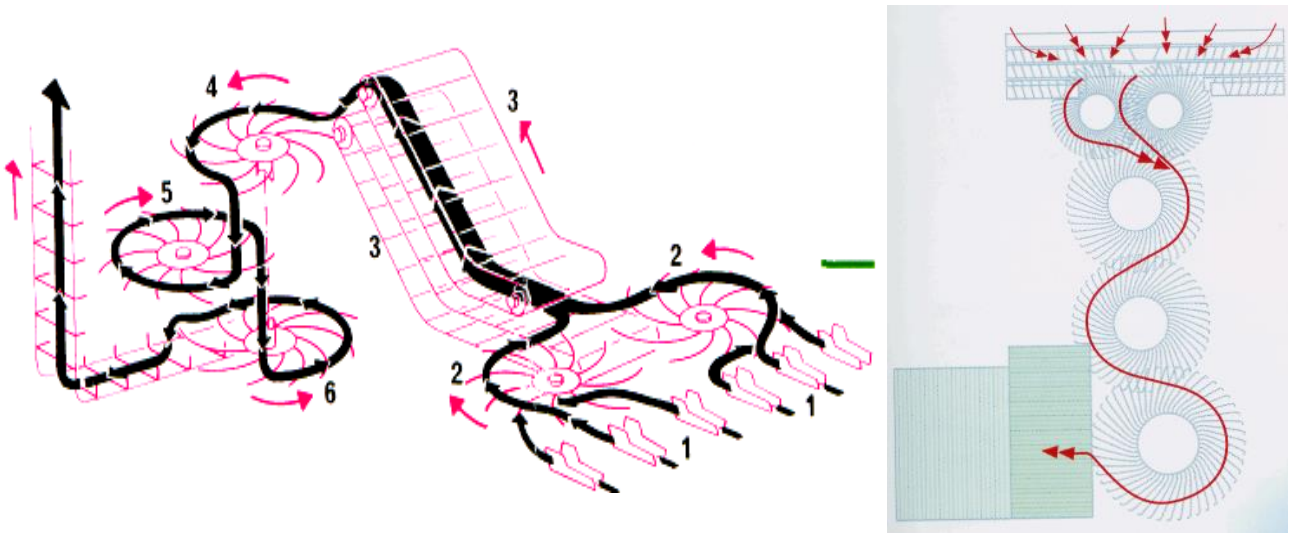
Додаток А.7.1

Конструктивні схеми очисних робочих органів



Додаток А.8.1

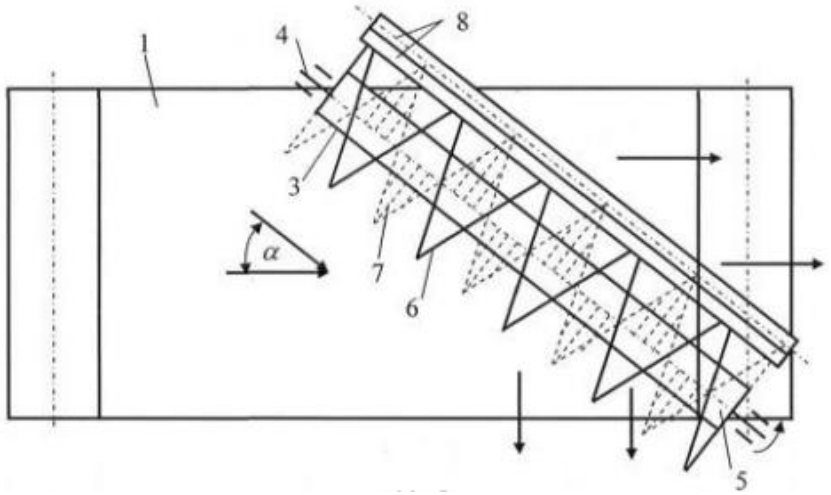
Структурна схема варіанту розташування турбінних очисників у загальній схемі коренезбиральної машини




1 – копачі; 2 – приймальні турбіни; 3 – двоконтурний елеватор; 4, 5 , 6 – передавальні турбіни

Додаток А.9.1

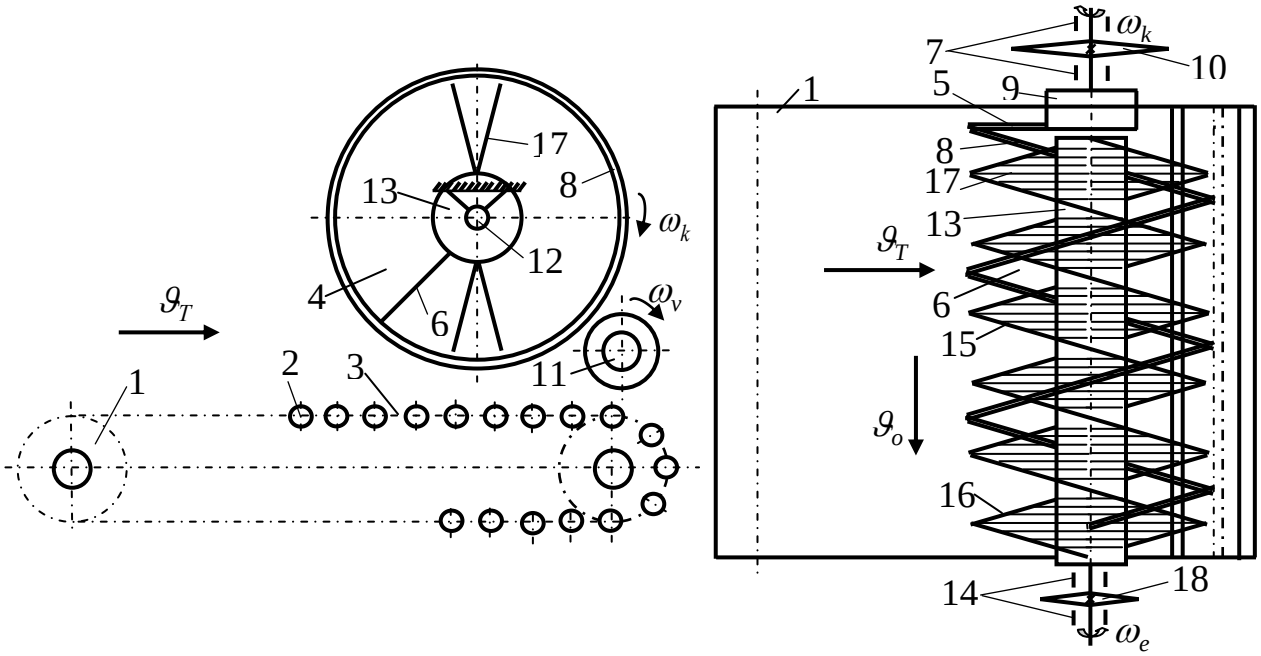
Конструктивна схема очисника вороху:




1 – подавальний транспортер; 4 – вал; 5 – труба; 6 – виток; 7 – очисні елементи

Додаток А.10.1

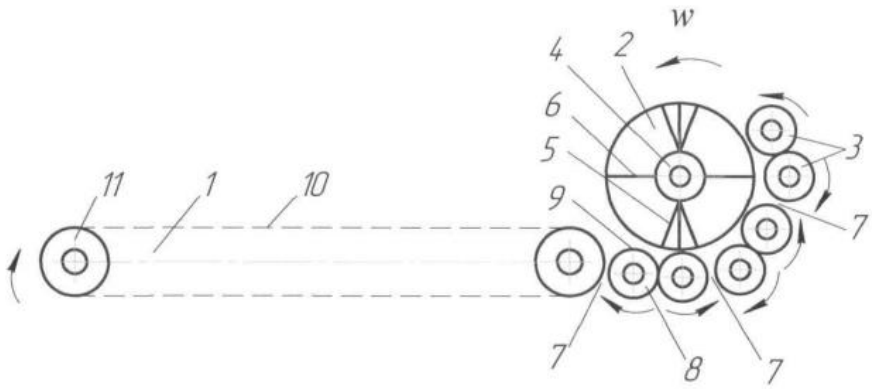
Конструктивна схема очисника вороху




1 – подавальний транспортер; 2 – пруток; 3 – робоча гілка; 4 – комбінований робочий орган; 5 – пустотілий гвинтовий циліндр; 6 – виток; 7, 14 – опора; 8 – труба; 9 – фланець; 10, 18 – зірочка; 11 – відкидний валець; 12 – приводний вал; 13 – барабан; 15, 16 – гвинтова лінія; 17 – очисні елементи

Додаток А.11.1

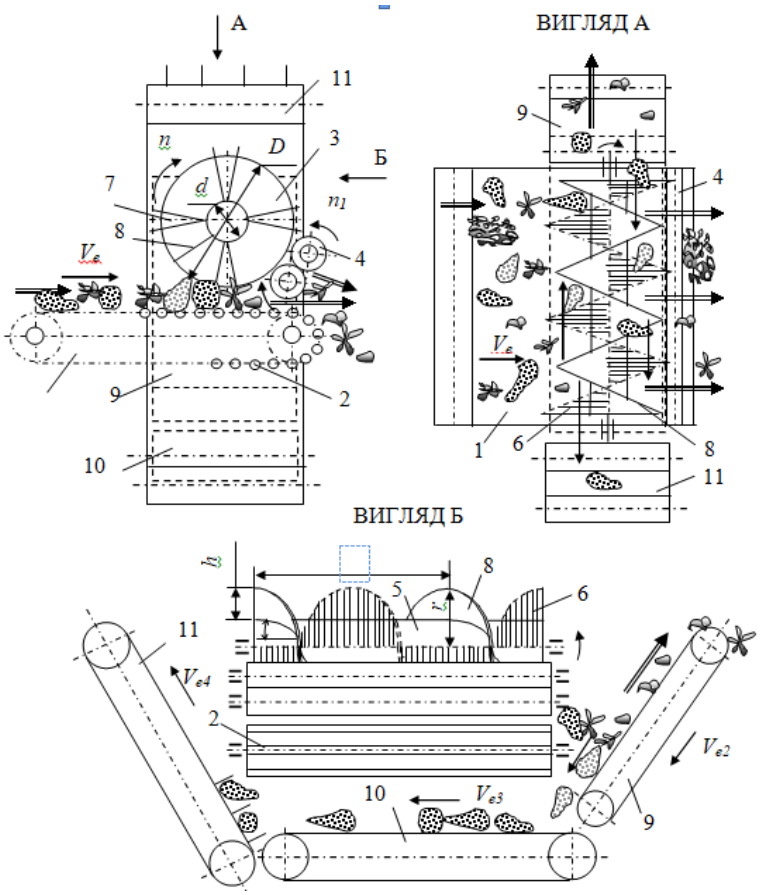
Конструктивна схема очисника вороху




1 – подавальний транспортер; 2 – шнек; 3 – відминальні вальці; 4 – барабан; 5 – пружні очисні елементи; 6 – виток шнека; 7 – зазор; 8 – спіральні вальці; 9 – виток спірального вальця

Додаток А.12.1

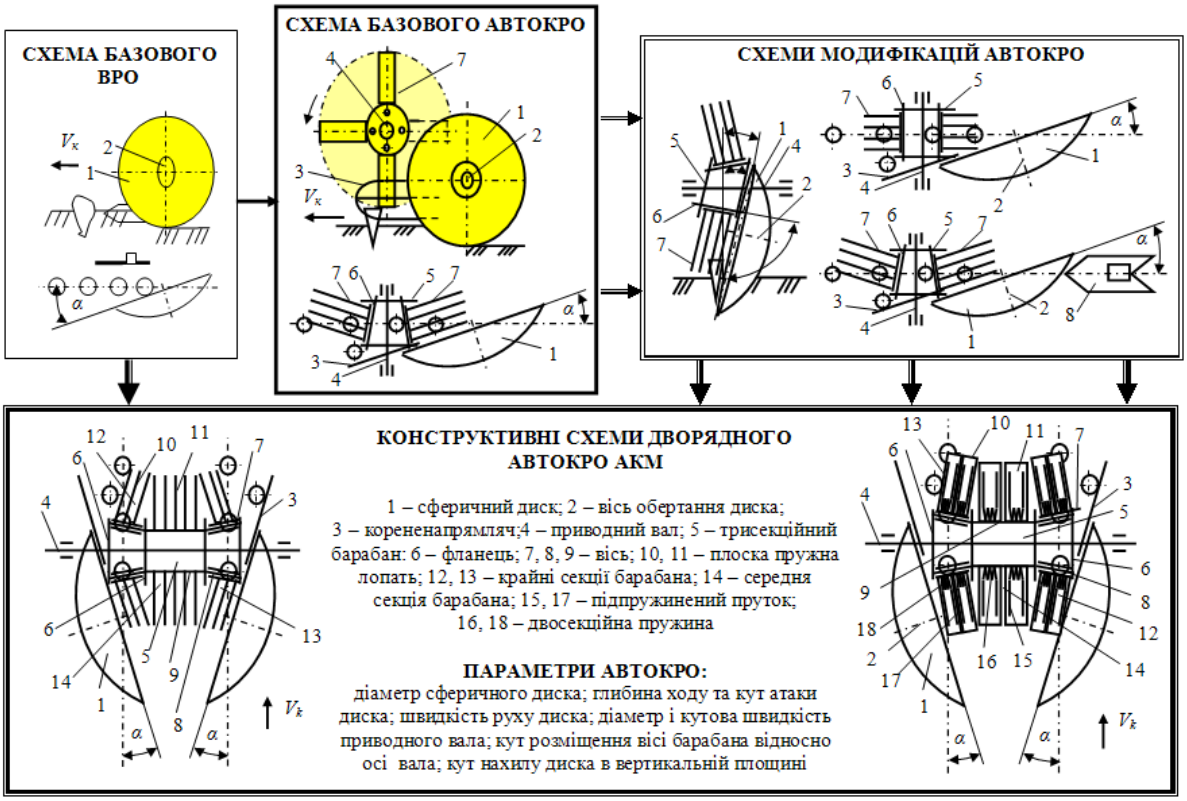
Конструктивно-технологічна схема очисної системи



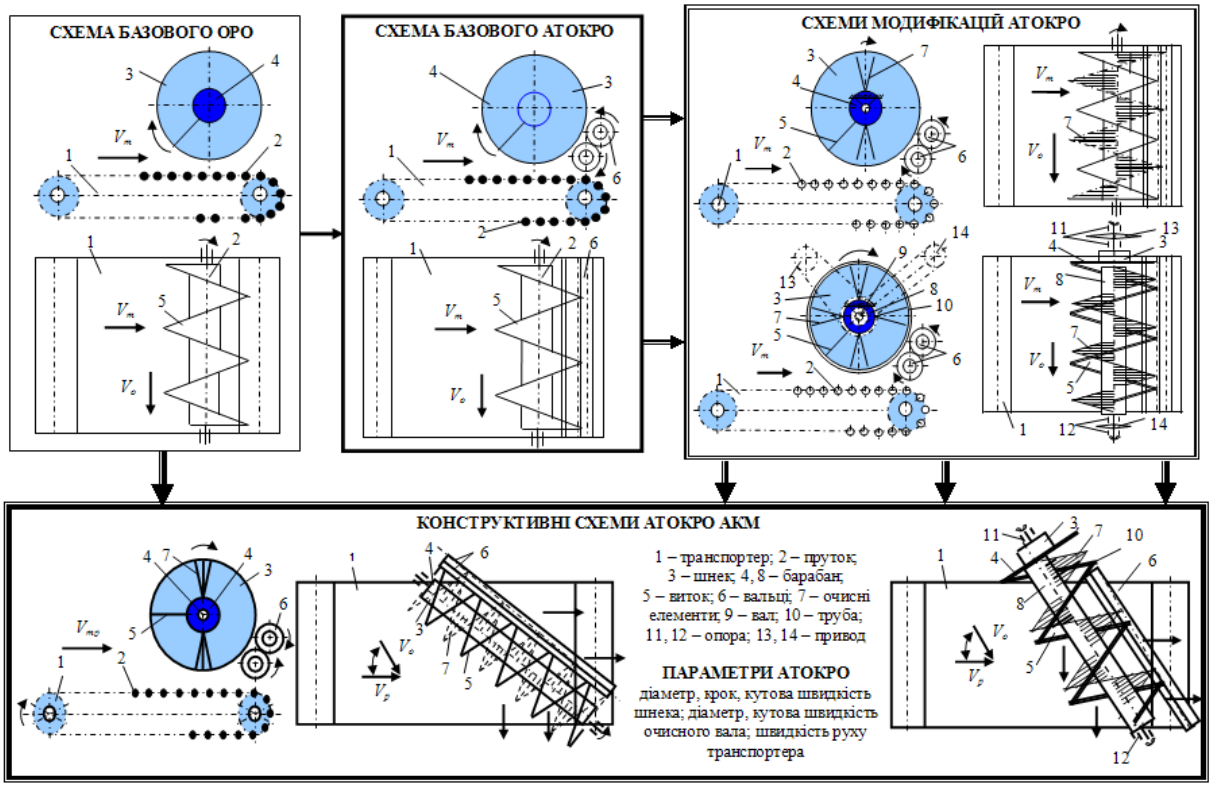

1 – подавальний транспортер; 2 – пруток; 3 – гвинт; 4 – відминальні вальці; 5 – труба; 6 – пружні очисні елементи; 7 – пучки ворсу; 8 – виток гвинта; 9 – очисна гірка; 10, 11 – поперечний прутковий та вивантажувальний транспортери

Додаток А.14.2

Ідентифікація процесу розробки компонувальної схеми АТОКРО

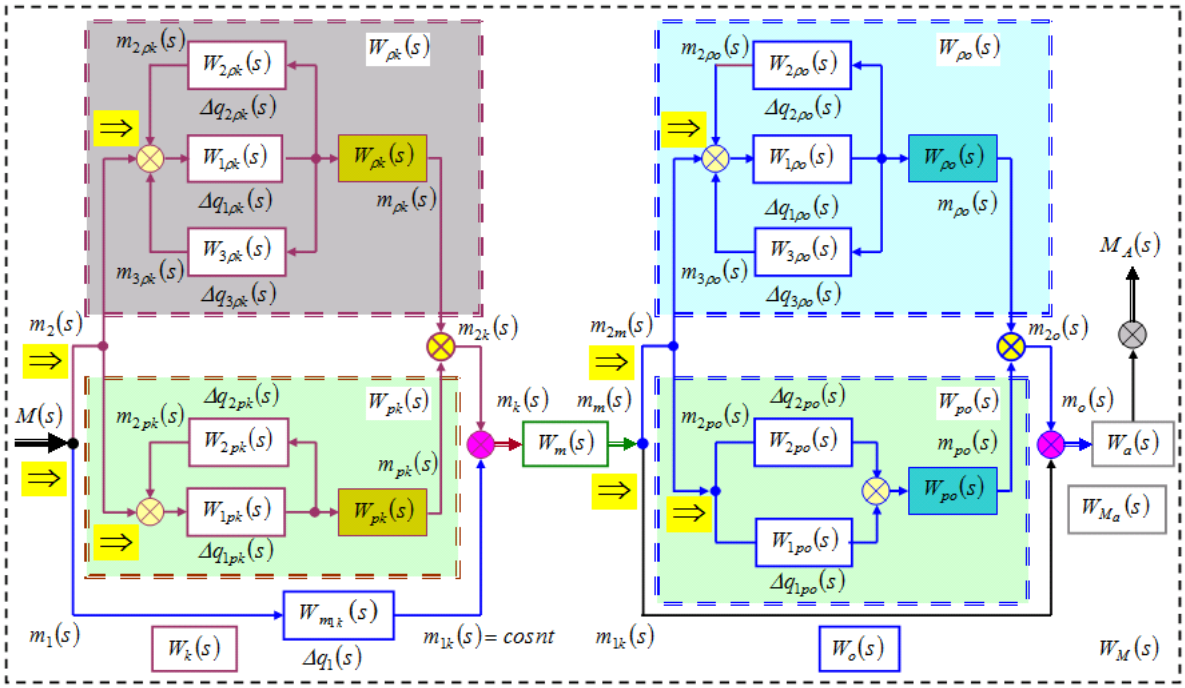



Ідентифікація процесу розробки компонувальної схеми АВТОКРО



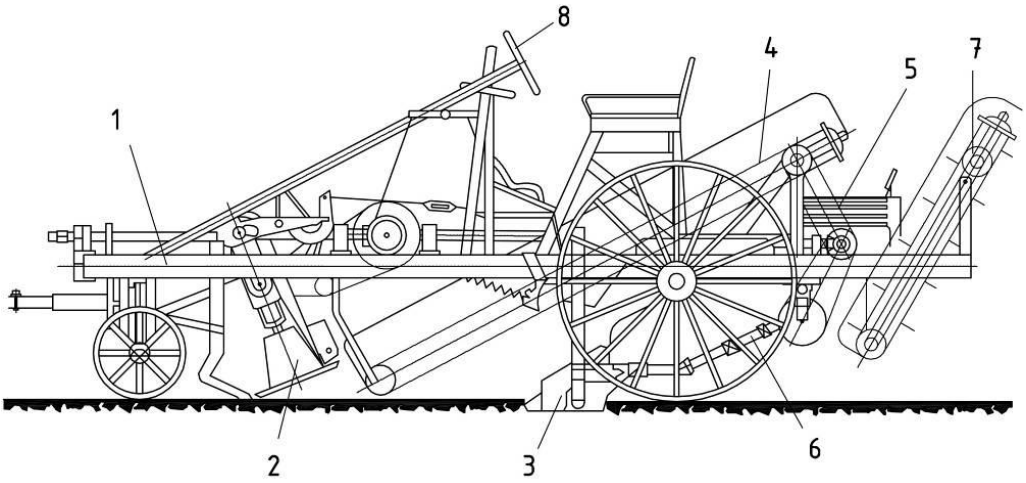
Додаток А.14.2

Структурно-функціональна модель процесу інтенсифікації відокремлення домішок від коренеплодів робочими органами транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин




Додаток А.15.2

Конструктивна схема коренезбирального комбайна КС-4




1 – рама; 2 – гичкозрізувальний апарат; 3 – копач; 4 – транспортер коренеплодів; 5 – транспортер гички; 6 – механізм регулювання; 7 – гірка

Додаток А.16.2

Структурний аналіз агентної моделі

Агрегат – трактор + сільськогосподарське знаряддя

$I = \{i_\gamma\}$ – множина параметрів сільськогосподарського агрегата (внутрішні стани агента)

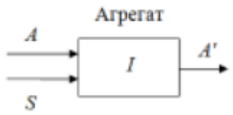
$i_1$ – швидкість руху агрегату

$i_2$ – ширина захвату

$i_3$ – маса агрегату

$i_4$ – потужність двигуна

$i_5$ – витрати пального




$A = \{a_k\}$ – множина дій інших агентів

$a_1$ – рухатися

$a_2$ – не рухатися

$A' = \{a'_k\}$ – множина власних дій агента

$a'_1$ – рухатися

$a'_2$ – не рухатися

Функція агента

$g : S \times I \times A \to A'$

Зовнішнє середовище

$S = \{s_i\}$ – множина станів зовнішнього середовища, а саме його некерованих параметрів

$s_1$ – вологість грунту

$s_2$ – температура грунту

$s_3$ – щільність грунту

$s_4$ – нерівність поверхні поля

Грунт і насіння

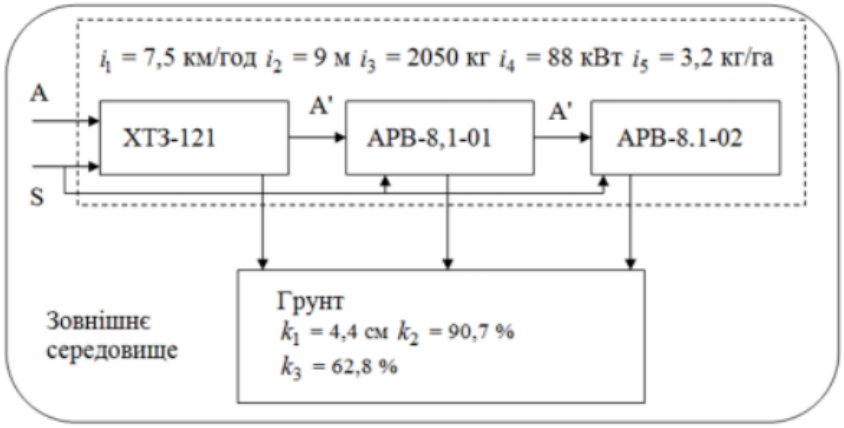
$K = \{k_n\}$ – множина керованих параметрів грунту (критеріїв)

$k_1$ – глибина обробітку

$k_2$ – подрібнення спушеного шару грунту до 25мм

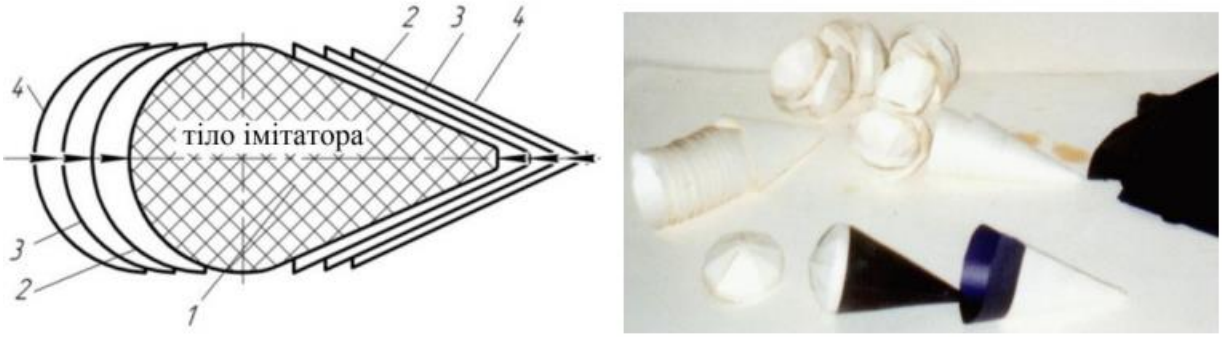
$k_3$ – польова схожість насіння

Функція оновлення параметрів грунту $h : S \times A' \times K \to K$




Додаток А.17.2

Схема імітатора коренеплоду




а б

а – схема розташування обгорток; б – загальний вигляд імітатора коренеплоду

Додаток Б.1.3

Порядок обчислення інтегрального виразу (2.16)

$$\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{чKi}(t)}{dt}=\rho_k q_{1kj}\int_0^{l_{1k}}\left(\iint_{S_{1z}} f(z,y,x)\,dxdy\right)dz+$$

$$+\rho_k q_{2kj}\int_0^{l_{2k}}\left(\iint_{S_{2z}} f(z,y,x)\,dxdy\right)dz+,,,+\rho_k q_{N_k kj}\int_0^{l_{N_k k}}\left(\iint_{S_{N_k z}} f(z,y,x)\,dxdy\right)dz.$$

Визначимо масу одного *j*-го коренеплоду, при цьому згідно з [245] та (2.16) маємо

$$m_j=\rho_k\int_0^{l_{jk}}\left(\iint_{S_{jz}} f(z,y,x)\,dxdy\right)dz.$$

Приймаємо, що $f(z,y,x)=z/\sqrt{z^2+y^2+x^2}$.

Тоді інтеграл по області $S_{iz}$ можна обчислити шляхом введення полярних координат $y=\rho\cos\varphi$, $x=\rho\sin\varphi$, або при цьому можна записати

$$I_i(z)\rho_k=\rho_k\iint_{S_{jz}}\frac{z}{\sqrt{z^2+y^2+x^2}}\,dxdy=\rho_k\int_0^{2\pi}\int_0^{0{,}5D_{ik}z}\frac{z}{\sqrt{z^2+\rho^2}}\,\rho d\rho d\varphi.$$

Робимо підстановку $\rho=\sqrt{\rho^2+z^2}$.

Тоді маємо

$$I_i(z)\rho_k=2\pi z\rho_k\int_z^{z\sqrt{1+(0{,}5D_{ik}/h_{ik})}}du=\frac{2\pi z^2}{h_{ik}}(l_{ik}-h_{ik}),$$

де $l_{ik}=\sqrt{(0{,}5D_{ik})^2+h_{ik}^2}$.

Тому значення шуканого потрійного інтегралу (2.15), або його запису у вигляді (2.16) буде дорівнювати:

$$\rho_k\int_0^{h_{ik}}I_i(z)\,dz=\frac{2\pi}{3}h_{ik}^2(l_{ik}-h_{ik}).$$

Таким чином, маємо

$$\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{чKi}(t)}{dt}=\frac{2\pi\rho_k}{3}\left[q_{1k}h_{1k}^2(l_{1k}-h_{1k})+q_{2k}h_{2k}^2(l_{2k}-h_{2k})+,,,+q_{N_k k}h_{N_k k}^2\left(l_{N_k k}-h_{N_k k}\right)\right].$$

Додаток Б.2.3

Порядок обчислення інтегрального виразу (2.34)

$$\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{V_z i}}{dt}=\frac{1}{t}\rho_z N_k\int_0^{a_g}\left(\iint_{S_z} f(x,y,z)\,dydz\right)dx.$$

Визначимо площу сегмента $S_z$, яка перпендикулярна великій осі еліпса, рис. 1.

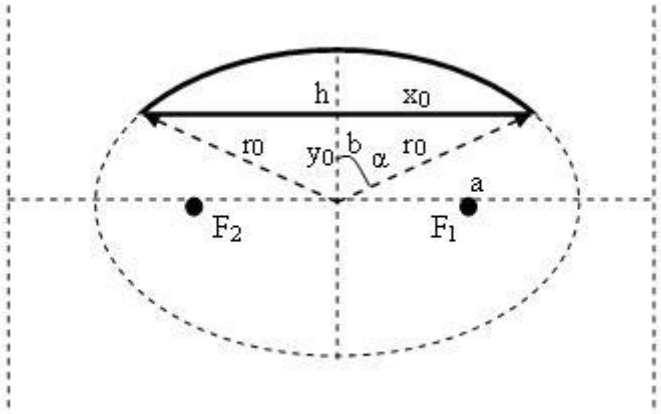



Рисунок 1 – Схема до визначення площі сегмента еліпса

При цьому

$$S_z=\iint\limits_{\substack{\frac{x}{a^2}+\frac{y}{b^2}\le 1\\ y\ge x_0}} dxdy=\int_{x_0}^{a}dx\int\limits_{-\frac{b}{a}\sqrt{a^2-x^2}}^{\frac{b}{a}\sqrt{a^2-x^2}}dy=\int_{x_0}^{a}y\left|\begin{matrix}\frac{b}{a}\sqrt{a^2-x^2}\\ -\frac{b}{a}\sqrt{a^2-x^2}\end{matrix}\right.dx=\int_{x_0}^{a}\frac{2b}{a}\sqrt{a^2-x^2}\,dx;$$

$$\int_{x_0}^{a}\frac{2b}{a}\sqrt{a^2-x^2}\,dx=ab\arccos\frac{x_0}{a}-x_o y_o.$$

Замінивши складові виразу $ab\arccos\frac{x_0}{a}-x_o y_o$ на відповідні буквені позначення та враховуючи запис (2.34), отримаємо

$$\sum_{i=1}^{N_k}\frac{d\Pi_{V_z i}}{dt}=\frac{a_g}{t}\rho_z N_k\left[\frac{D_\partial^2\sin\gamma_\partial}{4}\arccos\left(2h_\partial/D_\partial\right)-\frac{h_\partial D_\partial}{2}\right].$$

Додаток В.1.2

Порядок виведення залежності (3.25), або диференціального рівняння руху компонента на елементарному шляху $dx$

$$\begin{cases} N_n \cos\varepsilon - (dm_в) g + (dm_в) a_в \sin\varepsilon - N_n f_m \sin\varepsilon - \eta_c (dm_в) g f_c \sin\varepsilon = 0_{Oy} \\ (dm_в) a_в \cos\varepsilon - N_n \cos\varepsilon - N_n f_m \cos\varepsilon - \eta_c (dm_в) g f_c \cos\varepsilon = 0_{Ox} \end{cases}. \quad (1)$$

1. Визначаємо $N_n$ з першого рівняння системи (1):

$$N_n \cos\varepsilon - (dm_в) g + (dm_в) a_в \sin\varepsilon - N_n f_m \sin\varepsilon - \eta_c (dm_в) g f_c \sin\varepsilon = 0_{Oy};$$

$$N_n \cos\varepsilon - N_n f_m \sin\varepsilon = (dm_в) g - (dm_в) a_в \sin\varepsilon + \eta_c (dm_в) g f_c \sin\varepsilon;$$

$$N_n (\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon) = (dm_в)(g - a_в \sin\varepsilon + \eta_c g f_c \sin\varepsilon);$$

$$N_n = \frac{(dm_в)\left[ g(1 + \eta_c f_c \sin\varepsilon) - a_в \sin\varepsilon \right]}{(\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon)}. \quad (2)$$

2. Підставляємо значення $N_n$ з (2) в друге рівняння системи (1):

$$(dm_в) a_в \cos\varepsilon - N_n \cos\varepsilon - N_n f_m \cos\varepsilon - \eta_c (dm_в) g f_c \cos\varepsilon = 0_{Ox};$$

$$(dm_в) a_в \cos\varepsilon - N_n \cos\varepsilon (1 - f_m) - \eta_c (dm_в) g f_c \cos\varepsilon = 0_{Ox};$$

$$a_в \cos\varepsilon = \frac{g(1 + \eta_c f_c \sin\varepsilon) - a_в \sin\varepsilon}{(\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon)} \cos\varepsilon (1 - f_m) + \eta_c g f_c \cos\varepsilon;$$

$$a_в = \frac{g(1 + \eta_c f_c \sin\varepsilon) - a_в \sin\varepsilon}{(\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon)} (1 - f_m) + \eta_c g f_c;$$

$$a_в + \frac{a_в \sin\varepsilon (1 - f_m)}{\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon} = \frac{g(1 + \eta_c f_c \sin\varepsilon)}{(\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon)} (1 - f_m) + \eta_c g f_c;$$

$$a_в \left( 1 + \frac{\sin\varepsilon (1 - f_m)}{\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon} \right) = \frac{g(1 + \eta_c f_c \sin\varepsilon)}{(\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon)} (1 - f_m) + \eta_c g f_c;$$

$$a_в = \frac{\frac{g(1 + \eta_c f_c \sin\varepsilon)}{(\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon)} (1 - f_m) + \eta_c g f_c}{\left( 1 + \frac{\sin\varepsilon (1 - f_m)}{\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon} \right)};$$

$$a_в = g\frac{\left[\frac{\left(1+\eta_c f_c \sin\varepsilon\right)}{\left(\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon\right)}\left(1- f_m\right)+\eta_c f_c\right]}{\left(1+\frac{\sin\varepsilon\left(1- f_m\right)}{\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon}\right)};$$

$$\frac{d^2x}{d\left(t+\tau\right)^2} = \frac{d\vartheta_в}{d\left(t+\tau\right)} = g\frac{\left[\frac{\left(1+\eta_c f_c \sin\varepsilon\right)}{\left(\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon\right)}\left(1- f_m\right)+\eta_c f_c\right]}{\left(1+\frac{\sin\varepsilon\left(1- f_m\right)}{\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon}\right)};$$

$$\frac{d^2x}{d\left(t+\tau\right)^2} = \frac{d\vartheta_в}{d\left(t+\tau\right)} = \frac{g}{\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon}\frac{\left[\frac{\left(1+\eta_c f_c \sin\varepsilon\right)}{\left(\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon\right)}\left(1- f_m\right)+\eta_c f_c\right]}{\cos\varepsilon + \sin\varepsilon};$$

$$\frac{d^2x}{d\left(t+\tau\right)^2} = \frac{d\vartheta_в}{d\left(t+\tau\right)} = \frac{g\left(\cos\varepsilon + \sin\varepsilon\right)}{\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon}\left[\frac{\left(1+\eta_c f_c \sin\varepsilon\right)}{\left(\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon\right)}\left(1- f_m\right)+\eta_c f_c\right];$$

$$\frac{d^2x}{d\left(t+\tau\right)^2} = \frac{d\vartheta_в}{d\left(t+\tau\right)} = \frac{g\left(\cos\varepsilon + \sin\varepsilon\right)}{\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon}\left[\frac{1+\eta_c f_c\left[\left(1- f_m\right)\sin\varepsilon + \left(\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon\right)\right]}{\left(\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon\right)}\right];$$

$$\frac{d^2x}{d\left(t+\tau\right)^2} = \frac{d\vartheta_в}{d\left(t+\tau\right)} = \frac{g\left(\cos\varepsilon + \sin\varepsilon\right)}{\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon}\left[\frac{1+\eta_c f_c\left[\left(1- f_m\right)\sin\varepsilon\right]}{\left(\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon\right)}+1\right]. \qquad (3)$$

3. Підставляємо значення $\eta_c$ з (3.24) в рівняння (3):

$$\frac{d^2x}{d\left(t+\tau\right)^2} = \frac{d\vartheta_в}{d\left(t+\tau\right)} = \frac{g\left(\cos\varepsilon + \sin\varepsilon\right)}{\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon}\left[\frac{1+\left(\frac{1{,}2+tg\varepsilon}{1+2tg^2\varepsilon}\right)\psi f_c\left[\left(1- f_m\right)\sin\varepsilon\right]}{\left(\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon\right)}+1\right];$$

$$\frac{d^2x}{d\left(t+\tau\right)^2} = \frac{d\vartheta_в}{d\left(t+\tau\right)} = \frac{g\left(\cos\varepsilon + \sin\varepsilon\right)}{\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon}\times$$

$$\times\left[\left(\frac{2tg^2\varepsilon + tg\varepsilon + 2{,}2}{\left(1+2tg^2\varepsilon\right)\left(\cos\varepsilon - f_m \sin\varepsilon\right)}\right)\psi f_c\left[\left(1- f_m\right)\sin\varepsilon\right]+1\right].$$

Додаток В.2.2

Порядок виведення рівняння (3.32)

$$h_{\max} = B_m \frac{k_з - tg\varepsilon}{\eta_c f_m};\ k_з = \psi\left( f_m + \frac{\tau_0}{h_c \rho_в g} \right).$$

Підставляємо значення $\eta_c$ з (3.24) та значення $k_з$ в перше рівняння:

$$h_{\max} = B_m \frac{\psi\left( f_m + \frac{\tau_0}{h_c \rho_в g} \right) - tg\varepsilon}{\eta_c f_m};$$

$$h_{\max} = B_m \frac{\psi\left( f_m + \frac{\tau_0}{h_c \rho_в g} \right) - tg\varepsilon}{\frac{1,2 + tg\varepsilon}{1 + 2tg^2\varepsilon}\psi f_m};$$

$$h_{\max} = B_m \frac{\left(1 + 2tg^2\varepsilon\right)\left[\left( \psi\left( tg\varepsilon + \frac{\tau_0}{h_c \rho_в g} \right)\right) - tg\varepsilon\right]}{\left(1,2 + tg\varepsilon\right)\psi tg\varepsilon}.$$

Додаток В.3.2

Порядок виведення рівняння (3.41)

$$\frac{d\Pi_m}{dt} = \frac{\left(1 + 2tg^2\varepsilon\right)\left[ \psi\left( tg\varepsilon + \frac{\tau_0}{h_c \rho_в g} \right) - tg\varepsilon\right]}{\left(1,2 + tg\varepsilon\right)\psi tg\varepsilon} B_m^2 \vartheta_m k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з;$$

$$\frac{d\Pi_m}{dt} = \frac{\left(1 + 2tg^2\varepsilon\right)\psi tg\varepsilon + \frac{\tau_0\left(1 + 2tg^2\varepsilon\right)\psi}{h_c \rho_в g} - tg\varepsilon\left(1 + 2tg^2\varepsilon\right)}{\left(1,2 + tg\varepsilon\right)\psi tg\varepsilon} B_m^2 \vartheta_m k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з;$$

$$\frac{d\Pi_m}{dt}\left(1,2 + tg\varepsilon\right)\psi tg\varepsilon =$$

$$= \left[\left(1 + 2tg^2\varepsilon\right)\psi tg\varepsilon + \frac{\tau_0\left(1 + 2tg^2\varepsilon\right)\psi}{h_c \rho_в g} - tg\varepsilon\left(1 + 2tg^2\varepsilon\right)\right] B_m^2 \vartheta_m k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з;$$

$$\frac{d\Pi_m}{dt}\frac{\left(1,2 + tg\varepsilon\right)\psi tg\varepsilon}{B_m^2 \vartheta_m k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з} = \left(1 + 2tg^2\varepsilon\right)\psi tg\varepsilon + \frac{\tau_0\left(1 + 2tg^2\varepsilon\right)\psi}{h_c \rho_в g} - tg\varepsilon\left(1 + 2tg^2\varepsilon\right):$$

$$\frac{d\Pi_m}{dt}\frac{\left(1,2 + tg\varepsilon\right)\psi tg\varepsilon}{B_m^2 \vartheta_m k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з} - \left(1 + 2tg^2\varepsilon\right)\psi tg\varepsilon + tg\varepsilon\left(1 + 2tg^2\varepsilon\right) = \frac{\tau_0\left(1 + 2tg^2\varepsilon\right)\psi}{h_c \rho_в g};$$

Продовження додатку В.3.2

$$\left[\frac{d\Pi_m}{dt}\frac{(1,2+tg\varepsilon)\psi tg\varepsilon}{B_m^2\vartheta_m k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з} - \left(1+2tg^2\varepsilon\right)\psi tg\varepsilon + tg\varepsilon\left(1+2tg^2\varepsilon\right)\right]h_c\rho_в g = ;$$
$$= \tau_0\left(1+2tg^2\varepsilon\right)\psi$$

$$h_c = \frac{\tau_0\left(1+2tg^2\varepsilon\right)}{\left[\frac{d\Pi_m}{dt}\frac{(1,2+tg\varepsilon)}{B_m^2\vartheta_m k_\vartheta \rho_в k_\varepsilon \xi_з} - \left(1+2tg^2\varepsilon\right) + \frac{1}{\psi}\left(1+2tg^2\varepsilon\right)\right]\rho_в g tg\varepsilon};$$

$$h_c = \frac{\tau_0\left(1+2tg^2\varepsilon\right)}{\left[\frac{d\Pi_m}{dt}\frac{(1,2+tg\varepsilon)}{B_m^2\vartheta_m k_\vartheta k_\varepsilon \xi_з} - \rho_в\left(1+2tg^2\varepsilon\right)\left(1+\frac{1}{\psi}\right)\right]gtg\varepsilon}.$$

Додаток В.4

## Математична модель функціонального процесу переміщення компонентів вороху до очисної гірки

Переміщення компонентів вороху до робочих органів комбінованого робочого органу 3 (рис. 2.9) розглянемо в аспекті моделювання третьої (***3***) (рис. В.4.1) та четвертої стадії технологічного процесу роботи ОТТМ: третя стадія (***3***) – переміщення компонентів вороху до очисної гірки 2; четверта стадія – переміщення компонентів вороху до шнеків 9 та приводного очисного вала 6.

Найбільш раціональним у плані ефективності відокремлення домішок від коренеплодів на очисній гірці 8 (рис. В.4.1), є скочування компонентів вороху (у подальшому обмежимося тільки поняттям, що компонент – це коренеплід), тобто коренеплоду 7 до системи шнеків 9.

Початковий момент контакту коренеплоду з поверхнею робочої гірки 8 повинен відбуватися за умови, що точка дотику $A$ коренеплоду повинна бути розташована на відстані $l_A \cong 1/3L_г$, або не більше $l_A \le 1/3L_г$ відносно приводного вала очисної гірки 8 [1, 280], де $L_г$ – довжини гірки, м.

За такої умови усувається можливість переміщення коренеплоду вгору, або усувається можливість винесення коренеплоду за межі гірки, або втрати коренеплодів.

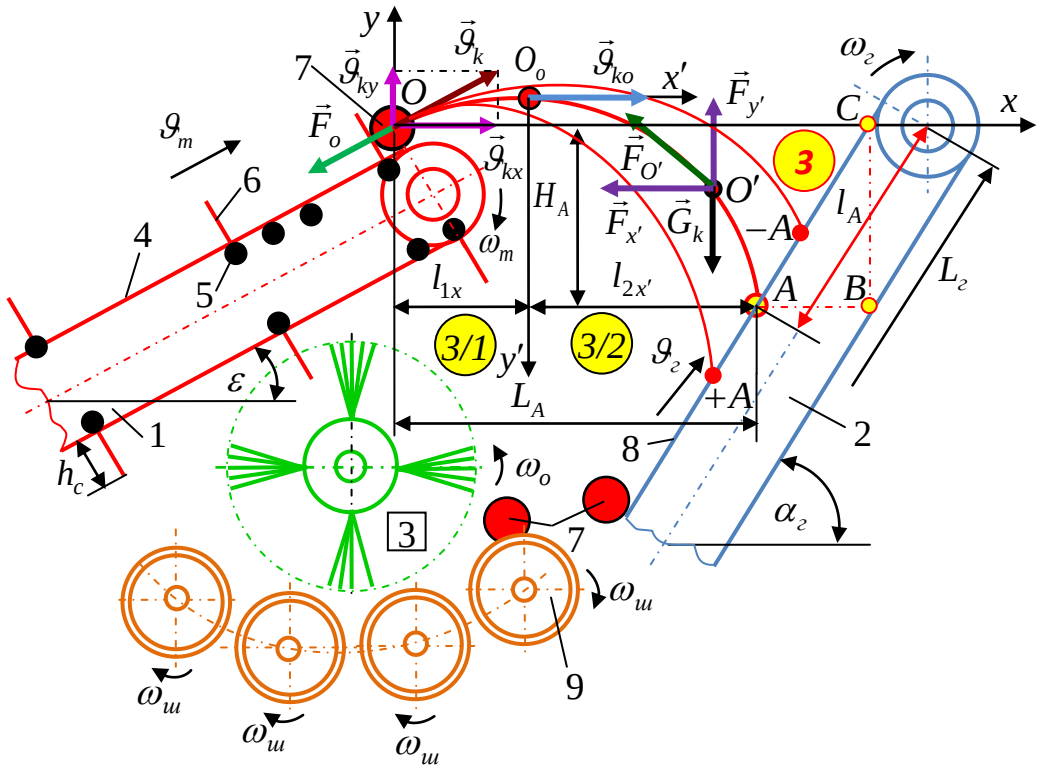



Рисунок В.4.1 – Схема до розрахунку переміщення коренеплоду з похилого транспортера до очисної гірки: 1 – похилий транспортер; 2 – очисна гірка; 3 – комбінований робочий орган; 4 – робоча гілка похилого транспортера; 5 – пруток; 6 – скребок; 7 – коренеплід; 8 – робоча гілка очисної гірки; 9 – шнек

Вирішення задачі зводиться до визначення початкової горизонтальної швидкості руху компонента 7 вороху (рис. В.4.1) відносно скребка 6 похилого транспортера 1, за якої забезпечується попадання компонента у задану точку з координатами $A(x_A; y_A)$.

Початок переміщення або польоту коренеплоду 7 (рис. 3.10) до точки $A$, розташованої на площині робочої гілки 8, яка належить робочій вітці очисної гірки 2, встановленої під кутом $\alpha_г$ до горизонту, починається в момент сходження коренеплоду з поверхні скребка 6 похилого транспортера 1, який встановлений під кутом $\varepsilon$ відносно горизонтальної площини.

При цьому початкова швидкість сходження коренеплоду зі скребка становить $\vartheta_k$, а політ коренеплоду до точки дотику $A$, є не що інше, як рух тіла масою $m_k$, яке переміщується в повітряному середовищі під кутом до горизонтальної площини, або під кутом $\varepsilon$ установки похилого транспортера до горизонту.

Формалізацію процесу переміщення коренеплоду із похилого транспортера до робочої поверхні очисної гірки сформулюємо таким чином:

- приймаємо процес переміщення коренеплоду як його політ з моменту відриву від точки $O$ до точки $A$, при цьому розглянемо два етапи польоту:

- на першому етапі ($З_1$) розглядаємо політ коренеплоду масою $m_k = V_k \rho_k$ з точки $O$ у точку $O_o$ (де $\rho_k$ – питома маса коренеплоду, кг/м$^3$), де коренеплід переміщується в свою точку максимального підйому відносно осі $Ox$ з початковою швидкістю $\vartheta_k = \vartheta_m k_\vartheta$, вектор якої направлений під кутом $\varepsilon$ до осі $Ox$ статичної системи координат $Oxy$, де вісь $Oy$ направлена вертикально вгору;

- на другому етапі ($З_2$) розглядаємо політ коренеплоду з точки $O_o$ у точку $A$; при цьому на етапі ($З_1$) та на етапі ($З_2$) – відповідно з початковою швидкістю $\vartheta_{ko}$, вектор якої направлений вздовж горизонтальної осі $O_o x'$ статичної системи координат $O_o x'y'$ та паралельно осі $Ox$, а вісь $O_o y'$ паралельна осі $Oy$, але направлена в протилежну сторону, або вниз;

- на коренеплід діє сила опору повітря $F_o$, вектор якої направлений в зустрічну сторону напрямку вектора $\vec{\vartheta}_k$, при цьому сила опору повітря $F_o$ згідно [282] визначається за формулою $F_o = k_o m_k \vartheta_k = k_o m_k \vartheta_m k_\vartheta = k_o V_k \rho_в \vartheta_m k_\vartheta$ (де $k_o$ – питомий коефіцієнт опору, який залежить від форми та розміру коренеплоду, с/м), тобто сила опору, є пропорційна першій степені швидкості руху коренеплоду на першому $\vartheta_k$ або другому $\vartheta_{ko}$ етапах.

На основі відомих положень [282] та враховуючи напрямок сили $F_o$ опору повітря ($F_o$ направлена протилежно вектору $\vec{\vartheta}_k$) на першому ($З_1$) етапі (***З***) стадії переміщення коренеплоду записано:

$$\begin{cases} x = \dfrac{\vartheta_m k_\vartheta \cos\varepsilon}{k_o g}\left(1 - e^{-k_o g t_{3.1}}\right); \\ y = \dfrac{1}{k_o g}\left(\vartheta_m k_{\vartheta_m} \sin\varepsilon + \dfrac{1}{k_o}\right)\left(1 - e^{-k_o g t_{3.1}}\right) - \dfrac{t_{3.1}}{k_o} \end{cases}, \qquad \text{(В.4.1)}$$

де $t_{3.1}$ – час переміщення коренеплоду на першому ($З_1$) етапі стадії (***З***), с;

$$\begin{cases} x = \dfrac{d\varphi_m}{dt} r_m k_\vartheta \dfrac{\cos\varepsilon}{k_o g}\left(1 - e^{-k_o g t_{3.1}}\right); \\ y = \dfrac{1}{k_o g}\left(\dfrac{d\varphi_m}{dt} r_m k_\vartheta \sin\varepsilon + \dfrac{1}{k_o}\right)\left(1 - e^{-k_o g t_{3.1}}\right) - \dfrac{t_{3.1}}{k_o} \end{cases}. \qquad \text{(В.4.2)}$$

Дальність польоту $l_{1x} = x_{t=t_{3.1}}$ коренеплоду на першому ($З_1$) етапі буде залежати від час $t_{3.1}$ його польоту з точки О до точки $O_o$, при цьому точка $O_o$ максимального підйому коренеплоду досягається за умови $\vartheta_{ky} = 0$.

Згідно з положенням [282] та умови $\vartheta_{ky} = 0$, де $\vartheta_{ky} = \dot{y} = dl_y / dt_{3.1}$, визначаємо час $t_{3.1}$, або час максимального підйому коренеплоду

$$\frac{dl_y}{dt_{3.1}} = \left(\frac{1}{k_o g}\left(\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_\nu}{2} k_\vartheta \sin\varepsilon + \frac{1}{k_o}\right)\left(1 - e^{-k_o g t_{3.1}}\right) - \frac{t_{3.1}}{k_o}\right)\frac{d}{dt_{3.1}} = 0. \qquad \text{(В.4.3)}$$

Після спрощення залежності (В.4.3) маємо (додаток В.4.1):

$$\vartheta_{ky} = \frac{1}{e^{k_o g t_{3.1}}}\left(\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_\nu}{2} k_\vartheta \sin\varepsilon + \frac{1}{k_o}\right) - \frac{1}{k_o} = 0, \qquad \text{(В.4.4)}$$

Момент часу $t_{3.1}$ визначимо з рівності (В.4.3):

$$e^{k_o g t_{3.1}} = \left(\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_\nu}{2} k_\vartheta \sin\varepsilon + \frac{1}{k_o}\right) k_o, \qquad \text{(В.4.5)}$$

звідки:

$$t_{3.1} = \frac{1}{k_o g}\ln\left(\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_\nu}{2} k_\vartheta k_o \sin\varepsilon + 1\right). \qquad \text{(В.4.6)}$$

Тоді, згідно з (В.4.6) та першого рівняння системи (В.4.2) визначено дальність польоту $l_{1x} = x_{t=t_{3.1}}$ коренеплоду з точки $O$ у точку $O_o$

$$l_{1x} = x_{t=t_{3.1}} = \frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_\nu}{2} k_\vartheta \frac{\cos\varepsilon}{k_o g}\left(1 - e^{-\ln\left(\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_\nu}{2} k_\vartheta k_o \sin\varepsilon + 1\right)}\right), \qquad \text{(В.4.7)}$$

або:

$$l_{1x} = \frac{\left(\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_\nu}{2}k_\vartheta\right)^2 \sin 2\varepsilon}{2gk_o\left(\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_\nu}{2}k_{\vartheta_m}\sin\varepsilon + \frac{1}{k_o}\right)}; \qquad \text{(В.4.8)}$$

$$l_{1x} = \frac{\pi^2 n_m^2 d_\nu^2 k_{\vartheta_m}^2 \sin\varepsilon\cos\varepsilon}{120gk_o\left(\pi n_m d_\nu k_{\vartheta_m}\sin\varepsilon + \frac{60}{k_o}\right)}. \qquad \text{(В.4.9)}$$

У подальшому проаналізуємо другий ($З_2$) етапі стадії (***З***) польоту коренеплоду до точки $A$, яка має координати $A\left(x'_A; y'_A\right)$.

На цьому етапі на коренеплід, який знаходиться в точці $O'$ (В.4.1) діють такі сили: сила тяжіння $G_k$; сила опору $F_o$ повітря, яка має вертикальну $F_y$ та горизонтальну $F_x$ складові, де вектор сили $\vec{F}_y$ направлений протилежно осі $Oy'$, а вектор $\vec{F}_x$ – протилежно осі $Ox'$.

При цьому, диференційне рівняння руху коренеплоду матиме вигляд

$$m_k\frac{d\vec{\vartheta}_{ko}}{dt_2} = \vec{F}_o + \vec{G}_k, \text{ або } m_k d\vec{\vartheta}_{ko} = \left(\vec{F}_{y'} + \vec{F}_{x'} + m_k\vec{g}\right)dt_{3.2}, \qquad \text{(В.4.10)}$$

або

$$\begin{cases} m_k d\vartheta_{ko_{x'}} = -F_{x'}dt_{3.2}; \\ m_k d\vartheta_{ko_{y'}} = \left(-F_{y'} + m_k g\right)dt_{3.2} \end{cases}, \qquad \text{(В.4.11)}$$

де $\vartheta_{ko_{x'}}$, $\vartheta_{ko_y}$ – проекція швидкості $\vartheta_{ko}$ на вісь $Ox'$, $Oy'$, м/с;

$t_{3.2}$ – час переміщення коренеплоду на другому ($З_2$) етапі, с.

Або згідно з (В.4.10) отримаємо:

$$\begin{cases} m_k d\vartheta_{ko_{x'}} = -\mu_f\vartheta_{ko_{x'}}dt_{3.2}; \\ m_k d\vartheta_{ko_{y'}} = \left(-\vartheta_{ko_{y'}}\mu_f + m_k g\right)dt_{3.2} \end{cases}, \qquad \text{(В.4.12)}$$

де $\mu_f$ – сталий коефіцієнт в'язкого опору повітря, кг/с.

Зважаючи на те, що характер польоту коренеплоду відносно осі $O_o x'$ аналогічний характеру його переміщення на першому ($З_1$) етапі (за аналізом першого рівняння (В.4.12) та відомих положень [282] записано, що

$$x_2' = \frac{\vartheta_{ko_{x'}}}{k_o g}\left(1 - e^{-k_o g t_{3.2}}\right), \qquad \text{(В.4.13)}$$

де $t_{3.2}$ – час переміщення коренеплоду на другому ($З_2$) етапі, с.

Підставивши значення початкової швидкості рух коренеплоду $\vartheta_{ko_{x'}} = \vartheta_k e^{-k_o g t_{3.1}} \cos\varepsilon = \vartheta_m k_\vartheta e^{-k_o g t_{3.1}} \cos\varepsilon$ [282] в рівняння (В.4.12) та згідно з рівнянням (В.4.13) маємо

$$x_2' = \frac{d_\nu k_\vartheta e^{-k_o g t_{3.1}}}{2k_o g} \cos\varepsilon\left(1 - e^{-k_o g t_{3.2}}\right)\frac{d\varphi_m}{dt}. \qquad \text{(В.4.14)}$$

Тоді дальність польоту $l_{2x'} = x'_{t=t_{3.2}}$ коренеплоду на другому ($З_2$) етапі стадії (***З***) з точки $O_o$ у точку $A$ після підстановки $t_{3.1}$ з рівняння (В.4.6) у рівняння (В.4.14) визначається за залежністю

$$x_2' = x'_{t=t_{3.2}} == \frac{d_m k_\vartheta e^{-k_o g\left(\frac{1}{k_o g}\ln\left(\frac{d\varphi_з}{dt}\frac{d_\nu}{2}k_\vartheta k_o \sin\varepsilon + 1\right)\right)}}{2k_o g} \cos\varepsilon\left(1 - e^{-k_o g t_{3.2}}\right)\frac{d\varphi_m}{dt}, \qquad \text{(В.4.15)}$$

або:

$$x_2' = \frac{d_\nu k_\vartheta e^{-\ln\left(\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_\nu}{2}k_\vartheta k_o \sin\varepsilon + 1\right)}}{2k_o g} \cos\varepsilon\left(1 - e^{-k_o g t_{3.2}}\right)\frac{d\varphi_m}{dt}; \qquad \text{(В.4.16)}$$

$$l_{2x'} = x'_{t=t_{3.2}} = \frac{d_m k_\vartheta}{2k_o g\left(\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_\nu}{2}k_\vartheta k_o \sin\varepsilon + 1\right)} \cos\varepsilon\left(1 - e^{-k_o g t_{3.2}}\right)\frac{d\varphi_m}{dt}; \qquad \text{(В.4.17)}$$

$$l_{2x'} = \frac{\pi n_m d_\nu k_\vartheta}{k_o g\left(\pi n_m d_\nu k_\vartheta k_o \sin\varepsilon + 60\right)} \cos\varepsilon\left(1 - e^{-k_o g t_{3.2}}\right). \qquad \text{(В.4.18)}$$

Тоді загальна дальність польоту $L_A$ коренеплоду на першому ($З_1$) та другому ($З_2$) етапі стадії (***З***) за час польоту $t = t_{3.1} + t_{3.2}$ згідно з рис. В.4.1 дорівнює сумі $l_{1x}$ та $l_{2x'}$, тобто

$$L_A = l_{1x} + l_{2x'} = \frac{\left(\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}k_{\vartheta_m}\right)^2 \sin 2\varepsilon}{2gk_o\left(\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}k_\vartheta \sin\varepsilon + \frac{1}{k_o}\right)} +$$

$$+\frac{d_v k_{\vartheta_m}}{2k_o g\left(\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}k_\vartheta k_o \sin\varepsilon + 1\right)}\cos\varepsilon\left(1 - e^{-k_o g t_{3.2}}\right)\frac{d\varphi_m}{dt} = \quad , \text{(B.4.19)}$$

$$= \frac{d_v k_v \cos\varepsilon}{2g_o\left(\frac{d_v}{2}k_\vartheta k_o \sin\varepsilon + \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^{-1}\right)}\left[\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}k_\vartheta \sin\varepsilon + \left(1 + \frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}\frac{\mu_f}{m_k g}\right)\frac{1 - e^{k_o g\frac{m_k}{\mu_f}}}{\mu_f}\right]$$

або

$$L_A = \frac{\left(\pi n_m \frac{d_v}{2}k_{\vartheta_m}\right)^2 \sin 2\varepsilon}{30^2 gk_o\left(\frac{\pi n_m}{30}\frac{d_v}{2}k_\vartheta \sin\varepsilon + \frac{1}{k_o}\right)} +$$

$$+\frac{d_v k_{\vartheta_m}}{2k_o g\left(\frac{\pi n_m}{30}\frac{d_v}{2}k_\vartheta k_o \sin\varepsilon + 1\right)}\cos\varepsilon\left(1 - e^{-k_o g t_{3.2}}\right)\frac{\pi n_m}{30} = \quad . \text{(B.4.20)}$$

$$= \frac{\pi n_m d_v k_\vartheta \cos\varepsilon}{g_o\left(\pi n_m d_v k_\vartheta k_o \sin\varepsilon + 60\right)}\left[\pi n_m \frac{d_v}{2}k_\vartheta \sin\varepsilon + \left(1 - \pi n_m \frac{d_v}{60}\frac{\mu_f}{m_k g}\right)\frac{1 - e^{k_o g\frac{m_k}{\mu_f}}}{\mu_f}\right]$$

Для визначення координати точки $A\left(y'_A\right)$ відносно осі $O_o y'$ запишемо друге рівняння системи (В.4.12) у вигляді

$$-\frac{m_k}{\mu_f}\frac{d\left(m_k g - \vartheta_{ko_{y'}}\mu_f\right)}{m_k g - \vartheta_{ko_{y'}}\mu_f} = dt_{3.2}\,. \qquad \text{(B.4.21)}$$

або методом розділення перемінних

$$-\frac{m_k}{\mu_f}\int\frac{d\left(m_k g - \vartheta_{ko_{y'}}\mu_f\right)}{m_k g - \vartheta_{ko_{y'}}\mu_f} = \int dt_{3.2}\,, \qquad \text{(B.4.22)}$$

а рішення інтегрального виразу (В.4.22) згідно [283] має вигляд

$$-\frac{m_k}{\mu_f}\ln\left|m_k g-\vartheta_{ko_{y'}}\mu_f\right|=t_{3.2}+C_{12}. \qquad \text{(В.4.23)}$$

Постійну інтегрування $C_{12}$ рівняння (В.4.23) визначено за початкових умови, за яких $t_{3.2}=0,\ \vartheta_{ko_{y'}}=0$. При цьому $m_k g>\vartheta_{ko_{y'}}\mu_f$, тоді у виразі $\left|m_k g-\vartheta_{ko_{y'}}\mu_f\right|$ нехтуємо знаком модуля. Після досягнення швидкості $\vartheta_{ko_{y'}}=m_k g/\mu_f$, коренеплід рухається з постійною швидкістю $\vartheta_{ko_{y'}}=const$.

Тоді

$$C_{12}=-m_k\,ln(m_k g)/\mu_f. \qquad \text{(В.4.24)}$$

або підставивши $C_{12}$ у (В.4.24) маємо

$$-\frac{m_k}{\mu_f}\ln\left(1-\frac{\vartheta_{ko_{y'}}\mu_f}{m_k g}\right)=t_{3.2}. \qquad \text{(В.4.25)}$$

Визначимо складову швидкості руху $\vartheta_{ko_{y'}}$ з (В.4.25) та враховуючи, що $\vartheta_{ko_{y'}}=dy_2'/dt_{3.2}$, маємо:

$$\vartheta_{ko_{y'}}=\frac{m_k g}{\mu_f}\left(1-e^{\frac{-\mu_f}{m_k}t_{3.2}}\right);\ \ \frac{dy_2'}{dt_{3.2}}=\frac{m_k g}{\mu_f}\left(1-e^{\frac{-\mu_f}{m_k}t_{3.2}}\right). \qquad \text{(В.4.26)}$$

Запишемо рівняння (В.4.26) у вигляді

$$dy_2'=\frac{m_k g}{\mu_f}\left(1-e^{\frac{-\mu_f}{m_k}t_2}\right)dt_{3.2},\ \text{або}\ \int dy_2'=\int\frac{m_k g}{\mu_f}\left(1-e^{\frac{-\mu_f}{m_k}t_{3.2}}\right)dt_{3.2}, \qquad \text{(В.4.27)}$$

а рішенням виразу (В.4.27) буде

$$y_2'=\frac{m_k g}{\mu_f}t_{3.2}+\frac{m_k^2 g}{\mu_f^2}e^{\frac{-\mu_f}{m_k}t_{3.2}}+C_{22}. \qquad \text{(В.4.28)}$$

За початкових умов $t_{3.2}=0,\ y_2'=0$ знаходимо $C_{22}$

$$C_{22}=-\frac{m_k^2 g}{\mu_f^2}, \qquad \text{(В.4.29)}$$

або згідно з (В.4.27) і (В.4.28), отримаємо

$$y_2'=\frac{m_k g}{\mu_f}t_{3.2}+\frac{m_2^2 g}{\mu_f^2}e^{\frac{-\mu_f}{m_k}t_{3.2}}-\frac{m_k^2 g}{\mu_f^2}. \qquad \text{(В.4.30)}$$

Після спрощення (В.4.30), отримаємо рівняння, яка описує функціональну зміну переміщення коренеплоду в точку А з координатою $A\left(y'_A\right)$ відносно осі $O_o y'$ на другому ($З_2$) етапі стадії (***З***) переміщення коренеплоду з точки $O_o$ у точку $A$ за проміжок часу $t_{3.2}$

$$y'_2 = \frac{m_k g}{\mu_f}\left[ t_{3.2} + \frac{m_k}{\mu_f}\left( e^{\frac{-\mu_f}{m_k} t_{3.2}} - 1 \right) \right]. \qquad \text{(В.4.31)}$$

Підставивши час $t_{3.2}$ з рівняння (В.4.25) у (В.4.31), отримаємо:

$$L_A = \frac{d_v k_\vartheta \cos\varepsilon}{2g\left( r_m k_{\vartheta_m} k_o \sin\varepsilon + \left( \frac{d\varphi_m}{dt} \right)^{-1} \right)}\left[ \frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2} k_\vartheta \sin\varepsilon + \left( 1 - \frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v \mu_f}{2 m_k g} \right)\frac{1 - e^{k_o g \frac{m_k}{\mu_f}}}{k_o} \right], \quad \text{(В.4.32)}$$

де порядок перетворення та спрощення залежності (В.4.32) наведено в додатку В.4.2;

$$L_A = \frac{\pi n_m d_v k_\vartheta \cos\varepsilon}{g\left( \pi n_m d_v k_{\vartheta_m} k_o \sin\varepsilon + 60 \right)}\left[ \frac{\pi n_m d_v k_\vartheta \sin\varepsilon}{120} + \left( 1 - \frac{\pi n_m d_v \mu_f}{60 m_k g} \right)\frac{1 - e^{k_o g \frac{m_k}{\mu_f}}}{k_o} \right]. \quad \text{(В.4.33)}$$

де порядок перетворення та спрощення залежності (В.4.33) наведено в додатку В.4.3;

$$y'_2 = \frac{m_k^2 g}{\mu_f^2}\left( 1 - e^{\left( 1 - \frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v \mu_f}{2 m_k g} \right)} \right), \qquad \text{(В.4.34)}$$

де порядок перетворення залежності (В.4.34) наведено в додатку В.4.4.

Згідно з [282] висота $y'_1$ падіння коренеплоду визначається за формулою

$$y_1 = \frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v \sin\varepsilon}{2 k_f g} - \frac{1}{k_f^2} e^{\left( 1 + \frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2} k_f \sin\varepsilon \right)}, \qquad \text{(В.4.35)}$$

а згідно з рис. В.4.1 висота $H_A$ падіння коренеплоду з точки $O$ у точку $A$ буде визначатися як різниця $y'_A = y'_2 - y'_1 = H_A$, де $y'_1$ – висота максимального підйому коренеплоду за час $t_{3.1}$.

Тоді висота падіння коренеплоду $H_A$ визначається за формулою

$$H_A = \frac{m_k^2 g}{\mu_f^2}\left(1 - e^{\left(1-\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v\mu_f}{2m_k g}\right)}\right) - \frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v \sin\varepsilon}{2k_o g} - \frac{1}{k_o^2}e^{\left(1+\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}k_o\sin\varepsilon\right)}, \qquad \text{(В.4.36)}$$

або

$$H_A = \frac{m_k^2 g}{\mu_f^2}\left(1 - e^{\left(1-n_m\frac{d_v\mu_f}{2m_k g}\right)}\right) - \frac{\pi n_m d_v \sin\varepsilon}{60k_o g} - \frac{1}{k_o^2}e^{\left(1+n_m\frac{d_v}{2}k_o\sin\varepsilon\right)}. \qquad \text{(В.4.37)}$$

Таким чином, згідно з (В.4.6) і (В.4.25), після визначення часу, дальності польоту та висоти падіння коренеплоду на першому ($З_1$) та другому ($З_2$) етапах стадії (***З***) його переміщення, отримано систему рівнянь для визначення координати попадання коренеплоду в точку $A(x_A; y_A)$ [268]

$$\begin{cases} x_A = \dfrac{\pi n_m d_v k_\vartheta \cos\varepsilon}{g\left(\pi n_m d_v k_\vartheta k_o \sin\varepsilon + 60\right)}\left[\dfrac{\pi n_m d_v k_{\vartheta_m}\sin\varepsilon}{120} + \dfrac{1-e^{k_o g\frac{m_k}{\mu_f}}}{k_o}\left(1 - \dfrac{\pi n_з d_v \mu_f}{60 m_k g}\right)\right]; \\ y_A = \dfrac{m_k^2 g}{\mu_f^2}\left(1 - e^{\left(1-\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v\mu_f}{2m_k g}\right)}\right) - \dfrac{\pi n_m d_v \sin\varepsilon}{60k_o g} - \dfrac{1}{k_o^2}e^{\left(1+\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}k_o\sin\varepsilon\right)} \end{cases}. \qquad \text{(В.4.38)}$$

Згідно залежності (В.4.33), або першої залежності системи рівнянь (В.4.38) побудовано графічну інтерпретацію функціональної зміни дальності польоту $L_A$ коренеплоду як функція $L_A = f_L(n_з; m_k)$, або функціональної зміни координати $x_A = f_L(n_m; m_k)$ точки контакту коренеплоду з поверхнею очисної гірки, яку наведено на рис. В.4.2 – В.4.4.

Дальність польоту коренеплоду з похилого транспортера до робочої поверхні очисної гірки згідно аналізу графічних побудов рис. 3.10–3.12 становить:

- для коренеплодів масою $m_k =$ 0,35 кг: від 0,9 до 1,2 м за кута встановлення похилого транспортера $\varepsilon =$ 20 град.; від 0,8 до 1,0 м за кута встановлення похилого транспортера $\varepsilon =$ 30 град.; від 0,6 до 0,75 за кута встановлення похилого транспортера $\varepsilon =$ 40 град.;

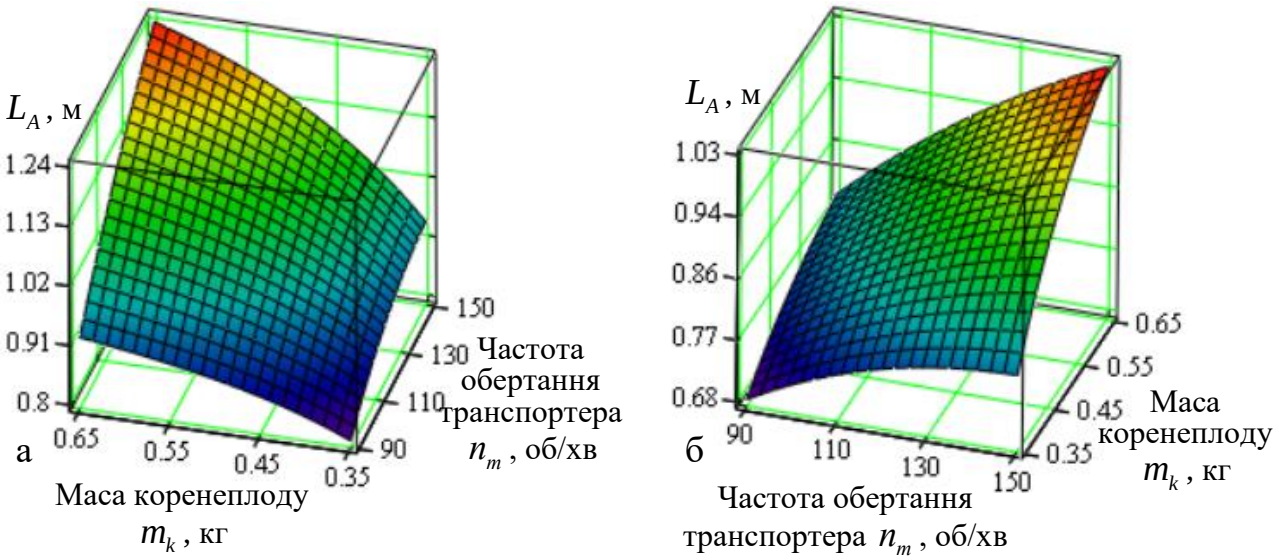



Рисунок В.4.2 – Залежність зміни дальності польоту коренеплоду як функція $L_A = f_L(n_m; m_k)$: а, б – відповідно, $\varepsilon =$ 20, 30 град.

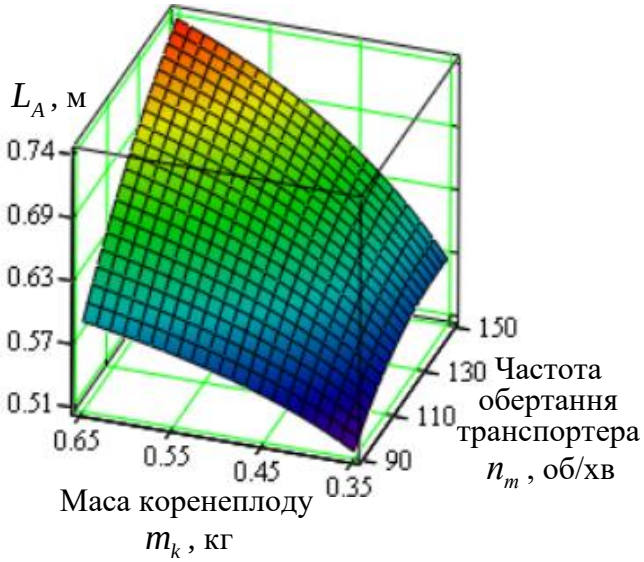



Рисунок В.4.3 – Залежність зміни дальності польоту коренеплоду як функція $L_A = f_L(n_m; m_k)$, $\varepsilon =$ = 40 град.

- для коренеплодів масою $m_k =$ 0,5 кг: від 0,9 до 1,15 м за кута встановлення похилого транспортера $\varepsilon =$ 20 град.; від 0,75 до 0,95 м за кута встановлення похилого транспортера $\varepsilon =$ 30 град.; від 0,55 до 0,7 за кута встановлення похилого транспортера $\varepsilon =$ 40 град.;

- для коренеплодів масою $m_k =$ 0,65 кг: від 0,8 до 0,95 м за кута встановлення похилого транспортера $\varepsilon =$ 20 град.; від 0,7 до 0,8 м за кута встановлення похилого транспортера $\varepsilon =$ 30 град.; від 0,5 до 0,6 м за кута встановлення похилого транспортера $\varepsilon =$ 40 град.

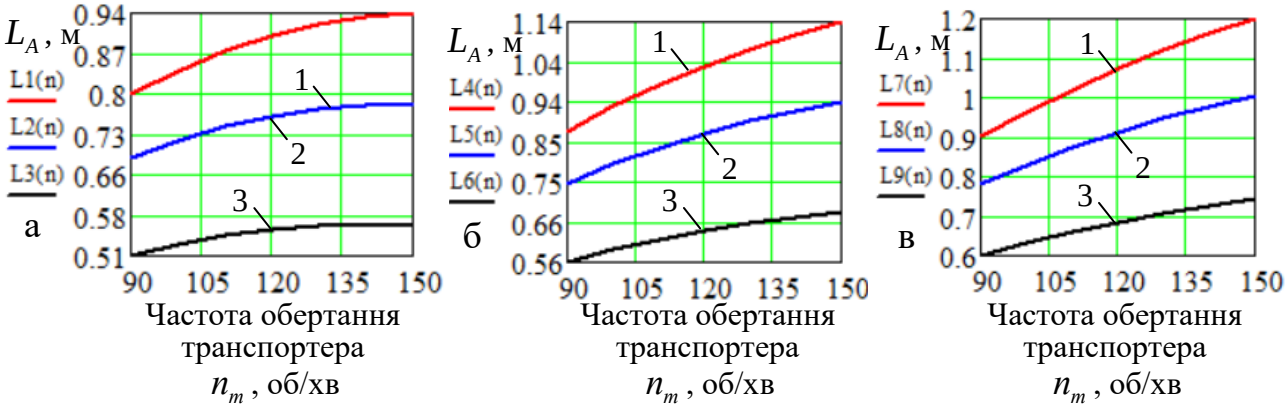



Рисунок В.4.4 – Залежність зміни дальності польоту коренеплоду як функція $L_A = f_L(n_m)$; а, б, в – відповідно, $m_k$ = 0,35; 0,5; 0,65 кг; 1, 2, 3 – відповідно, $\varepsilon$ = 20, 30, 40 град.

Необхідно також зазначити, що на сходження коренеплоду з похилого транспортера та дальності його польоту на двох етапах (***3***-ї) стадії відносний значний вплив мають просторова форма та геометричні розмірні параметри коренеплоду. При цьому відповідно, дальність польоту завжди буде мати характер змінної величини із певною функцією щільності розподілу.

У нашому випадку визначення маси коренеплоду через об’єм і щільність коренеплоду циліндричної або конусної форми, який є функцією від розмірних параметрів коренеплодів, дозволяє ефективно враховувати ці впливи під час оптимізації конструктивно-кінематичних параметрів похилого транспортера та очисної гірки.

Додаток В.4.1

Порядок виведення рівняння (В.4.4)

$$\frac{1}{k_o g}\left(\frac{d\varphi_z}{dt}\frac{d_v}{2}k_\vartheta \sin\varepsilon+\frac{1}{k_o}\right)\left(1-\frac{1}{e^{k_o g t_{3.1}}}\right)-\frac{1}{k_0}=0;$$

$$\frac{1}{k_o g}\left(\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}k_\vartheta \sin\varepsilon+\frac{1}{k_f}-\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}k_\vartheta \sin\varepsilon\frac{1}{e^{k_o g t_{3.1}}}-\frac{1}{k_o}\frac{1}{e^{k_o g t_{3.1}}}\right)-\frac{1}{k_o}=0;$$

$$\frac{1}{k_o g}\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}k_\vartheta \sin\varepsilon+\frac{1}{k_o g}\frac{1}{k_o}-\frac{1}{k_o g}\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}k_\vartheta \sin\varepsilon\frac{1}{e^{k_0 g t_{3.1}}}-$$

$$-\frac{1}{k_o g}\frac{1}{k_o}\frac{1}{e^{k_o g t_{3.1}}}-\frac{1}{k_o}=0;$$

$$\frac{1}{k_o g}\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}k_\vartheta \sin\varepsilon+\frac{1}{k_o^2 g}-\frac{1}{k_o g}\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}k_\vartheta \sin\varepsilon\frac{1}{e^{k_o g t_{3.1}}}-$$

$$-\frac{1}{k_o^2 g}\frac{1}{e^{k_0 g t_{3.1}}}-\frac{1}{k_o}=0;$$

$$\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}k_\vartheta \sin\varepsilon+\frac{1}{k_o g}-\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}k_\vartheta \sin\varepsilon\frac{1}{e^{k_o g t_{3.1}}}-\frac{1}{e^{k_o g t_{3.1}}}-g=0;$$

$$\frac{1}{e^{k_o g t_{3.1}}}\left(\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}k_\vartheta \sin\varepsilon+\frac{1}{k_o}\right)-\frac{1}{k_o}=0$$

Додаток В.4.2

Порядок виведення рівняння (В.4.32)

$$L_A=\frac{m_k g}{\mu_f}\left[-\frac{m_k}{\mu_f}\ln\left(1-\frac{\vartheta_{ko_{y'}}\mu_f}{m_k g}\right)+\frac{m_k}{\mu_f}\left(e^{\frac{-\mu_f}{m_k}\left(-\frac{m_k}{\mu_f}\ln\left(1-\frac{\vartheta_{ko_{y'}}\mu_f}{m_k g}\right)\right)}-1\right)\right]=$$

$$=\frac{\left(\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}k_\vartheta\right)^2\sin 2\varepsilon}{2gk_o\left(\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}k_\vartheta \sin\varepsilon\right)+\frac{1}{k_o}}+\frac{d_v k_v\cos\left(1-e^{k_o g t_{3.2}}\right)}{2gk_o\left(\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}k_\vartheta \sin\varepsilon\right)}.$$

$$L_A=\frac{\left(\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}k_\vartheta\right)^2\sin 2\varepsilon}{2gk_o\left(\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}k_\vartheta \sin\varepsilon\right)+\frac{1}{k_o}}+\frac{d_v k_v\cos\left(1-e^{k_o g t_{3.2}}\right)}{2gk_o\left(\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}k_\vartheta \sin\varepsilon\right)}\frac{d\varphi_m}{dt}=$$

$$=\frac{d_v k_v\cos\varepsilon}{2g_o\left(\frac{d_v}{2}k_\vartheta k_o\sin\varepsilon+\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^{-1}\right)}\left[\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}k_\vartheta \sin\varepsilon+\left(1+\frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v}{2}\frac{\mu_f}{m_k g}\right)\frac{1-e^{k_o g\frac{m_k}{\mu_f}}}{\mu_f}\right].$$

Додаток В.4.3

Порядок виведення рівняння (В.4.33)

$$L_A = \frac{\left(\pi n_m \frac{d_v}{2} k_{\vartheta_m}\right)^2 \sin 2\varepsilon}{30^2 g k_o \left(\frac{\pi n_m}{30}\frac{d_v}{2} k_\vartheta \sin\varepsilon + \frac{1}{k_o}\right)} +$$

$$+ \frac{d_v k_{\vartheta_m}}{2k_o g\left(\frac{\pi n_m}{30}\frac{d_v}{2} k_\vartheta k_o \sin\varepsilon + 1\right)} \cos\varepsilon \left(1 - e^{-k_o g t_{3.2}}\right) \frac{\pi n_m}{30} =$$

$$= \frac{\pi n_m d_v k_\vartheta \cos\varepsilon}{g_o\left(\pi n_m d_v k_\vartheta k_o \sin\varepsilon + 60\right)} \left[\pi n_m \frac{d_v}{2} k_\vartheta \sin\varepsilon + \left(1 - \pi n_m \frac{d_v}{60}\frac{\mu_f}{m_k g}\right)\frac{1 - e^{k_o g \frac{m_k}{\mu_f}}}{\mu_f}\right]$$

Додаток В.4.4

Порядок виведення рівняння (В.4.34)

$$y_{2'} = \frac{m_k g}{\mu_f}\left[t_{3.2} + \frac{m_k}{\mu_f}\left(e^{\frac{-\mu_f}{m_k} t_{3.2}} - 1\right)\right] =$$

$$= \frac{m_k g}{\mu_f}\left[\left(-\frac{m_k}{\mu_f}\ln\left(1 - \frac{\vartheta_{ko_{y'}}\mu_f}{m_k g}\right)\right) + \frac{m_k}{\mu_f}\left(e^{\frac{-\mu_f}{m_k}\left(-\frac{m_k}{\mu_f}\ln\left(1 - \frac{\vartheta_{ko_{y'}}\mu_f}{m_k g}\right)\right)} - 1\right)\right] = .$$

$$= \frac{m_k^2 g}{\mu_f^2}\left(1 - e^{\left(1 - \frac{d\varphi_m}{dt}\frac{d_v \mu_f}{2 m_k g}\right)}\right)$$

Додаток Г.1

## Математична модель функціонального процесу динамічної взаємодії компонента з рифом шнека

Технологічна ефективність роботи будь-якої транспортно-очисної системи регламентується основними показниками якості її роботи, критерії оцінки яких визначається агротехнічними вимогами до процесу збирання крупних коренеплодів [291].

Головними критеріями, які характеризують технологічний процес сепарації викопаного вороху, є ступінь відокремлення домішок від коренеплодів і показники пошкодження коренеплодів [292, 293].

Основні причини виникнення пошкодження коренеплодів пов’язані з динамічними явищами, які присутні та характерні для технологічного процесу відокремлення домішок від коренеплодів при роботі комбінованих очисних робочих органів [294, 294].

Для проведення аналізу, або розроблення математичної моделі процесу взаємодії компонента вороху з рифом шнека комбінованого робочого органу ОТТМ розглянемо складену схему, яку наведено на рис. Г.1.1.

Нехай компонент 1 (рис. Г.1.1) вороху скочується із робочої гілки очисної гірки 2 та взаємодіє з рифом шнека 3 зі швидкістю взаємодії $\vartheta_k$.

За компонент взаємодії, або об’єкт дослідження приймаємо коренеплід, як компонент вороху, який порівняно з компонентом грудок грунту, є більш стійким до руйнування від прикладеного до них динамічного навантаження.

Тому вирішення задачі зведено до розгляду взаємодії тіла коренеплоду із поверхнею рифа шнека за умови не руйнування, або не допущення пошкодження коренеплодів під час їх переміщення до системи шнеків ОТТМ.

Руйнування тіла коренеплоду, або його пошкодження залежить від значення сили удару $P_k$ коренеплоду з поверхнею рифа шнека [295].

При цьому допустимі пошкодження регламентовані агротехнічними вимогами до процесу збирання коренеплодів коренезбиральними машинами [65, 66, 257, 292].

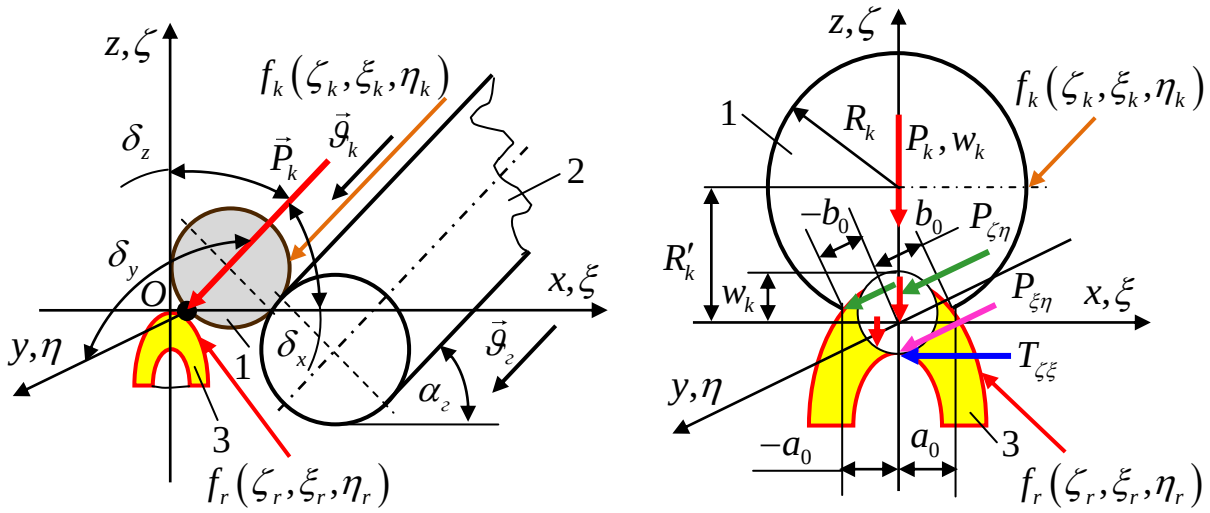



Рисунок Г.1.1 – Схема для розрахунку процесу взаємодії компонента з рифом шнека комбінованого робочого органу ОТТМ: 1 – коренеплід (компонент); 2 – очисна гірка; 3 – риф шнека

Визначення сили удару $P_k$ проведено з наступних аналітично-технологічних міркувань.

На першому етапі розглянемо початкову вхідну задачу, яка полягає в визначені розподілу проекцій сили удару $P_k$ (рис. Г.1.1) на осі вибраної системи координат $O\xi\eta\zeta$ $(Oxyz)$.

Початкове рішення виконуватимемо як для статичної задачі, а в подальшому перейдемо до динамічної задачі удару, використовуючи швидкість абсолютної деформації з якої, знаючи величину абсолютної деформації, є можливість визначити час ударного імпульсу.

Вирішуючи отримане рівняння для імпульсу сили з урахуванням маси коренеплоду та його початкової швидкості удару із рифом шнека, визначається сила.

При розв’язанні задачі приймемо формалізовані спрощення:

- поверхня рифу шнека не деформується через перевищення її пружних властивостей на кілька порядків над пружними властивостями коренеплоду на його поверхні;

- прослизання коренеплоду в зоні контакту з рифом шнека відсутнє [294, 295].

Криволінійний інтеграл розподіленої сили 1-го роду (інтеграл розподілу сил по кривій, яка являє собою криву перерізу рифу шнека в площині $O\eta = 0$) з межами інтегрування від меж зони контакту в площині $O\xi$ повинен дорівнювати проекції зосередженої сили.

Розподіл зосередженої сили на кривій контакту прирівняний до диференціала в часткових похідних по кривій криволінійного інтеграла 1-го роду дозволить записати рівняння із якого може бути отримана розподілена по кривій контакту зосереджена сила.

Таке уявлення може бути справедливим виходячи з симетрії зони дії, тому задача симетрична щодо осі *Oz*. При цьому внаслідок того, що радіус рифу шнека $R_{p\eta}$ у напрямку осі $O\eta$ значно перевищує радіус закруглення рифа в поперечному напрямку $R_{pn}$, вирішення задачі може розглядатися як контакт кулі (коренеплоду) з циліндром (рифом шнека).

Явище співудару в контексті зближення двох фізичних тіл (коренеплоду та рифа шнека) в напрямку осі *Oz* є по суті величиною на яку зменшується відстань між центрами цих тіл [286], або: $\delta_z = \delta_k + \delta_p$; $\eta = 0$; $\xi = 0$; $R^2 = \zeta^2 + \xi^2$.

Тоді маємо:

- зміщення осі на величину радіусу вниз по осі *Oz* (додаток Г.1.1)

$$R^2 = \left(\zeta + R\right)^2 + \xi^2, \text{ або } \zeta = \sqrt{R^2 - \xi^2} - R; \qquad (Г.1.1)$$

- зміщення осі на величину радіусу вверх по осі *Oz* (додаток Г.1.2)

$$R^2 = \left(\zeta + R\right)^2 + \xi^2 + \eta^2, \text{ або } \zeta = R - \sqrt{R^2 - \left(\xi^2 + \eta^2\right)}; \qquad (Г.1.2)$$

- рівняння поверхні рифа шнека

$$\zeta_p = \sqrt{R_p^2 - \xi_p^2} - R_p; \qquad (Г.1.3)$$

- рівняння поверхні коренеплоду

$$\zeta_k = R_k - \sqrt{R_k^2 - \xi_k^2}. \qquad (Г.1.4)$$

Розкладемо в ряд Маклорана рівняння (4.21) та (4.22)

- рівняння поверхні рифа

$$\zeta_{pn} = -R_p + \sqrt{R_p^2} - \frac{\sqrt{R_p^2}\xi_p^2}{2R_p^2} = \frac{\xi_p^2}{2R_p}; \qquad (Г.1.5)$$

- рівняння поверхні коренеплоду

$$\zeta_{kn} = R_k - \sqrt{R_k^2} + \frac{\sqrt{R_k^2}\xi_k^2}{2R_k^2} = \frac{\xi_k^2}{2R_k}. \qquad (Г.1.6)$$

При визначені розподілу проекцій сили від удару спочатку рішення виконуватимемо як для статичної задачі, а далі перейдемо до динамічної задачі удару, використовуючи швидкість абсолютної деформації з якої, знаючи величину абсолютної деформації, визначається час ударного імпульсу. Вирішуючи отримане рівняння для імпульсу сили, з урахуванням маси коренеплоду та початкової швидкості удару, визначається сила удару.

При розв'язанні задачі приймемо спрощення, яке полягає в тому, що поверхня рифу не деформується через перевищення її пружних властивостей на кілька порядків над пружними властивостями кореня і грунту на його поверхні. Прослизання в зоні контакту відсутнє.

Рівняння криволінійної зони контакту, коли деформується лише коренеплід, відповідатиме перерізу рифу шнека в площині, яка відповідає значенню величини заглиблення рифа в коренеплід за абсолютної деформації коренеплоду, тобто

$$-\zeta_{pk} = w_k. \qquad (Г.1.7)$$

де $(-\zeta_{pk})$ – заглиблення рифа в коренеплід, або величина по осі $O\zeta$ в якій визначається довжина поперечного перерізу рифа;

$w_k$ – абсолютна деформація коренеплоду по осі $O\zeta$.

При цьому, позначимо:

- величину зближення осей двох тіл (коренеплоду та рифа шнека) по осі $O\zeta$ через $u_k$;

- розподілену по довжині контакту нормальну силу через $P_\xi$;

- нормальну складову сили контакту через $P_k$;

- розподілену дотичну складову сили в площині $\xi O\zeta$ через $T_\xi$;

- зосереджену дотичну силу в площині $\xi O\zeta$ через $T_\zeta$, при цьому $T_\zeta = P_k \cos\delta_z / (a_1 - a_2)$.

Довжину зони контакту визначимо з урахуванням осьового розподілення сил відносно осі *Oz* (випадок $y = 0$, границя контакту $\{a_1, a_2\}$.

Криволінійний інтеграл розподіленої сили 1 роду (інтеграл розподілу сил по кривій, яка являє собою криву перерізу рифу в площині $O\eta = 0$) з межами інтегрування від меж зони контакту в площині $O\xi$ повинен дорівнювати проекції зосередженої сили. Розподіл зосередженої сили на кривій контакту, прирівняний до диференціала в часткових похідних по кривій криволінійного інтеграла 1 роду, є рівнянням із якого може бути отримана розподілена по кривій контакту сила удару.

Таке уявлення може бути справедливим виходячи з симетрії зони дії, тому задача симетрична щодо осі *Oz*, крім того внаслідок того, що радіус рифу $R_{p\eta}$ у напрямку осі $O\eta$ значно перевищує радіус закруглення рифа в поперечному напрямку $R_{pn}$, то завдання може розглядатися як контакт кулі (коренеплоду) з циліндром (рифом шнека) [296].

Складемо рівняння криволінійної зони контакту за умови, що деформується лише коренеплід. Воно буде відповідати перерізу рифу в площині, яка відповідатиме значенню величини заглиблення при абсолютній деформації кореня, або ($-\zeta p_k = w_k$), де $\zeta p_k$ величина по осі $O\zeta$ в якій визначається довжина поперечного перерізу рифу, $w_k$ – величина абсолютної деформації кореня по осі $O\zeta$. При цьому зближення осей двох тіл становитиме $u_k$ по осі $O\zeta$.

Тоді частковий інтегральний вираз запису рівняння криволінійної зони контакту коренеплоду з рифом шнека матиме вигляд:

$$\partial_{\xi_p}\left(\int \frac{P_k \cos\delta_z}{a_1 - a_2} d\xi_p\right) = \partial_{\xi_p}\left(\int P_\xi \sqrt{1 + \left(\partial_{\xi_p}\zeta_p\right)^2}\, d\xi_p\right); \qquad (Г.1.8)$$

$$\partial_{\xi_p}\left(\int \frac{P_k \sin\delta_z}{2a_0} d\xi_p\right) = \partial_{\xi_p}\left(\int T_\xi \sqrt{1+\left(\partial_{\xi_p}\zeta_p\right)^2}\, d\xi_p\right). \qquad (Г.1.9)$$

У подальшому визначаємо межі контакту. Виходячи з рівності нулю сум абсолютних деформацій на межах контакту, які (згідно з Герцем) можуть бути визначені з находження коефіцієнтів для підстановки в інтеграли (інтегрування від 0 до $a_1$, $a_{20}$-$k_{01}$, від $a_2$ до 0, $a_{01}$-$k_{02}$) при пошуку меж контакту: сума абсолютних зсувів поверхні коренеплоду та поверхні рифу на межах зон контакту $a_1$ і $a_2$ повинна дорівнювати нулю, а отримана система рівнянь дозволяє знайти ці межі.

Для уникнення подвійного інтегрування необхідно виконати диференціювання ще раз ці вирази зміщень, у результаті чого отримаємо різниці відносних деформацій, для яких справедливі також ці вирази.

Із рівняння (Г.1.7), (Г.1.8) у площині $\xi O\zeta$ визначено:

- розподілену по довжині контакту нормальну силу контакту рифа $P_{\xi p}$ та коренеплоду $P_{\xi k}$

$$P_{\xi p} = \frac{P_k \cos\delta_z}{\left(a_1 - a_2\right)\sqrt{1+\dfrac{\xi_p^2}{Rp^2}}}; \qquad (Г.1.10)$$

$$P_{\xi k} = \frac{P_k \cos\delta_z}{\left(a_1 - a_2\right)\sqrt{1+\dfrac{\xi_k^2}{R_k^2}}}; \qquad (Г.1.11)$$

- зосереджену по довжині контакту дотичну силу контакту рифа $T_{\xi p}$ та коренеплоду $T_{\xi k}$,

$$T_{\xi p} = \frac{P_k \sin\delta_z}{\left(a_1 - a_2\right)\sqrt{1+\dfrac{\xi_p^2}{R_p^2}}}; \qquad (Г.1.12)$$

$$T_{\xi k} = \frac{P_k \sin\delta_z}{\left(a_1 - a_2\right)\sqrt{1+\dfrac{\xi_k^2}{R_k^2}}}; \qquad (Г.1.13)$$

де рішення виразу (Г.1.10)-( Г.1.13) наведено, відповідно, в додатку Г.1.2 та Г.1.2.

Для визначення коефіцієнтів, які враховують співвідношення границі при нерівності меж від $a_1$ до 0 і від 0 до $a_2$ розкладемо в ряд Макролена у середовищі Mathematic функції розподілених сил, додаток Г. 1.4:

$$P_{pn}=\frac{P_k\left(-2R_p^2+\xi_p^2\right)\cos\left[\delta_z\right]}{2\left(a_1-a_2\right)R_p^2};\;\; P_{kn}=\frac{P_k\left(-2R_k^2+\xi_k^2\right)\cos\left[\delta_z\right]}{2\left(a_1-a_2\right)R_k^2}; \qquad (Г.1.14)$$

$$T_{pn}=\frac{P_k\left(-2R_p^2+\xi_p^2\right)\sin\left[\delta_z\right]}{2\left(a_1-a_2\right)R_p^2};\;\; T_{kn}=\frac{P_k\left(-2R_k^2+\xi_k^2\right)\sin\left[\delta_z\right]}{2\left(a_1-a_2\right)R_k^2}. \qquad (Г.1.15)$$

Визначимо співвідношення, яке дозволяє розділити розподілене навантаження на ділянки від $a_1$-0 і на 0-$a_2$. Для цього інтегральну величину розподілу сили контакту на ділянці від $a_1$-0 прирівняємо до різниці інтегральної величини на ділянці від $a_1$-$a_2$ і величини на ділянці від 0-$a_2$ і т.д. Вводячи при цьому коефіцієнти $k$, отримаємо поправочні коефіцієнти для приведення загального розподіленого навантаження до часткового на межі від $a_1$-0 і на межі 0-$a_2$ (додаток Г.1.5).

При цьому коефіцієнти, що враховують співвідношення границі при нерівності меж від $a_1$ до 0 і від 0 до $a_2$ представлені у вигляді:

$$k_{01}=\frac{\left(-a_1\right)^2+6R_p^2}{\left(-a_1\right)^2-a_1a_2-2\left(a_2\right)^2+12R_p^2};\;\; k_{02}=\frac{\left(-a_2\right)^2+6R_p^2}{\left(-a_1\right)^2-a_1a_2-\left(a_2\right)^2+12R_p^2}. \quad (Г.1.16)$$

Тоді, зближення пов’язане з абсолютними деформаціями двох тіл $w_k$ і $w_p$ в напрямку осі $Ox$ (додаток Г.1.6):

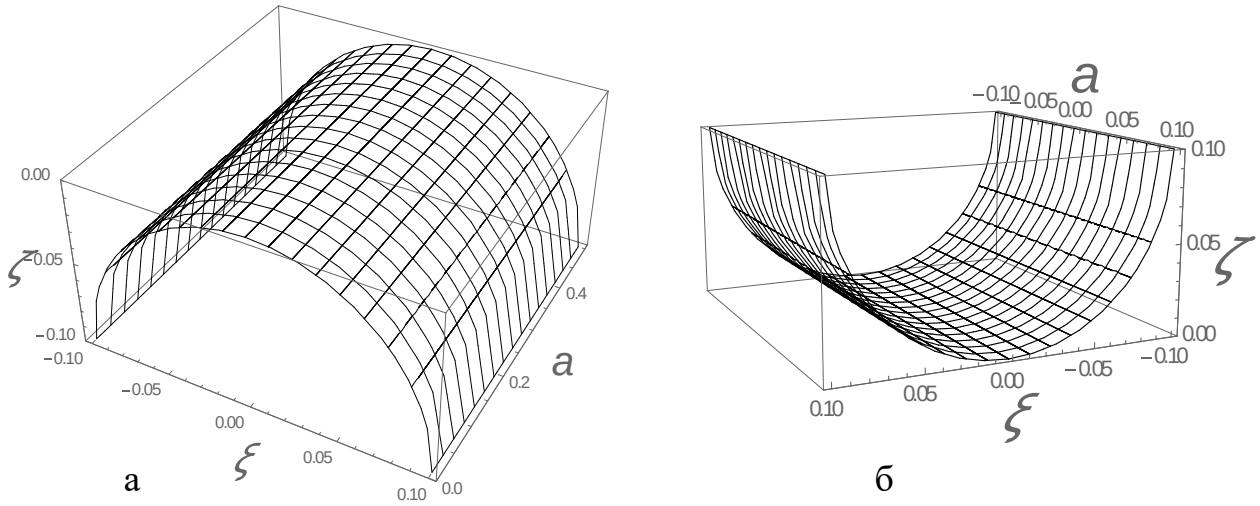
$$\zeta k_n=\xi k^2/2R_k;\;\; \zeta p_n=\xi p^2/2R_p; \qquad (Г.1.17)$$

$$k_1=\frac{\left(-a_1\right)^2+6R_p^2}{\left(-a_1\right)^2+12R_p^2};\;\; k_2=\frac{\left(-a_2\right)^2+6R_p^2}{\left(-a_2\right)^2+12R_p^2}. \qquad (Г.1.18)$$

Подальший аналітичний аналіз процесу контактної взаємодії коренеплоду з рифом шнека [297] із урахуванням імпульсів розподілених і зосереджених нормальних й дотичних сил та відповідних допустимих напружень межі неруйнування коренеплоду дозволяє проводити оптимізацію параметрів робочих органів комбінованого робочого органу ОТТМ.

Додаток Г.1.1

Залежність зміщення осі на величину радіуса




а б

а – вниз по осі *Oz*; б – вверх по осі *Oz*

Додаток Г.1.2

Порядок рішення рівнянь (Г.1.10), (Г.1.11)

$$\partial_{\xi p}\left(\int \frac{P\mathrm{Cos}[\gamma]}{a1-a2}\,d\xi p\right)=\partial_{\xi p}\left(\int P\xi\sqrt{1+(\partial_{\xi p}\zeta p)^2}\,d\xi p\right);$$

$$P\xi p =.$$

$$\mathrm{Solve}\left[\frac{P}{a1+a2}==\frac{P1}{a1},P1\right]$$

$$\left\{\left\{P1\to\frac{a1P}{a1+a2}\right\}\right\}$$

$$\mathrm{Solve}\left[\frac{P}{a1+a2}==\frac{P2}{a2},P2\right]$$

$$\left\{\left\{P2\to\frac{a2P}{a1+a2}\right\}\right\}$$

$$P1+P2/.P1\to\frac{a1P}{a1+a2}/.P2\to\frac{a2P}{a1+a2}$$

$$\mathrm{Simplify}\left[\frac{a1P}{a1+a2}+\frac{a2P}{a1+a2}\right]_P$$

$$\frac{P\mathrm{Cos}[\gamma]}{a1-a2}\to\left(\frac{a1}{a1+a2}P\xi p1+P\xi p2\right)\sqrt{1+(\partial_{\xi p}(\zeta pn))^2}$$

$$\frac{PCos[\gamma]}{a1-a2} \to P\xi p\sqrt{1+\frac{\xi p^2}{Rp^2}}$$

$$\frac{PCos[\gamma]}{a1-a2} \to P\xi k\sqrt{1+(\partial_{\xi k}(\zeta kn))^2}$$

$$\frac{PCos[\gamma]}{a1-a2} \to P\xi k\sqrt{1+\frac{\xi k^2}{Rk^2}}$$

$$Simplify[Solve[\frac{PCos[\gamma]}{a1-a2} == P\xi p\sqrt{1+\frac{\xi p^2}{Rp^2}}, P\xi p]]$$

$$\{\{P\xi p \to \frac{PCos[\gamma]}{(a1-a2)\sqrt{1+\frac{\xi p^2}{Rp^2}}}\}\}$$

$$P\xi k = \frac{PCos[\gamma]}{(a1-a2)\sqrt{1+\frac{\xi k^2}{Rk^2}}};$$

Додаток Г.1.3

Порядок рішення рівнянь (Г.1.13), (Г.1.14)

$$\partial_{\xi p}(\int \frac{PSin[\gamma]}{2a0}d\xi p) = \partial_{\xi p}(\int T\xi\sqrt{1+(\partial_{\xi p}\zeta p)^2}\,d\xi p);$$

$$\frac{PSin[\gamma]}{(a1-a2)} \to T\xi\sqrt{1+(\partial_{\xi p}(\zeta pn))^2}$$

$$\frac{PSin[\gamma]}{a1-a2} \to T\xi\sqrt{1+\frac{\xi p^2}{Rp^2}}$$

$$Simplify[Solve[\frac{PSin[\gamma]}{a1-a2} == T\xi\sqrt{1+\frac{\xi p^2}{Rp^2}}, T\xi]]$$

$$\{\{T\xi \to \frac{PSin[\gamma]}{(a1-a2)\sqrt{1+\frac{\xi p^2}{Rp^2}}}\}\}$$

$$T\xi p = \frac{PSin[\gamma]}{(a1-a2)\sqrt{1+\frac{\xi p^2}{Rp^2}}}; T\xi k = \frac{PSin[\gamma]}{(a1-a2)\sqrt{1+\frac{\xi k^2}{Rk^2}}};$$

## Додаток Г.1.4

$$\text{Ppn} = \text{Simplify}[\text{Normal}[\text{Series}[P\xi p, \{\xi p, 0,2\}, \{\text{Rp}, 0,2\}]]]$$

$$\frac{P(-2\text{Rp}^2 + \xi p^2)\text{Cos}[\gamma]}{2(\text{a1} - \text{a2})\text{Rp}^2}$$

$$\text{Pkn} =.$$

$$\text{Pkn} = \text{Simplify}\left[\text{Normal}[\text{Series}[P\xi k, \{\xi k, 0,2\}, \{\text{Rk}, 0,2\}]]\right]$$

$$\frac{P(2\text{Rk}^2 - \xi k^2)\text{Cos}[\gamma]}{2(\text{a1} - \text{a2})\text{Rk}^2}$$

$$P\xi p = -\frac{P\text{Cos}[\gamma]}{(\text{a1} - \text{a2})\sqrt{1 + \frac{\xi p^2}{\text{Rp}^2}}}; P\xi k = \frac{P\text{Cos}[\gamma]}{(\text{a1} - \text{a2})\sqrt{1 + \frac{\xi k^2}{\text{Rk}^2}}};$$

$$T\xi p = \frac{-P\text{Sin}[\gamma]}{(\text{a1} - \text{a2})\sqrt{1 + \frac{\xi p^2}{\text{Rp}^2}}}; T\xi k = \frac{P\text{Sin}[\gamma]}{(\text{a1} - \text{a2})\sqrt{1 + \frac{\xi k^2}{\text{Rk}^2}}};$$

$$\text{Tpn} =.$$

$$\text{Tkn} = \text{Simplify}[\text{Normal}[\text{Series}[T\xi k, \{\xi k, 0,2\}, \{\text{Rk}, 0,2\}]]]$$

$$\frac{P(2\text{Rk}^2 - \xi k^2)\text{Sin}[\gamma]}{2(\text{a1} - \text{a2})\text{Rk}^2}$$

$$\text{Tpn} = \text{Simplify}[\text{Normal}[\text{Series}[T\xi p, \{\xi p, 0,2\}, \{\text{Rp}, 0,2\}]]]$$

$$\frac{P(-2\text{Rp}^2 + \xi p^2)\text{Sin}[\gamma]}{2(\text{a1} - \text{a2})\text{Rp}^2}$$

$$\text{Tpn} = \frac{P(-2\text{Rp}^2 + \xi p^2)\text{Sin}[\gamma]}{2(\text{a1} - \text{a2})\text{Rp}^2}; \text{Tkn} = \frac{P(2\text{Rk}^2 - \xi k^2)\text{Sin}[\gamma]}{2(\text{a1} - \text{a2})\text{Rk}^2};$$

$$\text{Tpn} = \frac{P(2\text{Rp}^2 - \xi p^2)\text{Sin}[\gamma]}{2(\text{a1} - \text{a2})\text{Rp}^2}; \text{Tkn} = \frac{P(2\text{Rk}^2 - \xi k^2)\text{Sin}[\gamma]}{2(\text{a1} - \text{a2})\text{Rk}^2};$$

## Додаток Г.1.5

$$P\xi p012=\text{Simplify}[\int_{a2}^{a1} \frac{P\left(2\,Rp^2 - \xi p^2\right)\,\text{Cos}\,[\gamma]}{2\,(a1 - a2)\,Rp^2}\,d\xi p]$$

$$1/6\ P\ (6-(a1^2+a1\ a2+a2^2)/Rp^2)\ \text{Cos}[\gamma]$$

$$P\xi p01=\text{Simplify}[\int_{0}^{a1} \frac{P\left(2\,Rp^2 - \xi p^2\right)\,\text{Cos}\,[\gamma]}{2\,(a1 - a2)\,Rp^2}\,d\xi p]/.a2->0$$

$$-((P\ (a1^2-6\ Rp^2)\ \text{Cos}[\gamma])/(6\ Rp^2))$$

$$P\xi p02=\text{Simplify}[\int_{a2}^{0} \frac{P\left(2\,Rp^2 - \xi p^2\right)\,\text{Cos}\,[\gamma]}{2\,(a1 - a2)\,Rp^2}\,d\xi p]/.a1->0$$

$$-((P\ (a2^2-6\ Rp^2)\ \text{Cos}[\gamma])/(6\ Rp^2))$$

$$\text{Solve}[k(-\frac{P(\text{a1}^2 - 6\text{Rp}^2)\text{Cos}[\gamma]}{6\text{Rp}^2}) == \frac{1}{6}P(6 - \frac{\text{a1}^2 + \text{a1a2} + \text{a2}^2}{\text{Rp}^2})\text{Cos}[\gamma] - \frac{P(\text{a2}^2 - 6\text{Rp}^2)\text{Cos}[\gamma]}{6\text{Rp}^2}, k]$$

$$\{\{\text{k01} \to \frac{1}{(\frac{-\text{a1}^2 - \text{a1a2} - 2\text{a2}^2 + 12\text{Rp}^2}{-\text{a1}^2 + 6\text{Rp}^2})};\}\}$$

Продовження додатку Г.1.5

$$\text{Solve}[k(-\frac{P(a2^2-6Rp^2)\text{Cos}[\gamma]}{6Rp^2}) == \frac{1}{6}P(6-\frac{a1^2+a1a2+a2^2}{Rp^2})\text{Cos}[\gamma]-\frac{P(a1^2-6Rp^2)\text{Cos}[\gamma]}{6Rp^2}, k]$$

$$\{\{k02 \to \frac{1}{\frac{-2a1^2-a1a2-a2^2+12Rp^2}{-a2^2+6Rp^2}};\}\}$$

## Додаток Г.1.6

$$\delta \to \delta k + \delta p;$$

$$wk + wp \to \delta k + \delta p - (\zeta kn + \zeta pn);$$

$$Ppn = \frac{P(-2Rp^2+\xi p^2)\text{Cos}[\gamma]}{2(a1-a2)Rp^2}; Pkn = \frac{P(2Rk^2-\xi k^2)\text{Cos}[\gamma]}{2(a1-a2)Rk^2}; Tpn = \frac{P(-2Rp^2+\xi p^2)\text{Sin}[\gamma]}{2(a1-a2)Rp^2}; Tkn = \frac{P(2Rk^2-\xi k^2)\text{Sin}[\gamma]}{2(a1-a2)Rk^2};$$

$$\zeta kn = \frac{\xi k^2}{2Rk}; \zeta pn = -\frac{\xi p^2}{2Rp};$$

$$k1 \to \frac{-a1^2+6Rp^2}{-a1^2+12Rp^2}; k2 \to \frac{-a2^2+6Rp^2}{-a2^2+12Rp^2};$$

## Додаток Г.2.3

Вихідні дані частоти обертання приводного вала

| ω1(D) = | ω2(D) = | ω3(D) = | ω4(D) = | ω5(D) = | ω6(D) = |
|---|---|---|---|---|---|
| 12.857 | 19.286 | 25.714 | 32.143 | 38.571 | 18 |
| 14.464 | 21.696 | 28.929 | 36.161 | 43.393 | 20.25 |
| 16.071 | 24.107 | 32.143 | 40.179 | 48.214 | 22.5 |
| 17.679 | 26.518 | 35.357 | 44.196 | 53.036 | 24.75 |
| 19.286 | 28.929 | 38.571 | 48.214 | 57.857 | 27 |

| ω7(D) = | ω8(D) = | ω9(D) = | ω10(D) = | ω11(D) = |
|---|---|---|---|---|
| 27 | 36 | 45 | 54 | 25.2 |
| 30.375 | 40.5 | 50.625 | 60.75 | 28.35 |
| 33.75 | 45 | 56.25 | 67.5 | 31.5 |
| 37.125 | 49.5 | 61.875 | 74.25 | 34.65 |
| 40.5 | 54 | 67.5 | 81 | 37.8 |

| ω12(D) = | ω13(D) = | ω14(D) = | ω15(D) = |
|---|---|---|---|
| 37.8 | 50.4 | 63 | 75.6 |
| 42.525 | 56.7 | 70.875 | 85.05 |
| 47.25 | 63 | 78.75 | 94.5 |
| 51.975 | 69.3 | 86.625 | 103.95 |
| 56.7 | 75.6 | 94.5 | 113.4 |

Додаток Д.1.1

Технічна характеристика трирядної причіпної коренезбиральної машини

| Найменування показника | Значення показника | |
|---|---|---|
| | Межі регулювання | При проведені досліджень |
| Тип | причіпна | |
| Агрегатування | МТЗ-82 | |
| Конструктивна ширина захвату, м | 1,35 | |
| Кількість рядків | 3 | 3 |
| Ширина міжрядь, см | 45 | 45 |
| Робоча швидкість руху, м/с | 1,0…2,0 | 1,5…1,9 |
| Діаметр дисків, м | 0,45 | 0,45 |
| Кут атаки дисків, град | 10…45 | 30 |
| Глибина ходу викопувальних дисків, см | 5…12 | 9 |
| Частота обертання приводного вала, об/хв | 400…700 | 500 |
| Діаметр приводного вала, м | 0,6 | 0,6 |
| Глибина ходу лапи розрихлювача, см | 5…20 | 14 |
| Швидкість руху похилого транспортера, м/с | 1,4…2,0 | 1,5…1,9 |
| Робоча довжина похилого транспортера, м | 2,4 | 2,4 |
| Швидкість руху горизонтального транспортера, м/с | 1,4…2,0 | 1,5…1,9 |
| Діаметр шнека, м | 0,6 | 0,6 |
| Крок шнека, м | 0,7 | 0,7 |
| Висота витків шнека, м | 0,25 | 0,25 |
| Кількість заходів гвинтової лінії | 1 | 1 |
| Довжина очисних елементів, м | 0,25 | 0,25 |
| Діаметр очисних елементів, мм | 4,0 | 4,0 |
| Частота обертання шнека, об/хв | 80…160 | 90…150 |
| Радіальний зазор між прутком і шнеком, см | 1,0…15,0 | 7,0 |
| Радіальний зазор між прутком і вальцем, см | 1,0…5,0 | 5,0 |
| Частота обертання відкидного вальця, об/хв | 450 | 450 |
| Швидкість руху поперечного транспортера, м/с | 1,5 | 1,5/1,5 |
| Швидкість руху вивантажувального транспортера, м/с | 1,1 | 1,1 |

Додаток Д.2.1

Технічна характеристика коренезбиральної машини МКК-6А

| Найменування показника | Значення показника | |
|---|---|---|
| | Межі регулю-вання | При проведені досліджень аналог/базова |
| Тип | Самохідна | |
| Агрегатування | Силова установка – трактор | |
| Конструктивна ширина захвату, м | 2,7 | |
| Кількість рядків | 6 | 6/6 |
| Ширина міжрядь, м | 0,45 | 0,45/0,45 |
| Робоча швидкість руху, м/с | 1,2…1,8 | 1,6/1,6 |
| Глибина ходу викопувальних дисків, м | 0,05…0,12 | 0,09/0,09 |
| Очисний модуль *II*, рис. 5.3 | | |
| Діаметр шнека, м | 0,25 | 0,25 |
| Частота обертання шнека, об/хв | 90…150 | 120/120 |
| Швидкість руху похилого транспортера, м/с | 1,6…2,0 | 1,6…2,0 |
| Очисний модуль *III*, рис. 5.3 | | |
| Поступальна швидкість руху горизонтального транспортера, м/с | 1,6 | -/1,6 |
| Діаметр шнека модуля, м | 0,6 | -/0,6 |
| Крок шнека, м | 0,7 | -/0,7 |
| Висота витків шнека, м | 0,25 | -/0,25 |
| Кількість заходів гвинтової лінії | 1 | -/1 |
| Довжина очисних елементів, м | 0,25 | -/0,25 |
| Діаметр очисних елементів, мм | 4,0 | -/4,0 |
| Частота обертання шнека, об/хв | 90…160 | -/110 |
| Радіальний зазор між прутком і шнеком, см | 1,0…15,0 | -/7,0 |
| Радіальний зазор між прутком і вальцем, см | 1,0…5,0 | -/5,0 |
| Частота обертання відкидного вальця, об/хв | 450 | -/450 |
| Очисний модуль *IV*, рис. 5.3 | | |
| Поступальна швидкість руху гірки, м/с | 1,0…1,6 | -/1,3 |
| Кут встановлення гірки, град. | 35…65 | -/55 |
| Діаметр шнека круглі/еліпсні, м | 0,18/0,2 | 0,18/0,2 |
| Частота обертання шнека, об/хв | 90…210 | 100…200 |
| Висота рифа шнека, м | 0,3 | 0,3 |
| Крок рифа шнека, м | 0,35 | 0,35 |
| Діаметр приводного очисного вала/ворсу, м | 0,4/0,02 | 0,4/0,02 |
| Швидкість руху поперечного транспортера, м/с | 1,6 | 1,6/- |
| Швидкість руху вивантажувального транспортера, м/с | 1,1 | 1,1/1,1 |

Додаток Д.3.1

Технічна характеристика лабораторного стенду

| Найменування показників | Значення |
|---|---|
| Швидкість руху завантажувального транспортера, м/с | 1,2…2,0 |
| Ширина зазору між прутками транспортера, см | 4,5 |
| Ширина завантажувального транспортера, м | 0,9 |
| Висота скребків завантажувального транспортера, м | 0,15 |
| Крок скребків завантажувального транспортера, м | 0,3 |
| Кут нахилу транспортера до горизонту, град. | 15…55 |
| Кут нахилу очисної пальчикової гірки до горизонту, град. | 40…60 |

Додаток Д.4.1.

Технічна характеристика причіпної коренезбиральної машини МПК-4

| Показники технічної характеристики | Значення показників |
|---|---|
| Тип машини | Причіпна |
| Агрегатування | МТЗ – 82, Т – 70С |
| Швидкість руху, м/с | 1,5 |
| Ширина захвату, м | 1,35 |
| Кількість рядків, які викопуються, шт. | 4 |
| Продуктивність змінного часу, га/год | 0,85 |
| Швидкість руху приймального транспортера, м/с | 1,6 |
| Кут нахилу приймального транспортера до горизонту, град. | 20 |
| Швидкість руху завантажувального транспортера, м/с | 1,6 |
| Кут нахилу завантажувального транспортера до горизонту, град. | 30 |
| Крок скребків завантажувального транспортера, м | 0,3 |
| Швидкість руху полотна очисної пальчикової гірки, м/с | 1,3 |
| Кут нахилу гірки до горизонту, град. | 55 |
| Діаметр поздовжнього шнека, м | 0,2 |
| Крок поздовжнього шнека, м | 0,25 |
| Висота рифа поздовжнього шнека, м | 0,04 |
| Кількість заходів поздовжнього шнека, шт. | 1 |
| Ширина зазору між парами валів шнеків, м | 0,045 |
| Радіус дуги жолоба робочого русла, м | 0,75 |
| Діаметр приводного вала очисних пружних елементів, м | 0,5 |
| Крок пружних очисних елементів, м | 0,25 |
| Кутова швидкість обертання очисних пружних елементів, рад/с | 45,0 |
| Швидкість руху вивантажувального транспортера, м/с | 1,1 |

Додаток Д.5.2

Загальна характеристика посівів залікової ділянки коренеплодів цикорію

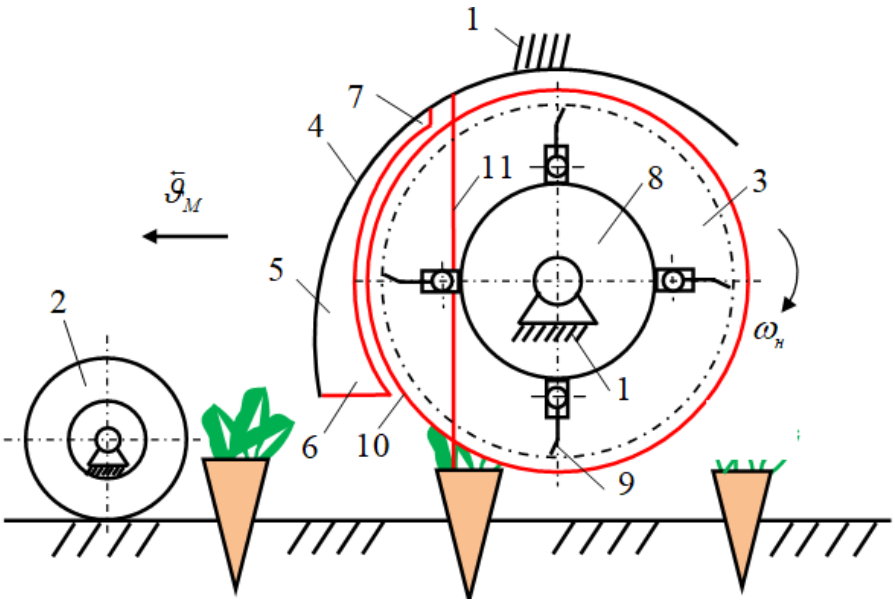
| Найменування показників | Одиниця вимірювання | Значення показників |
|---|---|---|
| Сорт коренеплодів цикорію | «Уманський 99» | |
| Ширина міжрядь:<br>- середня<br>- середньоквадратичне відхилення | <br>см<br>± см | <br>45<br>0,91 |
| Середня врожайність коренеплодів | ц/га | 261,5 |
| Густота насаджень рослин | тис. шт./га | 76,4 |
| Врожайність гички | ц/га | 78,2 |
| Відстань між коренеплодами в рядку | см | 9...14 |
| Діаметр коренеплодів | см | 6...10 |
| Співвідношення між групами коренеплодів за масою | % | 31,3/54,2/13,5 |
| Відхилення коренеплодів від осьової лінії рядка | см | до 2,8 |
| Висота розташування головок коренеплодів | см | 5,1...13,3 |
| Кількість бур'янів на 1 $м^2$ | шт./кг/$м^2$ | до 8/0,9 |

Умови проведення експериментальних досліджень

| Найменування показників | Значення показників |
|---|---|
| Тип ґрунту і назва за механічним складом | Чорнозем опідзолений, легкосуглинковий |
| Рельєф поля | Рівнинний |
| Мікрорельєф ділянки | Рівний |
| Вологість ґрунту, % у шарі, см:<br>від 0 до 10<br>більше 10 до 20 | <br>17…20<br>18…25 |
| Щільність ґрунту, МПа в шарі, см:<br>від 0 до 10<br>більше 10 до 20 | <br>0,8…0,9<br>1,0…1,3 |

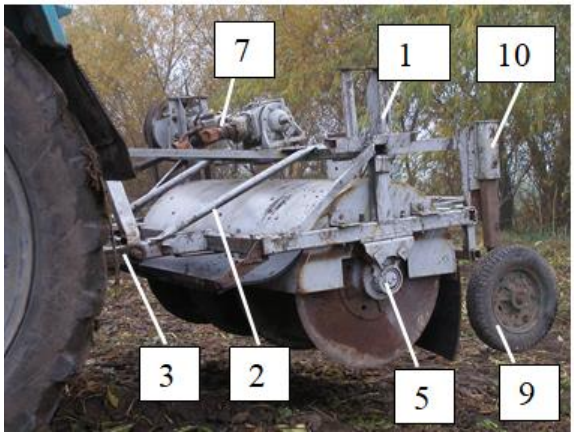
Додаток Д.6.2

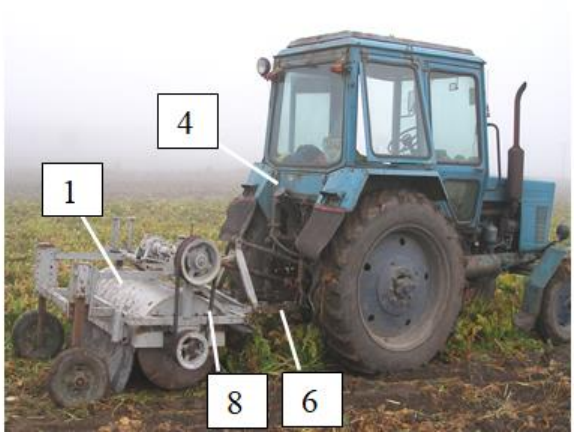
Конструктивна схема гичкозрізувальної машини




1 – рама; 2 – колесо опорне; 3 – роторний гичкоріз; 4 – кожух; 5 – направляючий канал транспортування гички; 6, 7 – вхідна та вихідна горловина; 8 – барабан; 9 – Г-подібний ніж; 10 – ділильний диск; 11 – фартух

Загальний вигляд гичкозрізувального агрегату




1 – гичкозрізувальна машина; 2 – сниця; 3 – начіпна система трактора; 4 – трактор; 5 – роторний гичкоріз; 6 – ВВП трактора; 7 – привод роторного гичкоріза; 8 – клинопасова передача; 9 – опорне колесо; 10 – стояк; 11 – рама

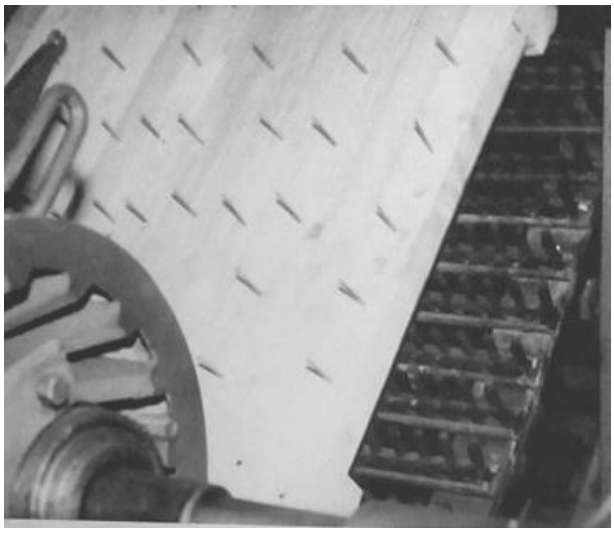
Додаток Д.7.2

Рандомізована план-матриця експерименту типу ПФЕ $3^3$

| № експ. | Рівні факторів | | | | Взаємодія факторів | | | Коефіцієнт сепарації домішок | | | Середні значення коефіцієнта сепарації домішок |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | Повторюваність | | | |
| | $x_0$ | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_1 x_2$ | $x_1 x_3$ | $x_2 x_3$ | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | +1 | 0 | +1 | -1 | 0 | 0 | -1 | $y_{11}$ | $y_{12}$ | $y_{13}$ | $y_{1c}$ |
| 2 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | -1 | $y_{21}$ | $y_{22}$ | $y_{23}$ | $y_{2c}$ |
| 3 | +1 | 0 | -1 | +1 | 0 | 0 | -1 | $y_{31}$ | $y_{32}$ | $y_{33}$ | $y_{3c}$ |
| 4 | +1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | $y_{41}$ | $y_{42}$ | $y_{43}$ | $y_{4c}$ |
| 5 | +1 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | $y_{51}$ | $y_{52}$ | $y_{53}$ | $y_{5c}$ |
| 6 | +1 | +1 | +1 | 0 | +1 | 0 | 0 | $y_{61}$ | $y_{62}$ | $y_{63}$ | $y_{6c}$ |
| 7 | +1 | 0 | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | $y_{71}$ | $y_{72}$ | $y_{73}$ | $y_{7c}$ |
| 8 | +1 | +1 | 0 | +1 | 0 | +1 | 0 | $y_{81}$ | $y_{82}$ | $y_{83}$ | $y_{8c}$ |
| 9 | +1 | 0 | 0 | +1 | 0 | 0 | 0 | $y_{91}$ | $y_{92}$ | $y_{93}$ | $y_{9c}$ |
| 10 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | $y_{101}$ | $y_{102}$ | $y_{103}$ | $y_{10c}$ |
| 11 | +1 | +1 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 | $y_{111}$ | $y_{112}$ | $y_{113}$ | $y_{11c}$ |
| 12 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | $y_{121}$ | $y_{122}$ | $y_{123}$ | $y_{12c}$ |
| 13 | +1 | -1 | +1 | 0 | -1 | 0 | 0 | $y_{131}$ | $y_{132}$ | $y_{133}$ | $y_{13c}$ |
| 14 | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $y_{141}$ | $y_{142}$ | $y_{143}$ | $y_{14c}$ |
| 15 | +1 | 0 | -1 | -1 | 0 | 0 | +1 | $y_{151}$ | $y_{152}$ | $y_{153}$ | $y_{15c}$ |
| 16 | +1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | $y_{161}$ | $y_{162}$ | $y_{163}$ | $y_{16c}$ |
| 17 | +1 | 0 | +1 | -1 | 0 | 0 | -1 | $y_{171}$ | $y_{172}$ | $y_{173}$ | $y_{17c}$ |
| 18 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | $y_{181}$ | $y_{182}$ | $y_{183}$ | $y_{18c}$ |
| 19 | +1 | -1 | +1 | 0 | -1 | 0 | 0 | $y_{191}$ | $y_{192}$ | $y_{193}$ | $y_{19c}$ |
| 20 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | $y_{201}$ | $y_{202}$ | $y_{203}$ | $y_{20c}$ |
| 21 | +1 | +1 | -1 | -1 | -1 | -1 | +1 | $y_{211}$ | $y_{212}$ | $y_{213}$ | $y_{21c}$ |
| 22 | +1 | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $y_{221}$ | $y_{222}$ | $y_{123}$ | $y_{22c}$ |
| 23 | +1 | +1 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | $y_{231}$ | $y_{232}$ | $y_{233}$ | $y_{23c}$ |
| 24 | +1 | -1 | -1 | 0 | +1 | 0 | 0 | $y_{241}$ | $y_{242}$ | $y_{243}$ | $y_{24c}$ |
| 25 | +1 | 0 | +1 | +1 | 0 | 0 | +1 | $y_{251}$ | $y_{252}$ | $y_{253}$ | $y_{25c}$ |
| 26 | +1 | -1 | 0 | +1 | 0 | -1 | 0 | $y_{261}$ | $y_{262}$ | $y_{263}$ | $y_{26c}$ |
| 27 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | -1 | $y_{271}$ | $y_{272}$ | $y_{273}$ | $y_{27c}$ |

Додаток Д.8.2

Загальний вигляд похилої площини зі стрижнями (цвяхами)



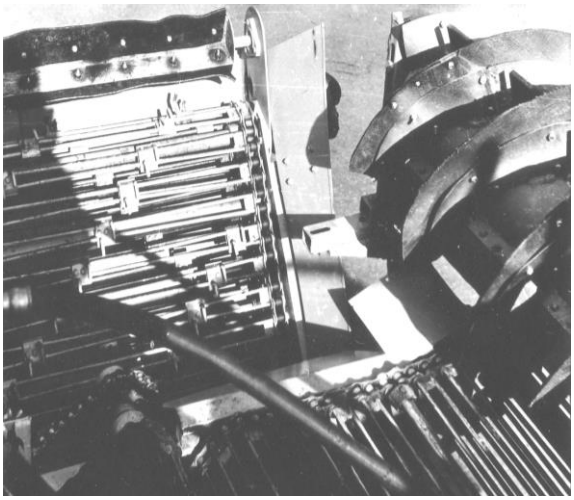
Додаток Д.9.2

План-матриця експерименту типу ПФЕ $2^3$

| № досл. | Рівні факторів | | | Взаємодія факторів | Параметр оптимізації, $L_{Ae}$ | | | Середні значення $L_{Ae}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Повторюваність | | | |
| | $x_0$ | $x_1$ | $x_2$ | $x_1 x_2$ | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | +1 | -1 | -1 | +1 | $y_{11}$ | $y_{12}$ | $y_{13}$ | $y_{1c}$ |
| 2 | +1 | +1 | -1 | -1 | $y_{21}$ | $y_{22}$ | $y_{23}$ | $y_{2c}$ |
| 3 | +1 | 0 | -1 | 0 | $y_{31}$ | $y_{32}$ | $y_{33}$ | $y_{3c}$ |
| 4 | +1 | -1 | +1 | -1 | $y_{41}$ | $y_{42}$ | $y_{43}$ | $y_{4c}$ |
| 5 | +1 | +1 | +1 | +1 | $y_{51}$ | $y_{52}$ | $y_{53}$ | $y_{5c}$ |
| 6 | +1 | 0 | +1 | 0 | $y_{61}$ | $y_{62}$ | $y_{63}$ | $y_{6c}$ |
| 7 | +1 | -1 | 0 | 0 | $y_{71}$ | $y_{72}$ | $y_{73}$ | $y_{7c}$ |
| 8 | +1 | +1 | 0 | 0 | $y_{81}$ | $y_{82}$ | $y_{83}$ | $y_{8c}$ |
| 9 | +1 | 0 | 0 | 0 | $y_{91}$ | $y_{92}$ | $y_{93}$ | $y_{9c}$ |

Додаток Д.10.3

Загальний вигляд ОТТМ, вигляд зверху



1 – горизонтальний транспортер; 2 – шнековий конвеєр; 3 – очисна гірка

Додаток Д.11.2

Загальна характеристика посівів залікової ділянки кормових буряків

| Найменування показників | Значення показників |
|---|---|
| Сорт кормових буряків | «Київський» |
| Ширина міжрядь, см: середня<br>- середньоквадратичне відхилення, ± см | 44,8<br>0,86 |
| Урожайність коренеплодів/гички, ц/га | 351,0/103,4 |
| Густота насаджень рослин, тис. шт./га | 76,3 |
| Відстань між коренеплодами в рядку, м | 0,2...0,27 |
| Діаметр коренеплодів, м | 0,05...0,18 |
| Розмір коренеплодів за групами, мм:<br>- великі<br>діаметр коренеплодів<br>довжина коренеплодів<br>- середні<br>діаметр коренеплодів<br>довжина коренеплодів<br>- дрібні<br>діаметр коренеплодів<br>довжина коренеплодів | <br><br>120<br>240<br><br>70<br>130<br><br>50<br>100 |
| Співвідношення груп коренеплодів за масою, % | 70,1/25,5/4,4 |
| Відхилення коренеплодів від осьової лінії рядка, ±см | до 1,8 |
| Кількість бур’янів на 1 м$^2$,шт./кг/м$^2$ | до 14/1,7 |

Продовження додатку Д.11.2

Умови проведення експериментальних досліджень

| Найменування показників | Значення показників за даними вимірювань |
|---|---|
| Тип ґрунту і назва за механічним складом | Чорнозем опідзолений, легкосуглинковий |
| Рельєф поля | Рівнинний |
| Мікрорельєф ділянки | Рівний |
| Вологість ґрунту, % у шарі, см:<br>від 0 до 5<br>більше 5 до 10<br>більше 10 до 20 | <br>18,4<br>21,3<br>22,1 |
| Щільність ґрунту, МПа в шарі, см:<br>від 0 до 5<br>більше 5 до 10<br>більше 10 до 20 | <br>1,5<br>2,3<br>2,9 |
| Кількість бур'янів на 1 $м^2$, шт.; кг/$м^2$ | до 15; 1,5 |

Додаток Д.12.2

Загальна характеристика посівів залікової ділянки цукрових буряків

| Найменування показників | Одиниця вимірювання | Значення показників |
|---|---|---|
| Сорт цукрових буряків | «Ялтушківський 99» | |
| Ширина міжрядь:<br>- середня<br>- середньоквадратичне відхилення | <br>см<br>± см | <br>45<br>0,84 |
| Врожайність коренеплодів | ц/га | 324,6 |
| Густота насаджень рослин | тис. шт./га | 82,3 |
| Врожайність гички | ц/га | 93,8 |
| Відстань між коренеплодами в рядку | м | 0,20...0,25 |
| Діаметр коренеплодів | м | 0,06...0,15 |
| Співвідношення між групами коренеплодів за масою | % | 51,3/38,2/9,9 |
| Відхилення коренеплодів від осьової лінії рядка | ±см | до 1,7 |
| Висота розташування головок коренеплодів | ± см | 0,4...1,05 |
| Кількість бур'янів на 1 $м^2$ | шт./кг/$м^2$ | до 10/1,1 |

Продовження додатку Д.12.2

Умови проведення експериментальних досліджень

| Найменування показників | Значення показників за даними вимірювань |
|---|---|
| Тип ґрунту і назва за механічним складом | Чорнозем опідзолений, легкосуглинковий |
| Рельєф поля | Рівнинний |
| Мікрорельєф ділянки | Рівний |
| Вологість ґрунту (%) у шарі, см:<br>від 0 до 5<br>більше 5 до 10<br>більше 10 до 20 | <br>16,2; 18,6; 20,4<br>18,3; 22,3; 26,2<br>22,1 |
| Щільність ґрунту (МПа) в шарі, см:<br>від 0 до 5<br>більше 5 до 10<br>більше 10 до 20 | <br>1,5-1,6<br>2,3-2,5<br>2,9 |

Додаток Д.13.2

Загальний вигляд гичкозбиральної машини МБК-6

Додаток Ж.1.1

Експериментальний масив даних коефіцієнта сепарації домішок (коренеплоди цикорію)

Данные: Коефіцієнт сепарації_дані (20v * 28c)

| | 1 Var1 | 2 Var2 | 3 Var3 | 4 Var4 | 5 Var5 | 6 Var6 | 7 Var7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 10 | 90 | 62 | 57 | 61 | 68 |
| 2 | 5 | 10 | 120 | 64 | 59 | 63 | 70 |
| 3 | 5 | 10 | 150 | 67 | 62 | 66 | 73 |
| 4 | 6 | 10 | 90 | 59 | 54 | 58 | 65 |
| 5 | 6 | 10 | 120 | 61 | 56 | 60 | 67 |
| 6 | 6 | 10 | 150 | 63 | 58 | 62 | 69 |
| 7 | 7 | 10 | 90 | 55 | 50 | 54 | 61 |
| 8 | 7 | 10 | 120 | 58 | 53 | 57 | 64 |
| 9 | 7 | 10 | 150 | 62 | 57 | 61 | 68 |
| 10 | 5 | 20 | 90 | 65 | 60 | 64 | 71 |
| 11 | 5 | 20 | 120 | 67 | 62 | 66 | 73 |
| 12 | 5 | 20 | 150 | 70 | 65 | 69 | 76 |
| 13 | 6 | 20 | 90 | 64 | 59 | 63 | 70 |
| 14 | 6 | 20 | 120 | 66 | 61 | 65 | 72 |
| 15 | 6 | 20 | 150 | 69 | 65 | 69 | 76 |
| 16 | 7 | 20 | 90 | 56 | 51 | 55 | 62 |
| 17 | 7 | 20 | 120 | 58 | 53 | 57 | 64 |
| 18 | 7 | 20 | 150 | 60 | 55 | 59 | 66 |
| 19 | 5 | 30 | 90 | 68 | 63 | 67 | 74 |
| 20 | 5 | 30 | 120 | 71 | 66 | 70 | 77 |
| 21 | 5 | 30 | 150 | 75 | 70 | 74 | 81 |
| 22 | 6 | 30 | 90 | 68 | 63 | 67 | 74 |
| 23 | 6 | 30 | 120 | 70 | 65 | 69 | 76 |
| 24 | 6 | 30 | 150 | 72 | 67 | 71 | 78 |
| 25 | 7 | 30 | 90 | 60 | 55 | 59 | 66 |
| 26 | 7 | 30 | 120 | 62 | 57 | 61 | 68 |
| 27 | 7 | 30 | 150 | 65 | 60 | 64 | 71 |

Фак1 – швидкість руху коренезбиральної машини $\vartheta_M$, км/год.

Фак2 – кут встановлення похилого транспортера, град.

Фак3 – частота обертання шнека $n_m$, приводного вала похилого транспортера об/хв.

Фак4 – загальний коефіцієнт $\mu_{зде}^{(z)}$ сепарації загальних домішок, %.

Фак5 – коефіцієнт $\mu_{зде}^{(z_{1l})}$ сепарації загальних домішок ділянки $l_1$, %.

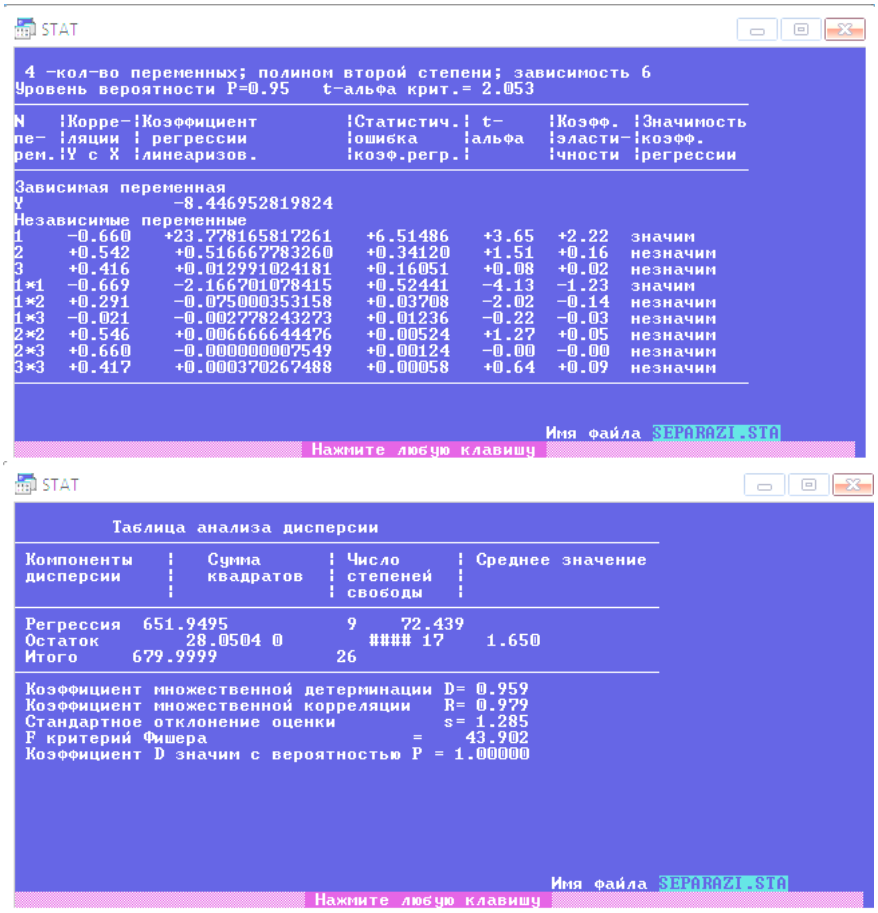
Фак6 – коефіцієнт $\mu_{зде}^{(z_{2l})}$ сепарації загальних домішок ділянки $l_2$, %.

Фак7 – коефіцієнт $\mu_{зде}^{(z_{3l})}$ сепарації загальних домішок ділянки $l_3$, %.

Додаток Ж.2.1

Результати статистичних розрахунків експериментального масиву даних з визначення коефіцієнтів сепарації похилого транспортера

Загальний коефіцієнт $\mu_{зде}^{(Z)}$ сепарації загальних домішок.



STAT

4 -кол-во переменных; полином второй степени; зависимость 6
Уровень вероятности P=0.95 t-альфа крит.= 2.053

| N пе- рем. | Корре- ляции Y с X | Коэффициент регрессии линеаризов. | Статистич. ошибка коэф.регр. | t- альфа | Коэфф. эласти- чности | Значимость коэфф. регрессии |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Зависимая переменная | | | | | | |
| Y | | -8.446952819824 | | | | |
| Независимые переменные | | | | | | |
| 1 | -0.660 | +23.778165817261 | +6.51486 | +3.65 | +2.22 | значим |
| 2 | +0.542 | +0.516667783260 | +0.34120 | +1.51 | +0.16 | незначим |
| 3 | +0.416 | +0.012991024181 | +0.16051 | +0.08 | +0.02 | незначим |
| 1*1 | -0.669 | -2.166701078415 | +0.52441 | -4.13 | -1.23 | значим |
| 1*2 | +0.291 | -0.075000353158 | +0.03708 | -2.02 | -0.14 | незначим |
| 1*3 | -0.021 | -0.002778243273 | +0.01236 | -0.22 | -0.03 | незначим |
| 2*2 | +0.546 | +0.006666644476 | +0.00524 | +1.27 | +0.05 | незначим |
| 2*3 | +0.660 | -0.000000007549 | +0.00124 | -0.00 | -0.00 | незначим |
| 3*3 | +0.417 | +0.000370267488 | +0.00058 | +0.64 | +0.09 | незначим |

Имя файла SEPARAZI.STA
Нажмите любую клавишу

STAT

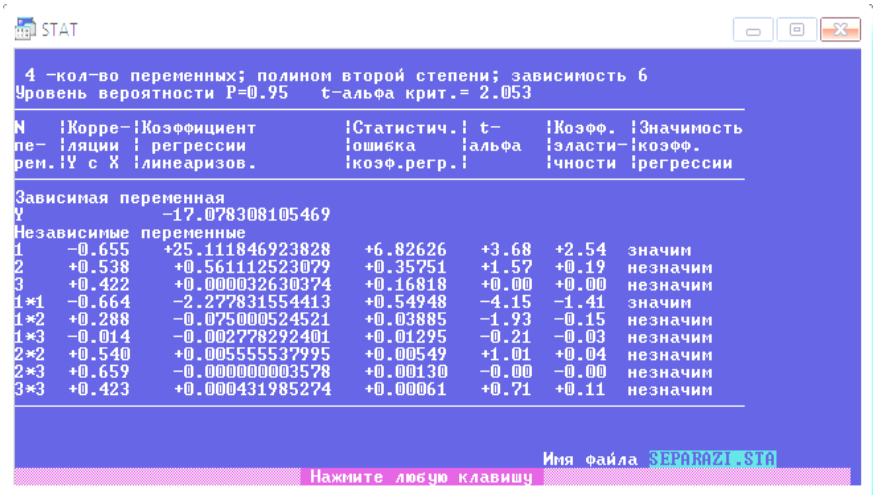
Таблица анализа дисперсии

| Компоненты дисперсии | Сумма квадратов | Число степеней свободы | Среднее значение |
|---|---|---|---|
| Регрессия | 651.9495 | 9 | 72.439 |
| Остаток | 28.0504 0 | #### 17 | 1.650 |
| Итого | 679.9999 | 26 | |

Коэффициент множественной детерминации D= 0.959
Коэффициент множественной корреляции R= 0.979
Стандартное отклонение оценки s= 1.285
F критерий Фишера = 43.902
Коэффициент D значим с вероятностью P = 1.00000

Имя файла SEPARAZI.STA
Нажмите любую клавишу

Коефіцієнт $\mu_{зде}^{(Z_{1l})}$ сепарації загальних домішок ділянки $l_1$.



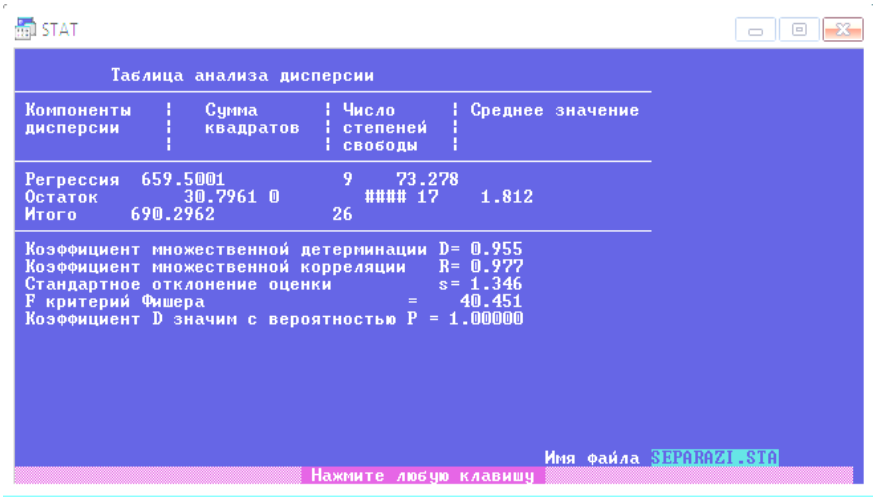
STAT

4 -кол-во переменных; полином второй степени; зависимость 6
Уровень вероятности P=0.95 t-альфа крит.= 2.053

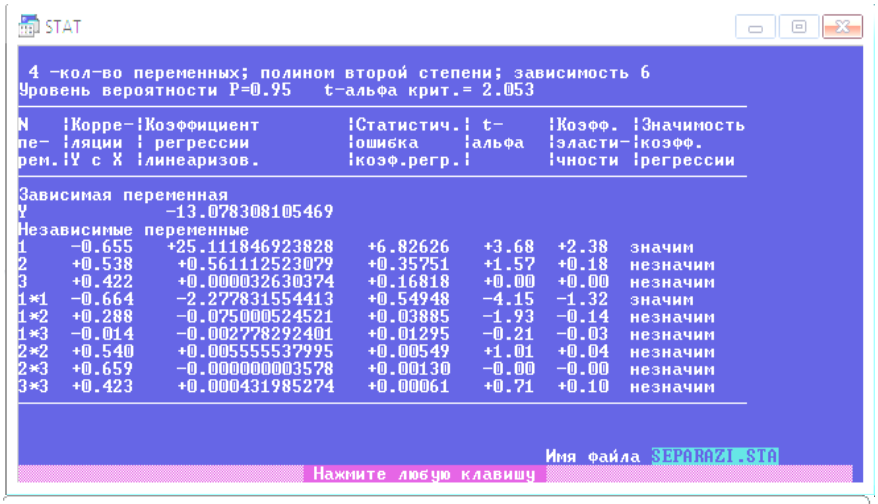
| N пе- рем. | Корре- ляции Y с X | Коэффициент регрессии линеаризов. | Статистич. ошибка коэф.регр. | t- альфа | Коэфф. эласти- чности | Значимость коэфф. регрессии |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Зависимая переменная | | | | | | |
| Y | | -17.078308105469 | | | | |
| Независимые переменные | | | | | | |
| 1 | -0.655 | +25.111846923828 | +6.82626 | +3.68 | +2.54 | значим |
| 2 | +0.538 | +0.561112523079 | +0.35751 | +1.57 | +0.19 | незначим |
| 3 | +0.422 | +0.000032630374 | +0.16818 | +0.00 | +0.00 | незначим |
| 1*1 | -0.664 | -2.277831554413 | +0.54948 | -4.15 | -1.41 | значим |
| 1*2 | +0.288 | -0.075000524521 | +0.03885 | -1.93 | -0.15 | незначим |
| 1*3 | -0.014 | -0.002778292401 | +0.01295 | -0.21 | -0.03 | незначим |
| 2*2 | +0.540 | +0.005555537995 | +0.00549 | +1.01 | +0.04 | незначим |
| 2*3 | +0.659 | -0.000000003578 | +0.00130 | -0.00 | -0.00 | незначим |
| 3*3 | +0.423 | +0.000431985274 | +0.00061 | +0.71 | +0.11 | незначим |

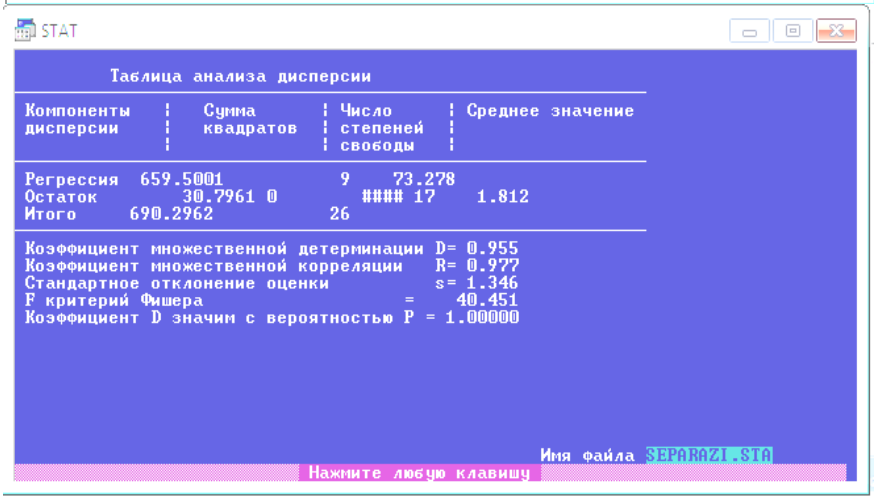
Имя файла SEPARAZI.STA
Нажмите любую клавишу

Продовження додатку Ж.2.1



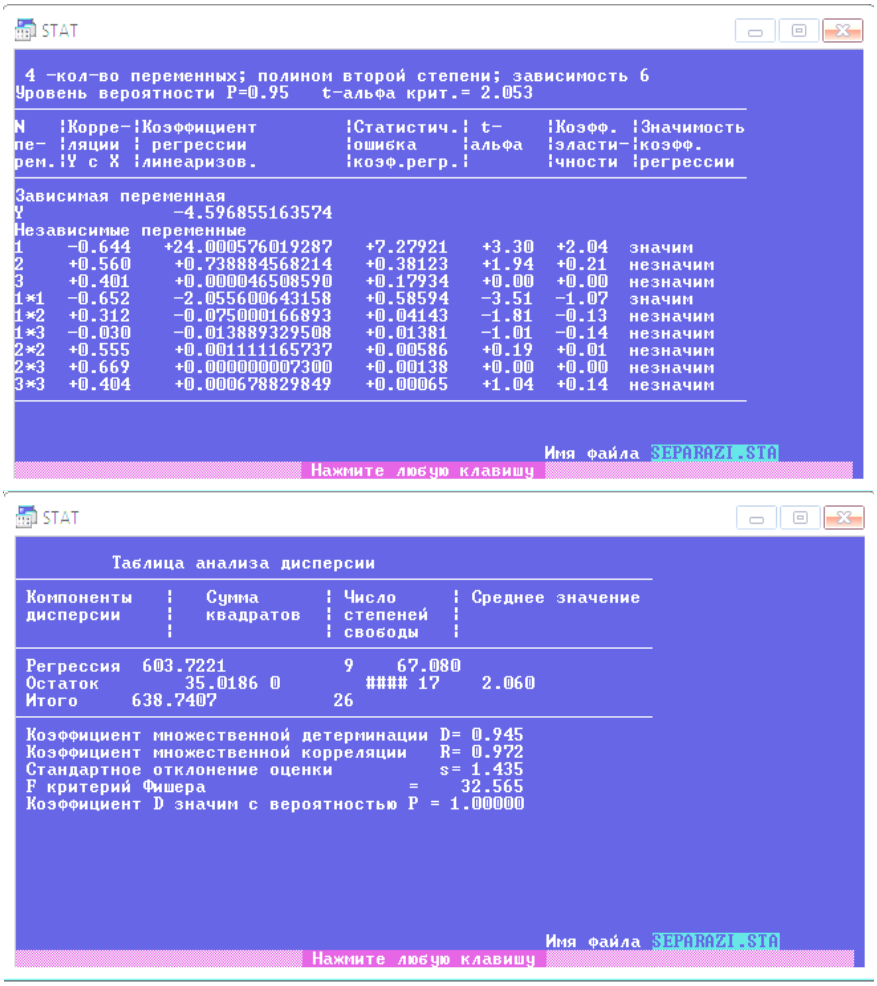

Коефіцієнт $\mu_{зде}^{(z_{2l})}$ сепарації загальних домішок ділянки $l_2$.



Продовження додатку Ж.2.1

Коефіцієнт $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ сепарації загальних домішок ділянки $l_3$.




Додаток Ж.3

**Результати експериментальних досліджень дальності польоту коренеплодів цикорію із похилого транспортера до очисної гірки**

У процесі проведення експериментальних досліджень встановлювали вигляд математичних моделей, які описують функціональний характер зміни дальності польоту $L_{Ae}$ коренеплодів 1 цикорію (рис. 5.11) із похилого транспортера 2 до похилої площини 4 (робочої гілки очисної гірки) згідно з моделлю 5.10 і табл. 5.2, тобто визначали функціональну залежність $L_{Ae}^{(0,35)} = f_L(\varepsilon; n_m)$, $L_{Ae}^{(0,5)} = f_L(\varepsilon; n_m)$, $L_{Ae}^{(0,65)} = f_L(\varepsilon; n_m)$ для трьох усереднених значень маси $m_k$ коренеплодів цикорію: 0,35; 0,5; 0,65 кг.

За результатами статистичної обробки отриманого експериментального масиву даних було встановлено, що під час проведення лабораторних досліджень з визначення експериментального значення дальності польоту $L_{Ae}$ коренеплодів 1 з похилого транспортера 2 до похилої площини 4 (рис. 5.11, додаток Ж.3.1) і аналізу отриманих показників статистичної обробки (додаток Ж.3.2), найбільше значення коефіцієнта чисельної детермінації ($D_{L1m}$ = 0,983, $D_{L2m}$ = 0,987, $D_{L3m}$ = 0,978) відповідало математичній моделі повного полінома другої степені.

Натуральні значення коефіцієнтів рівняння регресії, які отримано за результатами експериментальних досліджень дальності польоту $L_{Ae}$ коренеплодів з похилого транспортера до очисної гірки наведено у табл. Ж.3.1.

Таблиця Ж.3.1 – Натуральні значення коефіцієнтів рівнянь регресії

| Позначення | Натуральні значення коефіцієнтів рівняння регресії | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $b_0$ | $b_1$ | $b_2$ | $b_{12}$ | $b_{11}$ | $b_{22}$ |
| $L_{Ae}^{(0,35)} = f_L(\varepsilon; n_m)$ | 0,35 | -0,0045 | 0,01 | -0,0002 | 0,0001 | $1{,}85\ 10^{-6}$ |
| $L_{Ae}^{(0,5)} = f_L(\varepsilon; n_m)$ | 0,73 | 0,33 | 0,1 | $7{,}5\ 10^{-5}$ | 0,0004 | $1{,}85\ 10^{-5}$ |
| $L_{Ae}^{(0,65)} = f_L(\varepsilon; n_m)$ | -0,3 | 0,4 | -0,0091 | -0,0002 | -0,0006 | $1{,}85\ 10^{-6}$ |

За результатами перевірки значимості коефіцієнтів емпіричної моделі за $t$-критерієм Ст'юдента було встановлено, що вплив всіх коефіцієнтів вхідних факторів (кута встановлення $\varepsilon$ похилого транспортера до горизонту та частоти обертання $n_m$ приводного вала транспортера) на апроксимовані значення зміни дальності польоту $L_{Ae}$ коренеплодів є суттєвим, додаток Ж.4.1, табл. Ж.3.1.

Після перевірки значимості коефіцієнтів рівняння регресії за $F$-критерієм Фішера та адекватності моделі за $t$-критерієм Ст'юдента, отримали кінцеві емпіричні рівняння регресії в натуральних факторах, які характеризують функціональну залежність зміни:

- дальності польоту коренеплодів масою $m_k$ = 0,35 кг з похилого транспортера до похилої площини

$$L_{Ae}^{(0,35)} = 0,35 - 0,45 \cdot 10^{-2}\varepsilon + 0,01 n_m - 0,2 \cdot 10^{-3}\varepsilon n_m + 0,1 \cdot 10^{-3}\varepsilon^2 + 1,85 \cdot 10^{-6} n_m^2; \quad (Ж.1.1)$$

- дальності польоту коренеплодів масою $m_k$ = 0,5 кг з похилого транспортера до похилої площини

$$L_{Ae}^{(0,5)} = 0,73 - 0,33 \cdot 10^{-1} \varepsilon + 0,1 n_m - 7,5 \cdot 10^{-5} \varepsilon n_m + 0,1 \cdot 10^{-3} \varepsilon^2 - 1,85 \cdot 10^{-6} n_m^2; \quad \text{(Ж.1.2)}$$

- дальності польоту коренеплодів масою $m_k$ = 0,65 кг з похилого транспортера до похилої площини

$$L_{Ae}^{(0,65)} = -0,31 + 0,4 \varepsilon + 0,91 \cdot 10^{-2} n_m - 0,2 \cdot 10^{-3} \varepsilon n_m - 0,6 \cdot 10^{-3} \varepsilon^2 + 1,85 \cdot 10^{-6} n_m^2. \quad \text{(Ж.1.3)}$$

Згідно з рівняннями регресії (Ж.1.1)-(Ж.1.3) побудовано поверхні відгуку та двомірні перерізи поверхонь відгуку, які характеризують функціональну залежність зміни дальності польоту $L_{Ae}^{(m_k)}$ коренеплодів з похилого транспортера до очисної гірки залежно від зміни вхідних факторів:

- дальності польоту $L_{Ae}^{(0,35)}$ коренеплодів масою $m_k$ = 0,35 кг з похилого транспортера до очисної гірки як функція: $L_{Ae}^{(0,35)} = f_L(\varepsilon; n_m)$, рис. Ж.1.1а;

- дальності польоту $L_{Ae}^{(0,5)}$ коренеплодів масою $m_k$ = 0,5 кг з похилого транспортера до очисної гірки як функція: $L_{Ae}^{(0,5)} = f_L(\varepsilon; n_m)$, рис. Ж.1.1б;

- дальності польоту $L_{Ae}^{(0,65)}$ коренеплодів масою $m_k$ = 0,65 кг з похилого транспортера до очисної гірки як функція: $L_{Ae}^{(0,65)} = f_L(\varepsilon; n_m)$, рис. Ж.1.1в.

Аналіз поверхонь відгуку та їх двомірних перерізів (рис. Ж.1.1) показує, що зміна апроксимованих значень параметрів оптимізації залежно від встановлених меж зміни вхідних факторів (табл. Ж.1.1: кута встановлення похилого транспортера $20 \le \varepsilon \le 40$ град.; частоти обертання приводного вала похилого транспортера $90 \le n_m \le 150$ об/хв) знаходиться у діапазоні:

- дальності польоту $L_{Ae}^{(0,35)}$ коренеплодів масою $m_k$ = 0,35 кг з похилого транспортера до очисної гірки – від 0,7 до 1,4 м рис. Ж.1.1а;

- дальності польоту $L_{Ae}^{(0,5)}$ коренеплодів масою $m_k$ = 0,5 кг з похилого транспортера до очисної гірки – від 0,7 до 1,3 м рис. Ж.1.1б;

- дальності польоту $L_{Ae}^{(0,65)}$ коренеплодів масою $m_k$ = 0,65 кг з похилого транспортера до очисної гірки – від 0,4 до 1,0 м рис. Ж.1.1в.

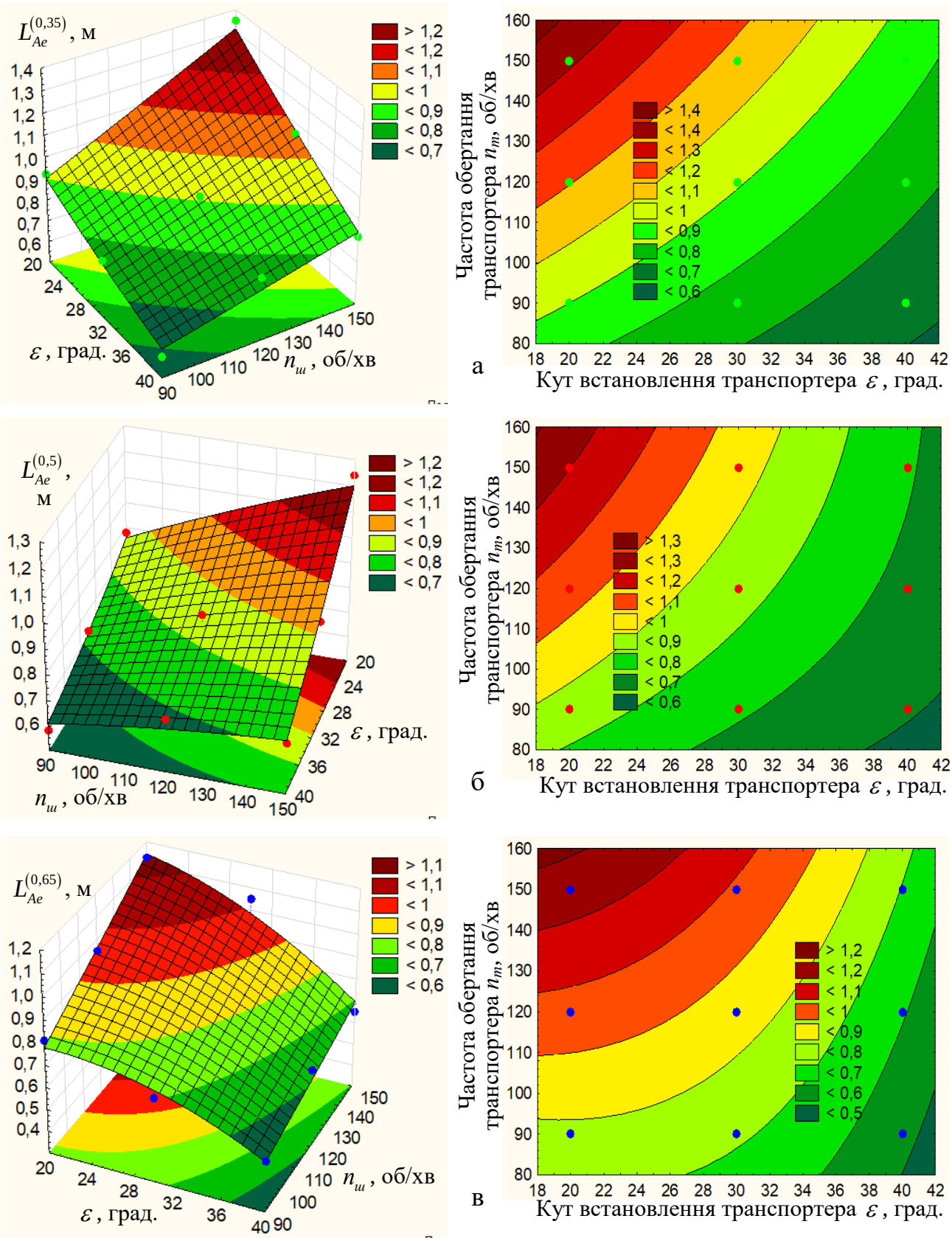



Рисунок Ж.1.1 – Поверхня відгуку та її двомірний переріз дальності польоту коренеплодів цикорію як функція: а, б, в – відповідно, $L_{Ae}^{(0,35)} = f_L(\varepsilon; n_m)$, $L_{Ae}^{(0,5)} = f_L(\varepsilon; n_m)$, $L_{Ae}^{(0,65)} = f_L(\varepsilon; n_m)$

Ці твердження також характерні значенням зміни дальності польоту коренеплодів як функція $L_{Ae}^{(0,35)} = f_L(n_m)$, $L_{Ae}^{(0,5)} = f_L(n_m)$ та $L_{Ae}^{(0,65)} = f_L(n_m)$, які наведено на рис. Ж.1.2

При цьому, характер функціонального впливу кожного вхідного фактора на зміну параметра оптимізації є наступним.

За збільшення кута встановлення похилого транспортера до горизонту в межах $20 \le \varepsilon \le 40$ град., параметри оптимізації (дальність польоту коренеплодів цикорію $L_{Ae}^{(0,35)}$, $L_{Ae}^{(0,5)}$ і $L_{Ae}^{(0,65)}$) зменшується у середньому:

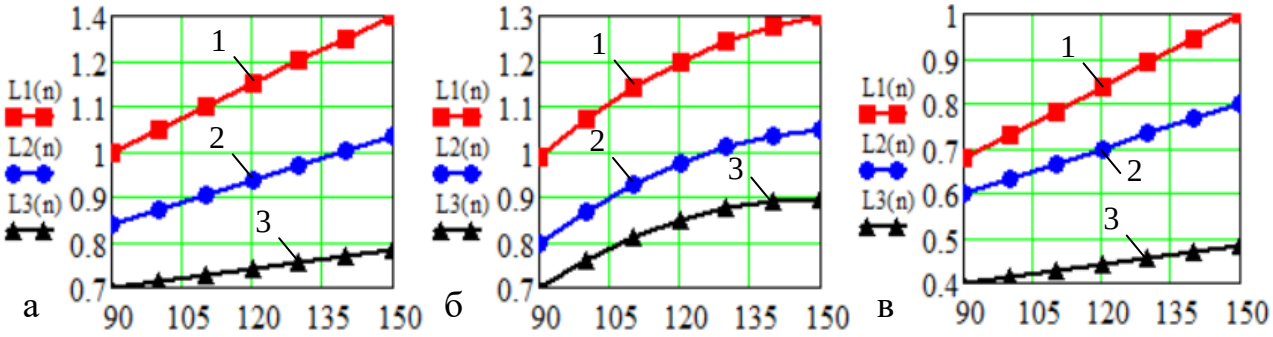



Рисунок Ж.1.2 – Залежність зміни дальності польоту коренеплодів цикорію як функція: а, б, в – відповідно, $L_{Ae}^{(0,35)} = f_L(n_m)$, $L_{Ae}^{(0,5)} = f_L(n_m)$, $L_{Ae}^{(0,65)} = f_L(n_m)$; 1, 2, 3 – відповідно, $\varepsilon =$ 20, 30, 40 град.

- приблизно в 1,5…1,7 раза для коренеплодів цикорію масою $m_k$ = 0,35 кг (рис. 6.8а, 6.9а);

- приблизно в 1,3…1,5 раза для коренеплодів цикорію масою $m_k$ = 0,5 кг (рис. Ж.1.1б, Ж.1.2б);

- приблизно в 1,7…2,0 рази для коренеплодів цикорію масою $m_k$ = 0,65 кг (рис. Ж.1.1в, Ж.1.2в).

При цьому розсіювання експериментальних даних відносно зміни кута встановлення $\varepsilon$ транспортера відносно горизонту підкоряється нормальному закону імовірного розподілення за довірчого інтервалу 0,95, що характерно графічній інтерпретації, яку наведено на рис. Ж.1.3, Ж.1.4.

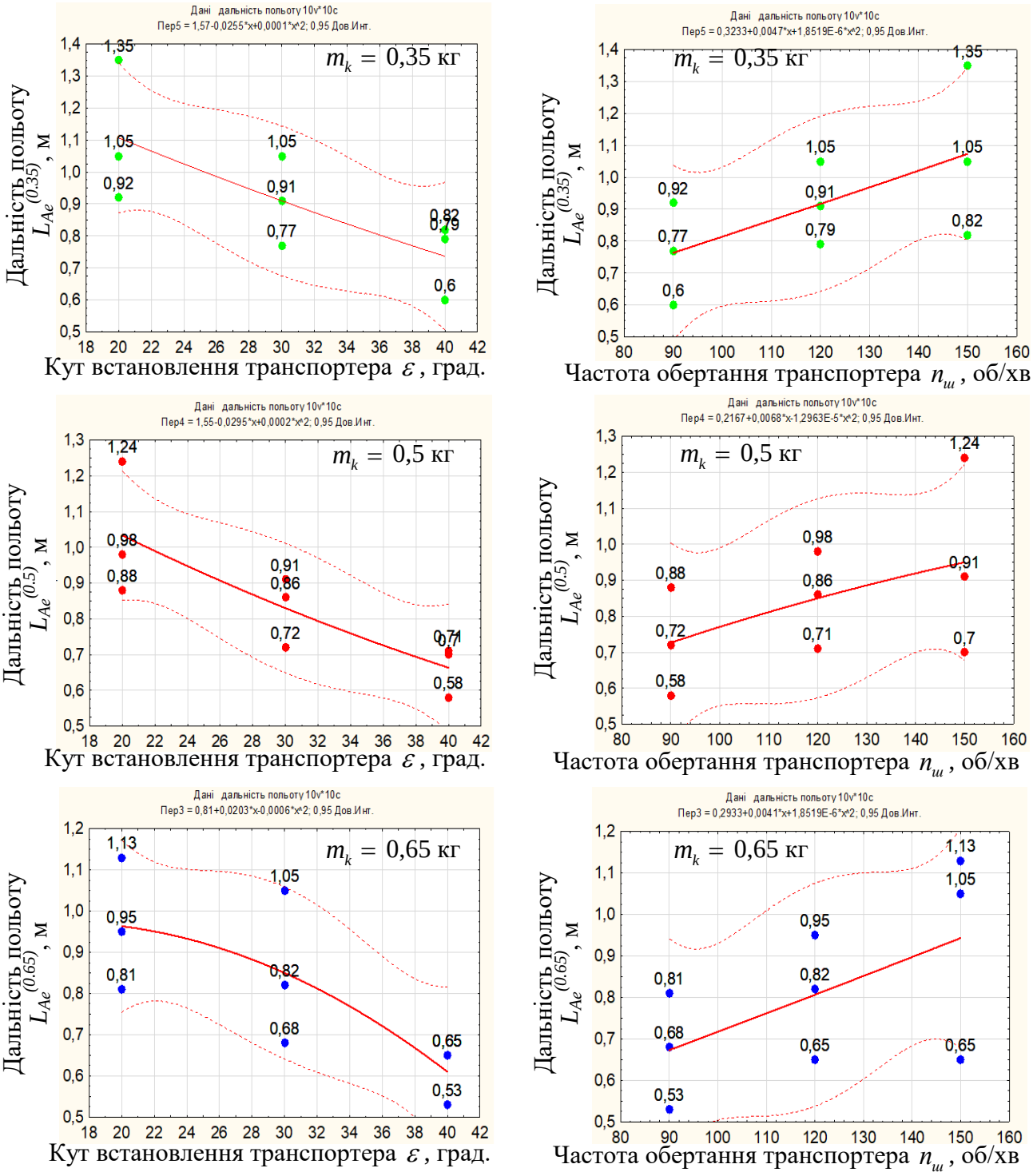



Рисунок Ж.1.3 – Діаграма розсіювання експериментальних даних залежності зміни дальності польоту $L_{Ae}^{(m_i)}$ коренеплодів цикорію як функція $L_{Ae}^{(m_i)} = f_L(\varepsilon)$ і $L_{Ae}^{(m_i)} = f_L(n_m)$

За збільшення частоти обертання приводного вала похилого транспортера у межах $90 \le n_m \le 150$ об/хв, параметри оптимізації (дальність польоту коренеплоду $L_{Ae}^{(0,35)}$, $L_{Ae}^{(0,5)}$ і $L_{Ae}^{(0,65)}$) збільшується:

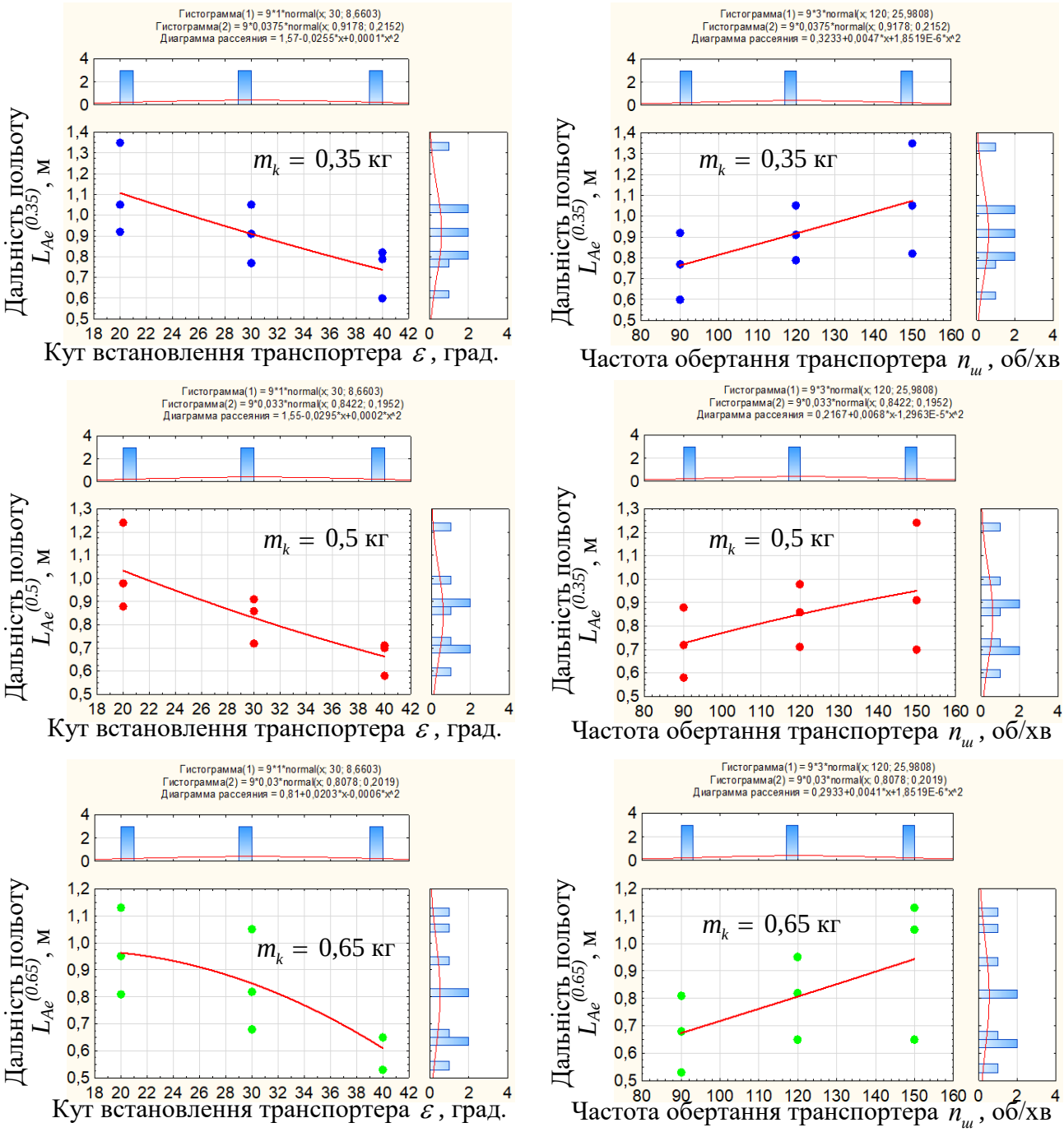



Рисунок Ж.1.4 – Гістограма розподілу експериментальних даних залежності зміни дальності польоту $L_{Ae}^{(m_i)}$ коренеплодів цикорію як функція $L_{Ae}^{(m_i)} = f_L(\varepsilon)$ і $L_{Ae}^{(m_i)} = f_L(n_m)$

- приблизно в 1,2…1,4 раза для коренеплодів цикорію масою $m_k$ = 0,35 кг (рис. Ж.1.1а, Ж.1.2а);

- приблизно в 1,2…1,4 раза для коренеплодів цикорію масою $m_k$ = 0,5 кг (рис. Ж.1.1б, Ж.1.2б);

- приблизно в 1,2…1,4 раза для коренеплодів цикорію масою $m_k = 0{,}65$ кг (рис. Ж.1.1в, Ж.1.2в).

При цьому розсіювання експериментальних даних підкоряється нормальному закону імовірного розподілення за довірчого інтервалу 0,95, рис. Ж.1.3, Ж.1.4.

Таким чином, можна констатувати, що раціональними параметрами похилого транспортера є кут встановлення похилого транспортера до горизонту $\varepsilon =$ 30 град., частота обертання приводного вала похилого транспортера $n_m =$ 120…150 об/хв.

Перевірку адекватності розроблених аналітичної (В.4.33) та емпіричних (Ж1.1)-(Ж.1.3) математичних моделей виконаємо графо-аналітичним методом шляхом порівняння відповідної різниці теоретичних і апроксимованих експериментальних значень функціональної зміни дальності польоту коренеплодів з похилого транспортера до робочої гілки очисної гірки.

На рис. Ж.1.5 наведено графічні залежності функціональної зміни дальності польоту коренеплодів $L_A$ та $L_{Ae}^{(m_{ki})}$ як функція $L_A\left(L_{Ae}^{(m_{ki})}\right) = f_L\left(n_m\right)$, які отримано за результатами, відповідно, аналітичного та емпіричного аналізу.

На основі графо-аналітичного аналізу залежностей (рис. Ж.1.5) встановлено, що розбіжність теоретичних $L_A$, які отримано згідно теоретичної моделі (В.4.33) та апроксимованих експериментальних $L_{Ae}^{(m_{ki})}$ значень дальності польоту коренеплодів цикорію з похилого транспортера до робочої гілки очисної гірки знаходиться у межах:

- від 10 до 15% для коренеплодів цикорію масою $m_k = 0{,}35$ кг;

- від 7 до 12% для коренеплодів цикорію масою $m_k = 0{,}5$ кг;

- від 6 до 13% для коренеплодів цикорію масою $m_k = 0{,}65$ кг.

При зміні частоти обертання приводного вала похилого транспортера в межах зміни $110 \le n_m \le 130$ об/хв значення дальності польоту, як теоретичні $L_A$, так і апроксимовані експериментальні $L_{Ae}^{(m_{ki})}$ для коренеплодів цикорію масою $m_k = 0{,}35$ кг і масою $m_k = 0{,}65$ кг практично співпадають.

Тому можна констатувати, що розроблена аналітична модель (В.4.33), яка характеризує функціональну зміну дальності польоту $L_A$ з похилого транспортера до робочої гілки очисної гірки на теоретичному рівні, є цілком адекватною емпіричним рівнянням регресії (Ж.1.1)-(Ж.1.3), які описують функціональну зміну дальності польоту $L_{Ae}^{(m_{ki})}$ коренеплодів із похилого транспортера до робочої гілки очисної гірки на експериментальному рівні, або є адекватною розподілу апроксимованих експериментальних значень дальності польоту $L_{Ae}^{(m_{ki})}$ коренеплодів цикорію.

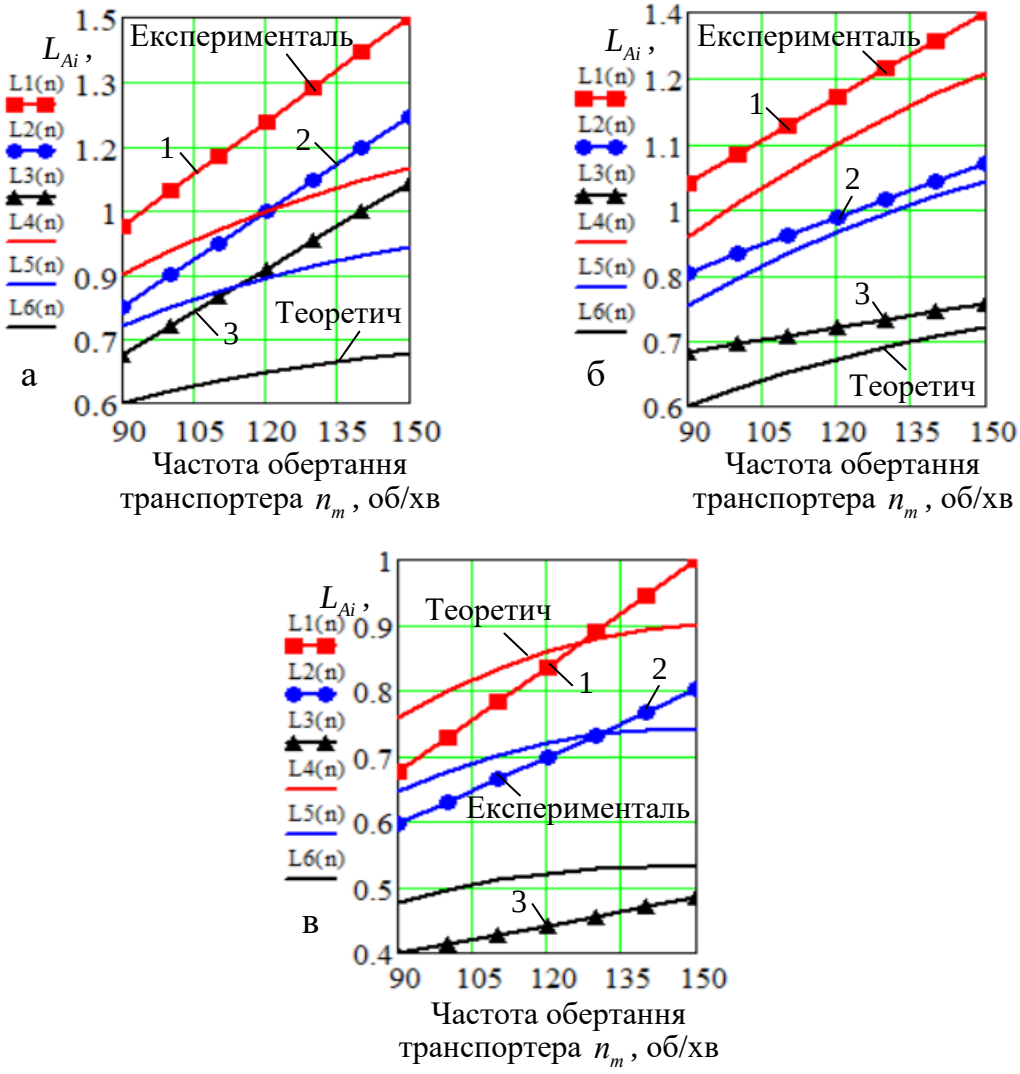



Рисунок Ж.1.5 – Залежність зміни дальності польоту коренеплодів цикорію $L_A$ та $L_{Ae}^{(m_{ki})}$ як функція $L_A(L_{Ae}) = f_L(n_m)$: а – для коренеплодів цикорію масою $m_k$ = 0,35 кг; б – для коренеплодів цикорію масою $m_k$ = 0,5 кг; в – для коренеплодів масою $m_k$ = 0,65 кг; 1, 2, 3 – відповідно, $\varepsilon$ = 20, 30 і 40 град.

Таким чином, розроблені аналітичні (В.4.33), (В.4.37) та емпіричні моделі (Ж.1.1)-(Ж.1.3) дозволяють визначати горизонтальний $L_A$ (рис. В.4.1) та вертикальний $H_A$ конструктивний параметри, які забезпечують необхідне попадання коренеплодів у точку $A$ із заданими координатами $A(x_A; y_A)$, або визначити конструктивне розміщення похилого транспортера й очисної гірки залежно від частоти обертання $n_m$ та кута нахилу $\varepsilon$ похилого транспортера і гірки $\alpha_г$.

Додаток Ж.3.1

Масив експериментальних даних лабораторних досліджень дальності польоту коренеплоду з похилого транспортера до похилої площини

Данные: Дані_ дальність польоту (10v * 10c)

| | 1 Пер1 | 2 Пер2 | 3 Пер3 | 4 Пер4 | 5 Пер5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 20 | 90 | 0,81 | 0,88 | 0,92 |
| 2 | 30 | 90 | 0,68 | 0,72 | 0,77 |
| 3 | 40 | 90 | 0,53 | 0,58 | 0,6 |
| 4 | 20 | 120 | 0,95 | 0,98 | 1,05 |
| 5 | 30 | 120 | 0,82 | 0,86 | 0,91 |
| 6 | 40 | 120 | 0,65 | 0,71 | 0,79 |
| 7 | 20 | 150 | 1,13 | 1,24 | 1,35 |
| 8 | 30 | 150 | 1,05 | 0,91 | 1,05 |
| 9 | 40 | 150 | 0,65 | 0,7 | 0,82 |

Пер1 – кут встановлення похилого транспортера, град.

Пер2 – частота обертання шнека $n_m$, приводного вала похилого транспортера об/хв.

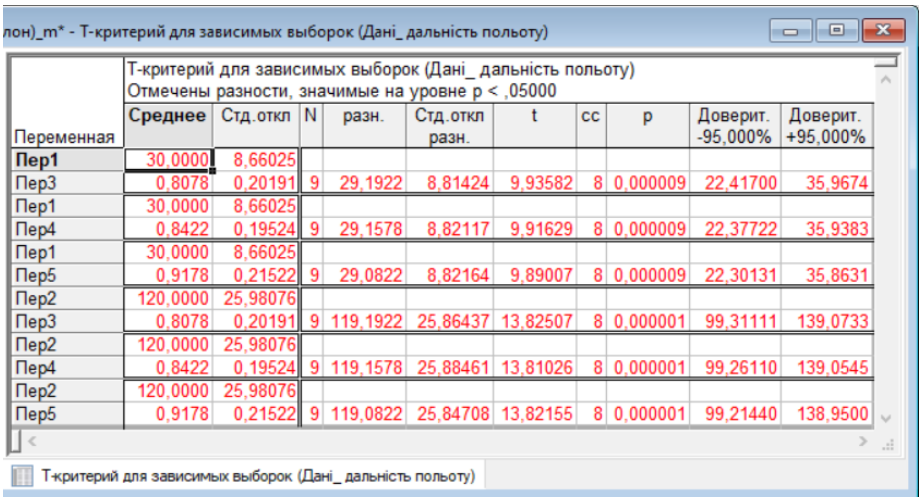
Пер3 – дальність польоту $L_{Ae}$ коренеплодів $m_k = 0.35$ кг, м.

Пер4 – дальність польоту $L_{Ae}$ коренеплодів $m_k = 0.5$ кг, м.

Пер5 – дальність польоту $L_{Ae}$ коренеплодів $m_k = 0.65$ кг, м.

Додаток Ж.3.2

Результати статистичних розрахунків експериментального масиву даних з визначення дальності польоту коренеплоду

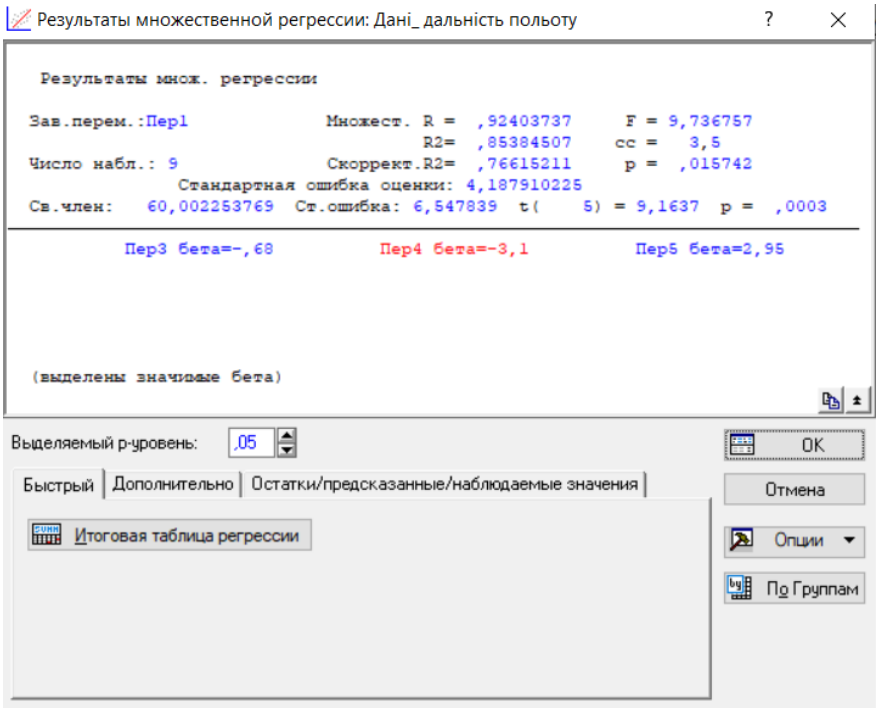


лон)_m* - Т-критерий для зависимых выборок (Дані_ дальність польоту)

Т-критерий для зависимых выборок (Дані_ дальність польоту)
Отмечены разности, значимые на уровне p < ,05000

| Переменная | Среднее | Стд.откл | N | разн. | Стд.откл разн. | t | cc | p | Доверит. -95,000% | Доверит. +95,000% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Пер1** | 30,0000 | 8,66025 | | | | | | | | |
| Пер3 | 0,8078 | 0,20191 | 9 | 29,1922 | 8,81424 | 9,93582 | 8 | 0,000009 | 22,41700 | 35,9674 |
| Пер1 | 30,0000 | 8,66025 | | | | | | | | |
| Пер4 | 0,8422 | 0,19524 | 9 | 29,1578 | 8,82117 | 9,91629 | 8 | 0,000009 | 22,37722 | 35,9383 |
| Пер1 | 30,0000 | 8,66025 | | | | | | | | |
| Пер5 | 0,9178 | 0,21522 | 9 | 29,0822 | 8,82164 | 9,89007 | 8 | 0,000009 | 22,30131 | 35,8631 |
| Пер2 | 120,0000 | 25,98076 | | | | | | | | |
| Пер3 | 0,8078 | 0,20191 | 9 | 119,1922 | 25,86437 | 13,82507 | 8 | 0,000001 | 99,31111 | 139,0733 |
| Пер2 | 120,0000 | 25,98076 | | | | | | | | |
| Пер4 | 0,8422 | 0,19524 | 9 | 119,1578 | 25,88461 | 13,81026 | 8 | 0,000001 | 99,26110 | 139,0545 |
| Пер2 | 120,0000 | 25,98076 | | | | | | | | |
| Пер5 | 0,9178 | 0,21522 | 9 | 119,0822 | 25,84708 | 13,82155 | 8 | 0,000001 | 99,21440 | 138,9500 |

Т-критерий для зависимых выборок (Дані_ дальність польоту)



Результаты множественной регрессии: Дані_ дальність польоту

Результаты множ. регрессии

Зав.перем.:Пер1 Множест. R = ,92403737 F = 9,736757
R2= ,85384507 cc = 3,5
Число набл.: 9 Скоррект.R2= ,76615211 p = ,015742
Стандартная ошибка оценки: 4,187910225
Св.член: 60,002253769 Ст.ошибка: 6,547839 t( 5) = 9,1637 p = ,0003

Пер3 бета=-,68 Пер4 бета=-3,1 Пер5 бета=2,95

(выделены значимые бета)

Выделяемый p-уровень: ,05

OK

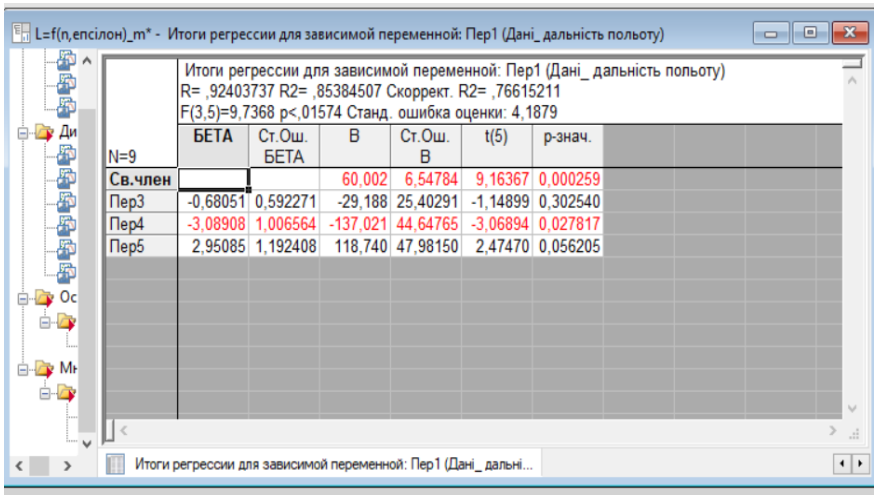
Быстрый | Дополнительно | Остатки/предсказанные/наблюдаемые значения

Отмена

Итоговая таблица регрессии

Опции

По Группам



L=f(n,епсілон)_m* - Итоги регрессии для зависимой переменной: Пер1 (Дані_ дальність польоту)

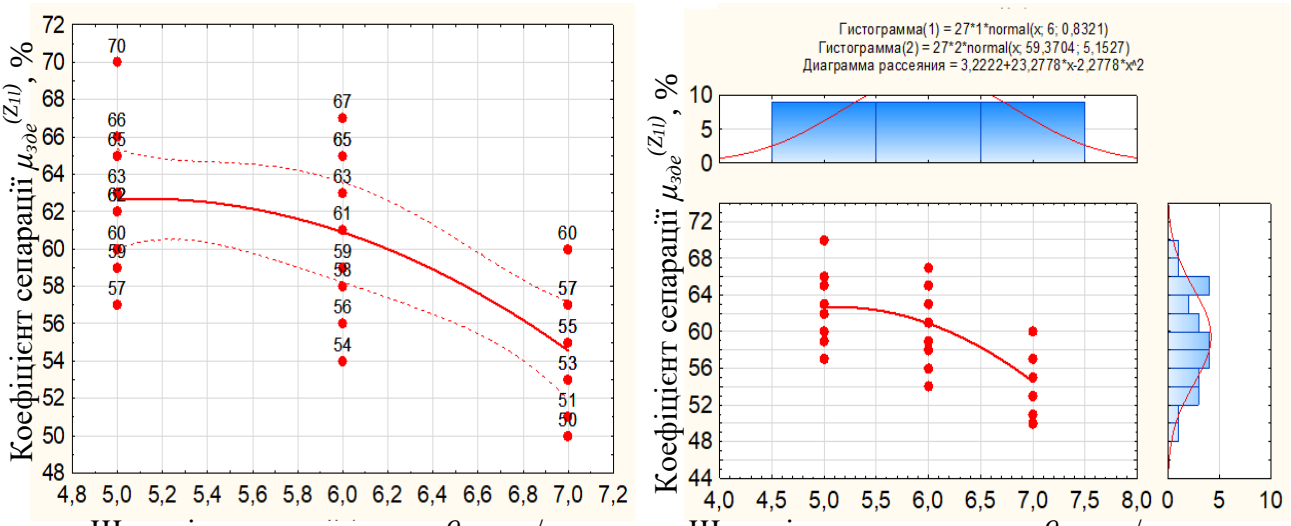
Итоги регрессии для зависимой переменной: Пер1 (Дані_ дальність польоту)
R= ,92403737 R2= ,85384507 Скоррект. R2= ,76615211
F(3,5)=9,7368 p<,01574 Станд. ошибка оценки: 4,1879

| N=9 | БЕТА | Ст.Ош. БЕТА | B | Ст.Ош. B | t(5) | p-знач. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Св.член** | | | 60,002 | 6,54784 | 9,16367 | 0,000259 |
| Пер3 | -0,68051 | 0,592271 | -29,188 | 25,40291 | -1,14899 | 0,302540 |
| Пер4 | -3,08908 | 1,006564 | -137,021 | 44,64765 | -3,06894 | 0,027817 |
| Пер5 | 2,95085 | 1,192408 | 118,740 | 47,98150 | 2,47470 | 0,056205 |

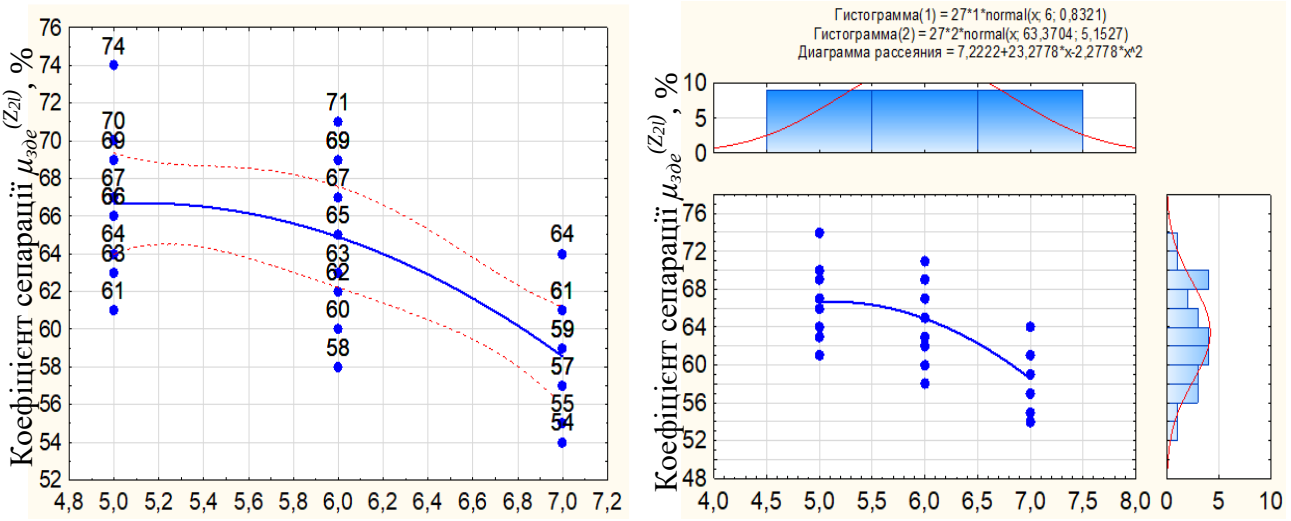
Итоги регрессии для зависимой переменной: Пер1 (Дані_ дальні...

Додаток Ж.4.1

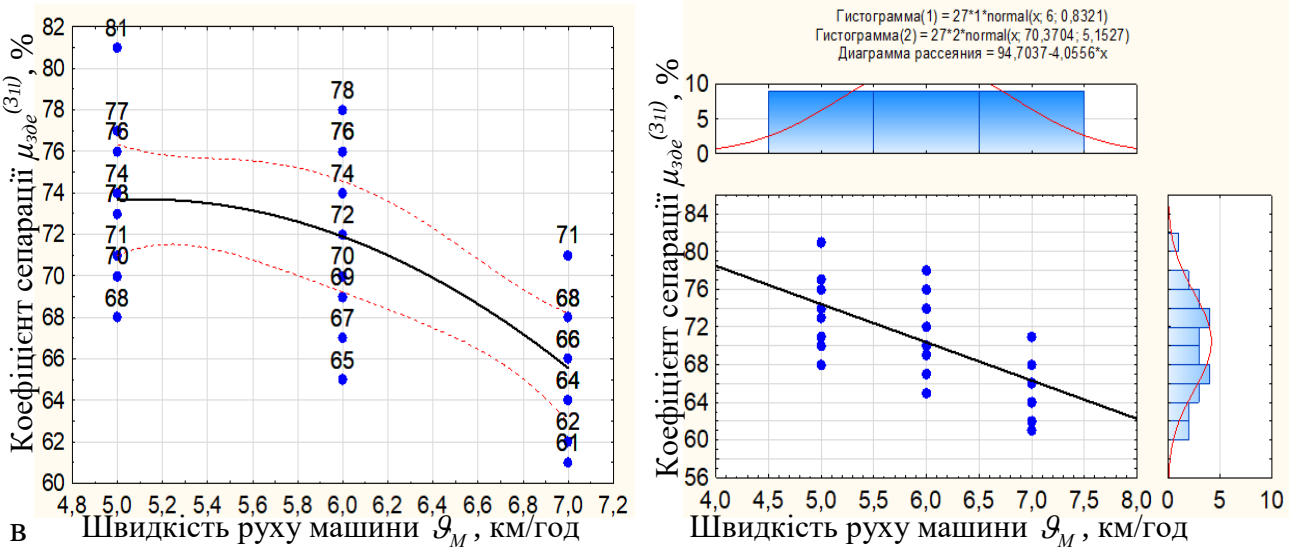
Діаграма розсіювання експериментальних даних зміни коефіцієнта сепарації $\mu_{зде}^{(Z_{1l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{2l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ загальних домішок ділянки $l_1$, $l_2$, $l_3$ похилого транспортера як функція а – $\mu_{зде}^{(Z_{1l})} = f_\mu(\vartheta_M)$; б – $\mu_{зде}^{(Z_{2l})} = f_\mu(\vartheta_M)$; в – $\mu_{зде}^{(Z_{3l})} = f_\mu(\vartheta_M)$




а



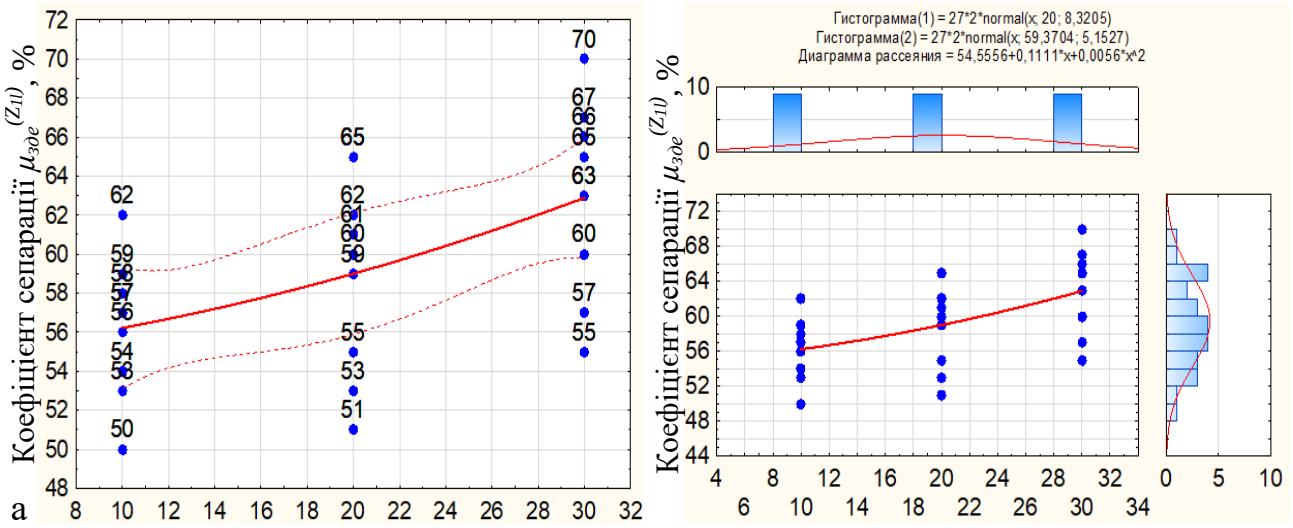

б



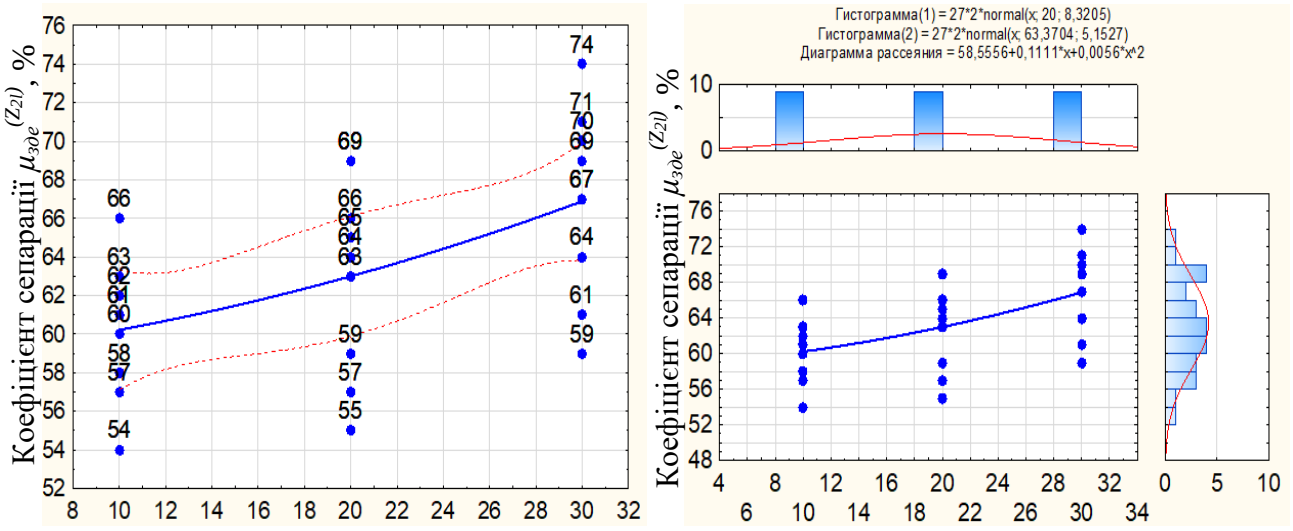

в

Додаток Ж.5.1

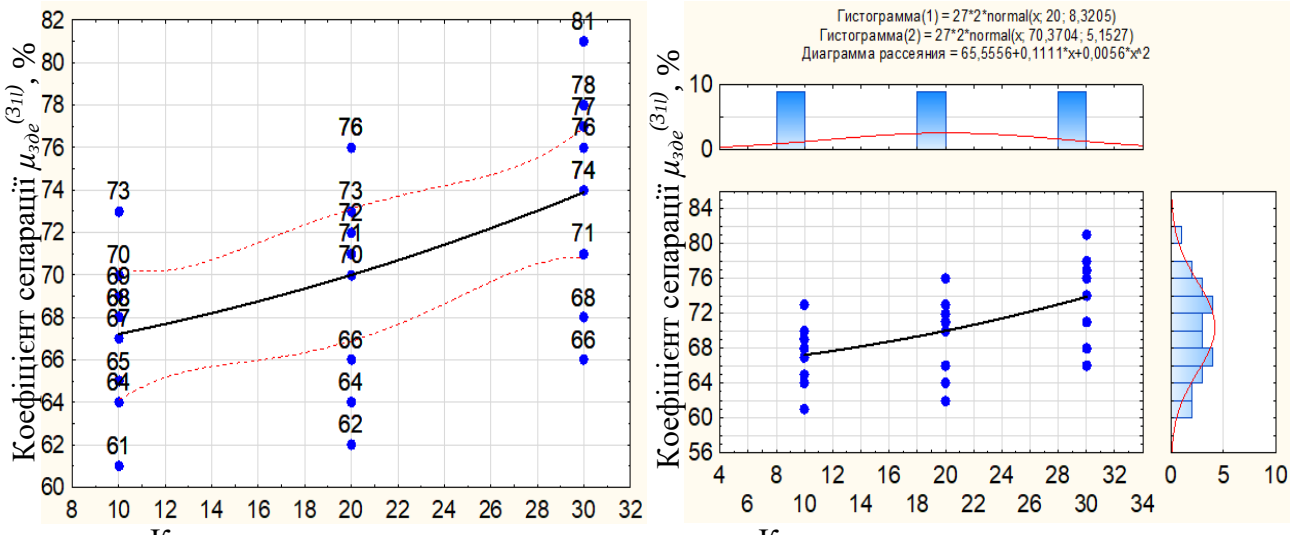
Діаграма розсіювання експериментальних даних зміни коефіцієнта сепарації $\mu_{зде}^{(Z_{1l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{2l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ загальних домішок ділянки $l_1$, $l_2$, $l_3$ похилого транспортера як функція а – $\mu_{зде}^{(Z_{1l})} = f_\mu(\varepsilon)$; б – $\mu_{зде}^{(Z_{2l})} = f_\mu(\varepsilon)$; в – $\mu_{зде}^{(Z_{3l})} = f_\mu(\varepsilon)$




а



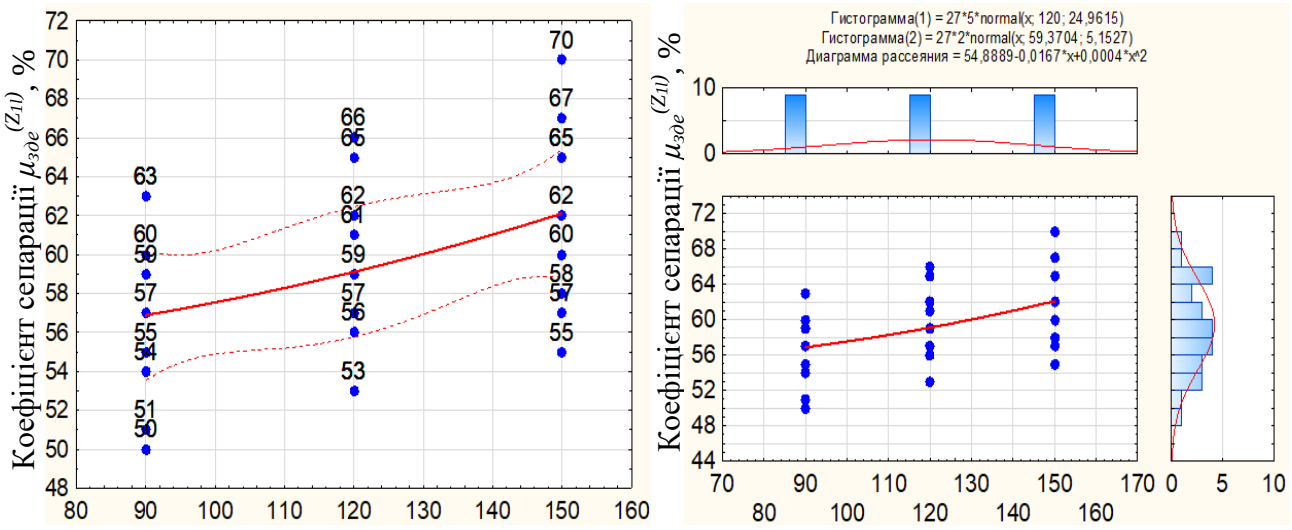

б



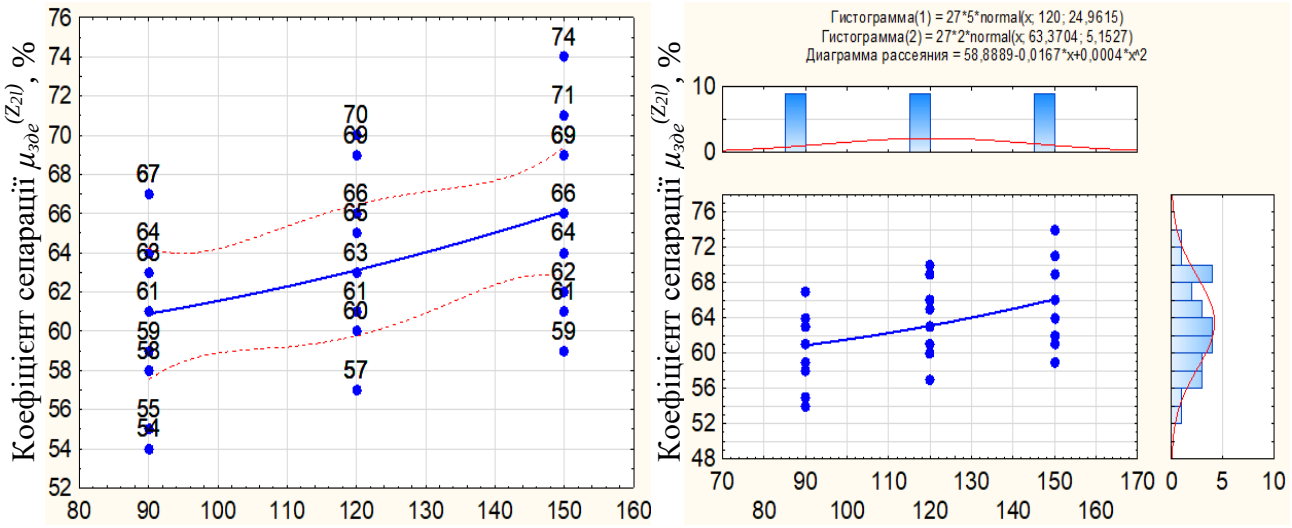

в

Додаток Ж.6.1

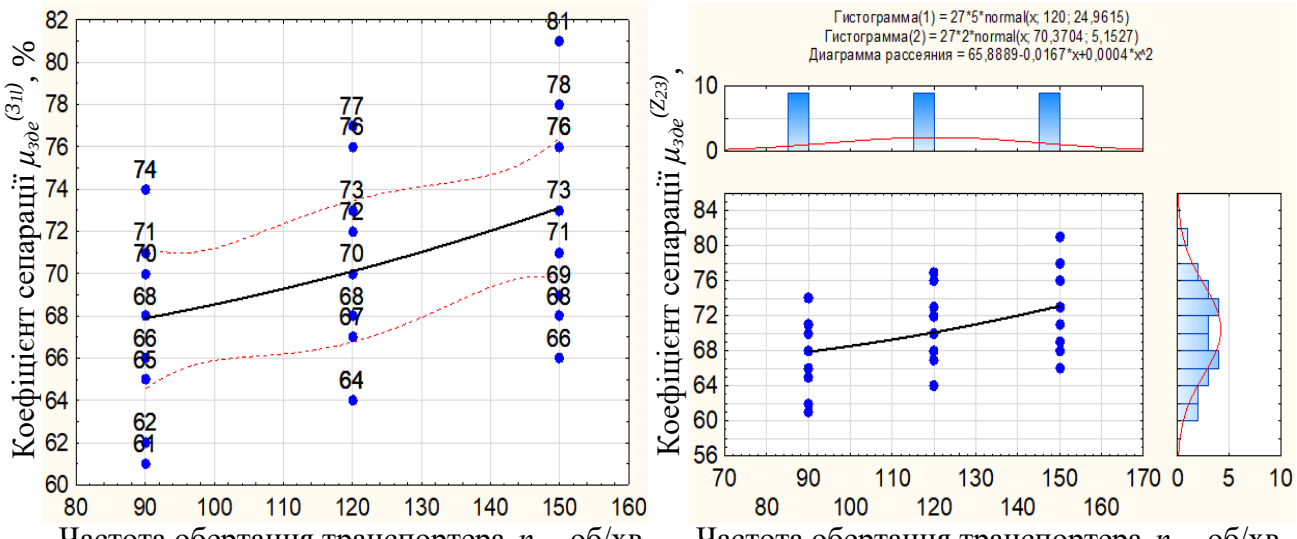
Діаграма розсіювання експериментальних даних зміни коефіцієнта сепарації $\mu_{зде}^{(Z_{1l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{2l})}$, $\mu_{зде}^{(Z_{3l})}$ загальних домішок кожної ділянки $l_1$, $l_2$, $l_3$ похилого транспортера як функція а – $\mu_{зде}^{(Z_{1l})} = f_\mu(n_m)$; б – $\mu_{зде}^{(Z_{2l})} = f_\mu(n_m)$; в – $\mu_{зде}^{(Z_{3l})} = f_\mu(n_m)$




а




б




в

Додаток Ж.7.2

Масив експериментальних даних польових досліджень ОТТМ під час збирання кормових буряків

Данные: Дані_ кормові_вал (19v * 28c)

| | 1 Фак1 | 2 Фак2 | 3 Фак3 | 4 Фак4 | 5 Фак5 | 6 Фак6 | 7 Фак7 | 8 Фак8 | 9 Фак9 | 10 Фак10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 7 | 200 | 500 | 22 | 6,4 | 6 | 0,5 | 0,4 | 15,8 | 17,7 |
| 2 | 7 | 100 | 500 | 22 | 8,1 | 7,7 | 0,6 | 0,5 | 10,3 | 12,4 |
| 3 | 5 | 200 | 500 | 22 | 4,8 | 4,4 | 0,9 | 0,8 | 13,6 | 11,7 |
| 4 | 5 | 100 | 500 | 22 | 7,4 | 7,3 | 1 | 0,9 | 8,4 | 10,5 |
| 5 | 6 | 150 | 700 | 26 | 6,4 | 6 | 1,1 | 1 | 12,8 | 14,9 |
| 6 | 6 | 150 | 700 | 18 | 5,9 | 5,3 | 1,3 | 1,2 | 12,5 | 14,7 |
| 7 | 6 | 150 | 300 | 26 | 9,8 | 9,2 | 1,5 | 1,4 | 12,4 | 14,6 |
| 8 | 6 | 150 | 300 | 18 | 9,1 | 8,6 | 1,6 | 1,5 | 14,4 | 16,6 |
| 9 | 6 | 150 | 500 | 22 | 4,2 | 3,8 | 0,6 | 0,5 | 12,5 | 14,7 |
| 10 | 7 | 150 | 300 | 26 | 11,6 | 11,1 | 1,3 | 1,2 | 13,6 | 15,8 |
| 11 | 7 | 150 | 300 | 18 | 11,2 | 10,7 | 1,4 | 1,3 | 15,4 | 17,9 |
| 12 | 5 | 150 | 300 | 26 | 8,1 | 7,6 | 1,7 | 1,6 | 11,6 | 13,8 |
| 13 | 5 | 150 | 300 | 18 | 7,8 | 7,3 | 1,8 | 1,7 | 11,6 | 13,7 |
| 14 | 6 | 200 | 700 | 22 | 4,6 | 4,2 | 0,5 | 0,4 | 15 | 17,2 |
| 15 | 6 | 200 | 300 | 22 | 5 | 4,6 | 1 | 0,9 | 15 | 17,1 |
| 16 | 6 | 100 | 700 | 22 | 6,8 | 6,1 | 0,8 | 0,7 | 10,3 | 12,5 |
| 17 | 6 | 100 | 300 | 22 | 8,1 | 7,6 | 1,2 | 1,1 | 10,3 | 12,4 |
| 18 | 6 | 150 | 500 | 22 | 4,2 | 4,8 | 0,6 | 0,5 | 12,5 | 16,7 |
| 19 | 7 | 150 | 700 | 22 | 4,8 | 4,3 | 0,5 | 0,3 | 13,8 | 17,9 |
| 20 | 7 | 150 | 300 | 22 | 7,3 | 6,8 | 0,9 | 0,7 | 13,7 | 17,8 |
| 21 | 5 | 150 | 700 | 22 | 3,8 | 3,4 | 0,8 | 0,7 | 11,6 | 13,8 |
| 22 | 5 | 150 | 300 | 22 | 5,1 | 4,6 | 1,2 | 1,1 | 11,5 | 13,7 |
| 23 | 6 | 200 | 500 | 26 | 10,3 | 9,9 | 1,3 | 1,2 | 15 | 17,2 |
| 24 | 6 | 200 | 500 | 18 | 9,6 | 9,1 | 1,4 | 1,3 | 16,8 | 18,9 |
| 25 | 6 | 100 | 500 | 26 | 10,8 | 10,3 | 1,5 | 1,4 | 10,3 | 12,4 |
| 26 | 6 | 100 | 500 | 18 | 10,2 | 9,8 | 1,6 | 1,5 | 11,4 | 15,2 |
| 27 | 6 | 150 | 500 | 22 | 4,2 | 3,8 | 0,6 | 0,5 | 12,5 | 14,7 |

Фак1 – швидкість руху коренезбиральної машини $V_M$, км/год.

Фак2 – частота обертання шнека $n_ш$, об/хв.

Фак3 – частота обертання очисних елементів $n_e$, об/хв.

Фак4 – вологість грунту $w_\rho$, %.

Фак5 – загальні домішки (шнеки круглого перерізу) $ЗД_{кц}$, %.

Фак6 – загальні домішки (еліпсні шнеки) $ЗД_{ец}$, %.

Фак7 – налиплий грунт (шнеки круглого перерізу) $НГ_{кц}$, %.

Фак8 – налиплий грунт (еліпсні шнеки) $НГ_{ец}$, %.

Фак9 – пошкодження коренеплодів (шнеки круглого перерізу) $ПК_{кц}$, %.

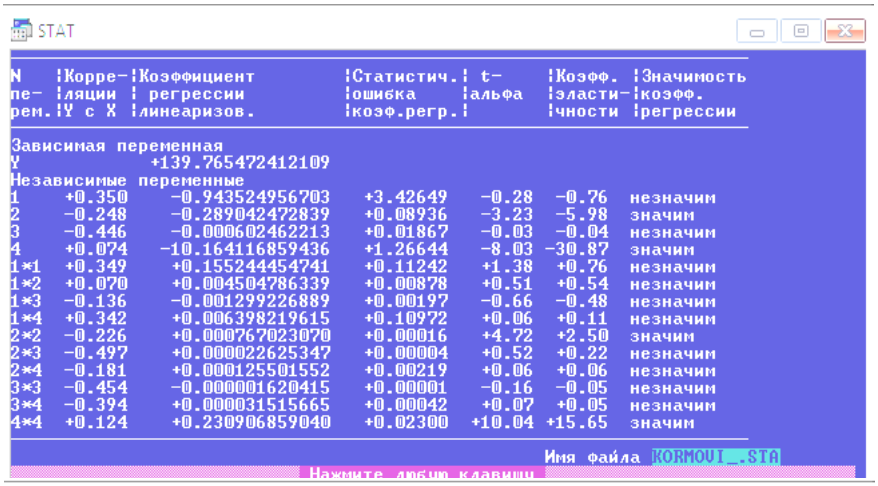
Фак10 – пошкодження коренеплодів (еліпсні шнеки) $ПК_{ец}$, %.

Додаток Ж.8.2

Результати статистичних розрахунків експериментального масиву даних з визначення показників якості роботи ОТТМ під час збирання кормових буряків

Загальні домішки:

- шнеки круглого перерізу;

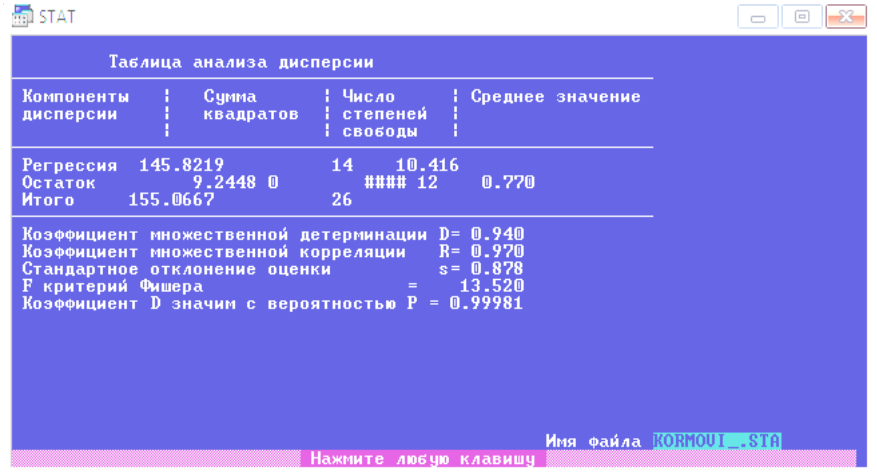


STAT

| N пе- рем. | Корре- ляции Y с X | Коэффициент регрессии линеаризов. | Статистич. ошибка коэф.регр. | t- альфа | Коэфф. эласти- чности | Значимость коэфф. регрессии |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Зависимая переменная | | | | | | |
| Y | | +139.765472412109 | | | | |
| Независимые переменные | | | | | | |
| 1 | +0.350 | -0.943524956703 | +3.42649 | -0.28 | -0.76 | незначим |
| 2 | -0.248 | -0.289042472839 | +0.08936 | -3.23 | -5.98 | значим |
| 3 | -0.446 | -0.000602462213 | +0.01867 | -0.03 | -0.04 | незначим |
| 4 | +0.074 | -10.164116859436 | +1.26644 | -8.03 | -30.87 | значим |
| 1*1 | +0.349 | +0.155244454741 | +0.11242 | +1.38 | +0.76 | незначим |
| 1*2 | +0.070 | +0.004504786339 | +0.00878 | +0.51 | +0.54 | незначим |
| 1*3 | -0.136 | -0.001299226889 | +0.00197 | -0.66 | -0.48 | незначим |
| 1*4 | +0.342 | +0.006398219615 | +0.10972 | +0.06 | +0.11 | незначим |
| 2*2 | -0.226 | +0.000767023070 | +0.00016 | +4.72 | +2.50 | значим |
| 2*3 | -0.497 | +0.000022625347 | +0.00004 | +0.52 | +0.22 | незначим |
| 2*4 | -0.181 | +0.000125501552 | +0.00219 | +0.06 | +0.06 | незначим |
| 3*3 | -0.454 | -0.000001620415 | +0.00001 | -0.16 | -0.05 | незначим |
| 3*4 | -0.394 | +0.000031515665 | +0.00042 | +0.07 | +0.05 | незначим |
| 4*4 | +0.124 | +0.230906859040 | +0.02300 | +10.04 | +15.65 | значим |

Имя файла KORMOVI_.STA

Нажмите любую клавишу



STAT

Таблица анализа дисперсии

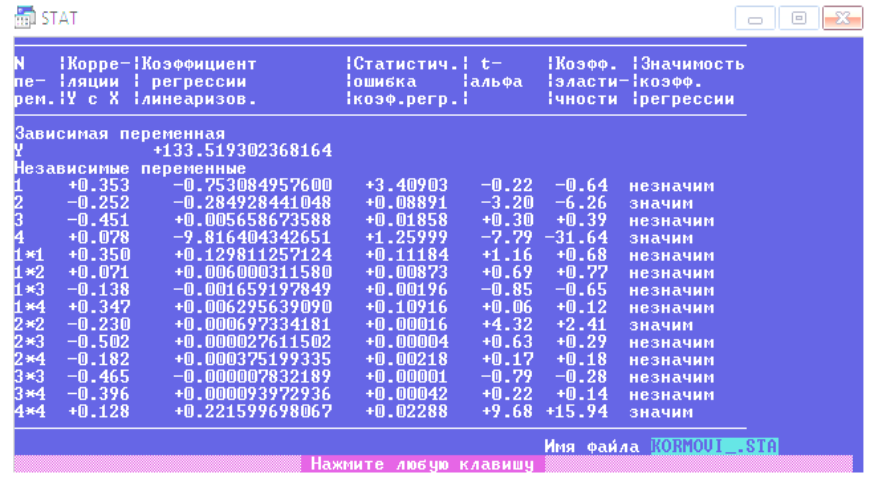
| Компоненты дисперсии | Сумма квадратов | Число степеней свободы | Среднее значение |
|---|---|---|---|
| Регрессия | 145.8219 | 14 | 10.416 |
| Остаток | 9.2448 0 | #### 12 | 0.770 |
| Итого | 155.0667 | 26 | |

Коэффициент множественной детерминации D= 0.940
Коэффициент множественной корреляции R= 0.970
Стандартное отклонение оценки s= 0.878
F критерий Фишера = 13.520
Коэффициент D значим с вероятностью P = 0.99981

Имя файла KORMOVI_.STA

Нажмите любую клавишу

- еліпсні шнеки.

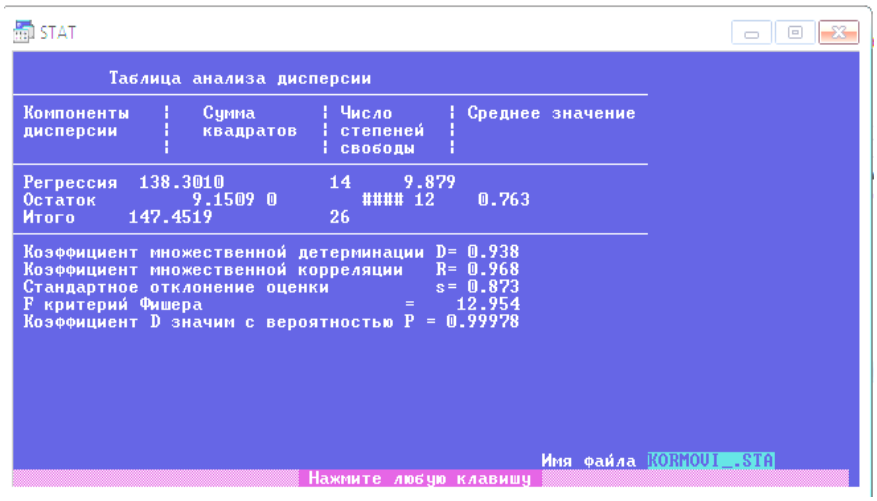


STAT

| N пе- рем. | Корре- ляции Y с X | Коэффициент регрессии линеаризов. | Статистич. ошибка коэф.регр. | t- альфа | Коэфф. эласти- чности | Значимость коэфф. регрессии |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Зависимая переменная | | | | | | |
| Y | | +133.519302368164 | | | | |
| Независимые переменные | | | | | | |
| 1 | +0.353 | -0.753084957600 | +3.40903 | -0.22 | -0.64 | незначим |
| 2 | -0.252 | -0.284928441048 | +0.08891 | -3.20 | -6.26 | значим |
| 3 | -0.451 | +0.005658673588 | +0.01858 | +0.30 | +0.39 | незначим |
| 4 | +0.078 | -9.816404342651 | +1.25999 | -7.79 | -31.64 | значим |
| 1*1 | +0.350 | +0.129811257124 | +0.11184 | +1.16 | +0.68 | незначим |
| 1*2 | +0.071 | +0.006000311580 | +0.00873 | +0.69 | +0.77 | незначим |
| 1*3 | -0.138 | -0.001659197849 | +0.00196 | -0.85 | -0.65 | незначим |
| 1*4 | +0.347 | +0.006295639090 | +0.10916 | +0.06 | +0.12 | незначим |
| 2*2 | -0.230 | +0.000697334181 | +0.00016 | +4.32 | +2.41 | значим |
| 2*3 | -0.502 | +0.000027611502 | +0.00004 | +0.63 | +0.29 | незначим |
| 2*4 | -0.182 | +0.000375199335 | +0.00218 | +0.17 | +0.18 | незначим |
| 3*3 | -0.465 | -0.000007832189 | +0.00001 | -0.79 | -0.28 | незначим |
| 3*4 | -0.396 | +0.000093972936 | +0.00042 | +0.22 | +0.14 | незначим |
| 4*4 | +0.128 | +0.221599698067 | +0.02288 | +9.68 | +15.94 | значим |

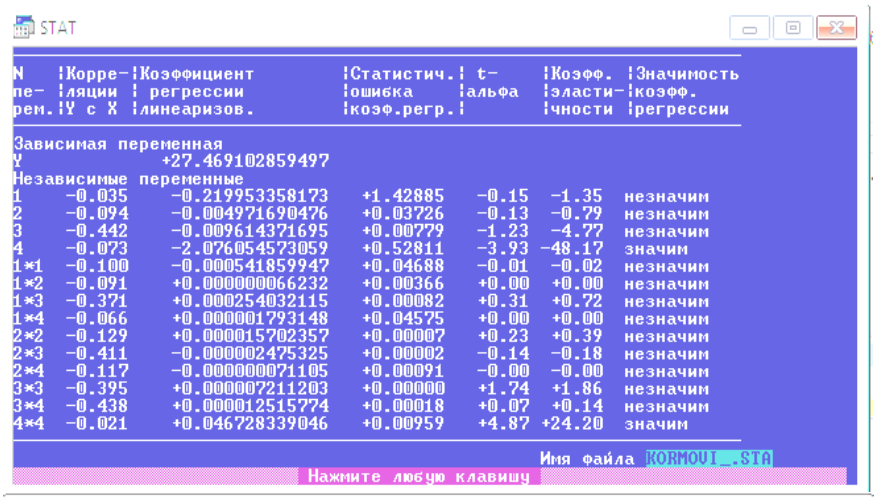
Имя файла KORMOVI_.STA

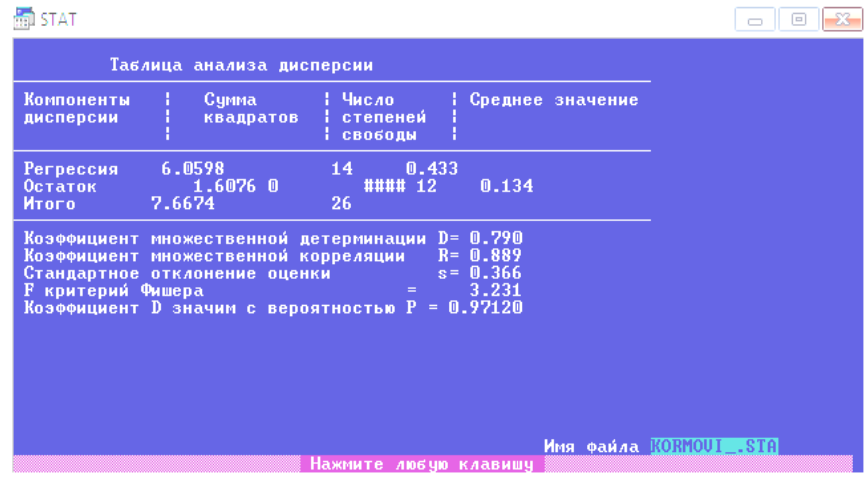
Нажмите любую клавишу

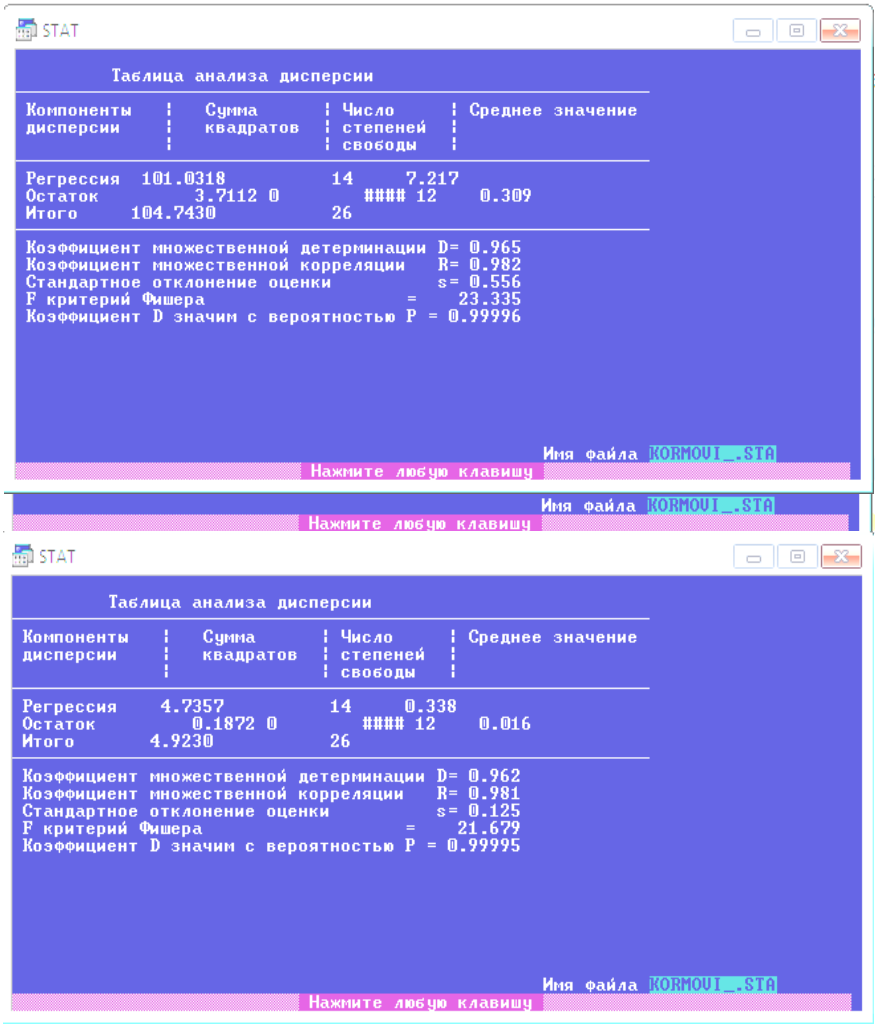



Налиплий грунт на коренеплодах:

- шнеки круглого перерізу;



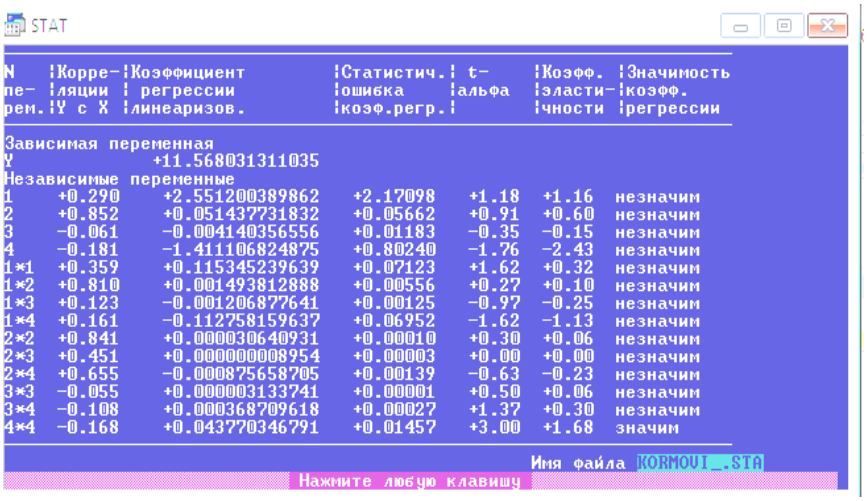





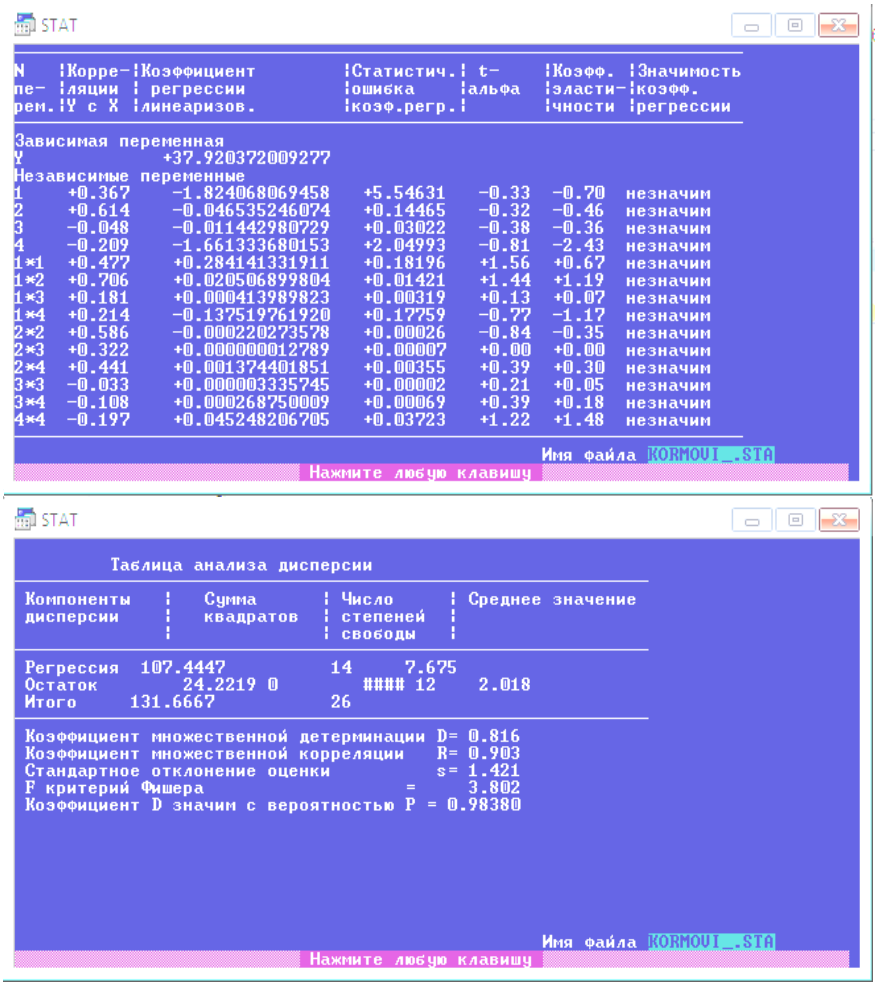

- еліпсні шнеки.

Пошкодження коренеплодів:

- шнеки круглого перерізу;



- еліпсні шнеки.



STAT

| N пе- рем. | Корре- ляции Y с X | Коэффициент регрессии линеаризов. | Статистич. ошибка коэф.регр. | t- альфа | Коэфф. эласти- чности | Значимость коэфф. регрессии |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Зависимая переменная | | | | | | |
| Y | | +37.920372009277 | | | | |
| Независимые переменные | | | | | | |
| 1 | +0.367 | -1.8240680694 58 | +5.54631 | -0.33 | -0.70 | незначим |
| 2 | +0.614 | -0.0465352460 74 | +0.14465 | -0.32 | -0.46 | незначим |
| 3 | -0.048 | -0.0114429807 29 | +0.03022 | -0.38 | -0.36 | незначим |
| 4 | -0.209 | -1.6613336801 53 | +2.04993 | -0.81 | -2.43 | незначим |
| 1*1 | +0.477 | +0.2841413319 11 | +0.18196 | +1.56 | +0.67 | незначим |
| 1*2 | +0.706 | +0.0205068998 04 | +0.01421 | +1.44 | +1.19 | незначим |
| 1*3 | +0.181 | +0.0004139898 23 | +0.00319 | +0.13 | +0.07 | незначим |
| 1*4 | +0.214 | -0.1375197619 20 | +0.17759 | -0.77 | -1.17 | незначим |
| 2*2 | +0.586 | -0.0002202735 78 | +0.00026 | -0.84 | -0.35 | незначим |
| 2*3 | +0.322 | +0.0000000127 89 | +0.00007 | +0.00 | +0.00 | незначим |
| 2*4 | +0.441 | +0.0013744018 51 | +0.00355 | +0.39 | +0.30 | незначим |
| 3*3 | -0.033 | +0.0000033357 45 | +0.00002 | +0.21 | +0.05 | незначим |
| 3*4 | -0.108 | +0.0002687500 09 | +0.00069 | +0.39 | +0.18 | незначим |
| 4*4 | -0.197 | +0.0452482067 05 | +0.03723 | +1.22 | +1.48 | незначим |

Имя файла KORMOUI_.STA

Нажмите любую клавишу



STAT

Таблица анализа дисперсии

| Компоненты дисперсии | Сумма квадратов | Число степеней свободы | Среднее значение |
|---|---|---|---|
| Регрессия | 107.4447 | 14 | 7.675 |
| Остаток | 24.2219 0 | #### 12 | 2.018 |
| Итого | 131.6667 | 26 | |

Коэффициент множественной детерминации D= 0.816
Коэффициент множественной корреляции R= 0.903
Стандартное отклонение оценки s= 1.421
F критерий Фишера = 3.802
Коэффициент D значим с вероятностью P = 0.98380

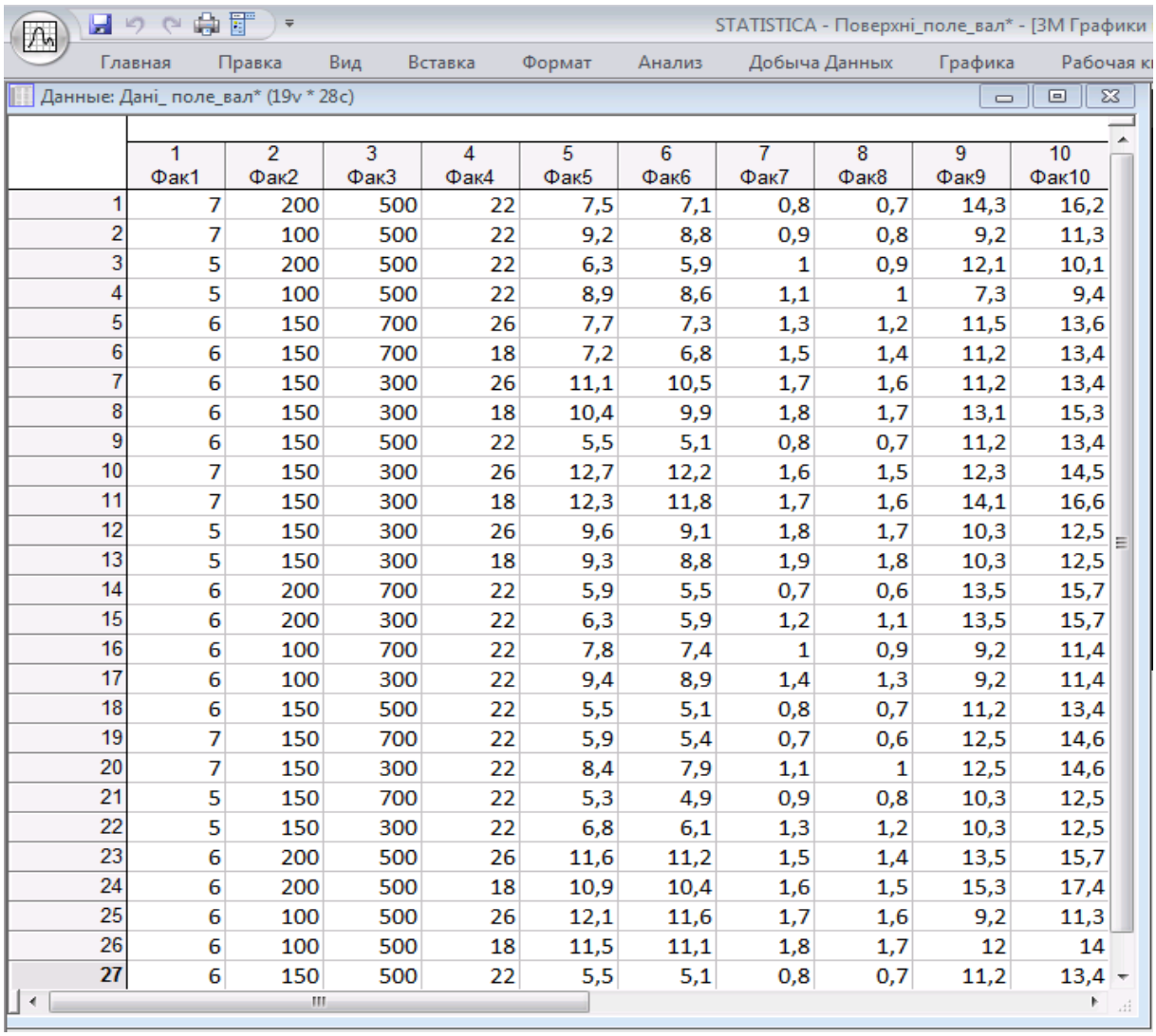
Имя файла KORMOUI_.STA

Нажмите любую клавишу

Додаток Ж.9.2

Масив експериментальних даних польових досліджень ОТТМ

під час збирання цукрових буряків




| | 1 Фак1 | 2 Фак2 | 3 Фак3 | 4 Фак4 | 5 Фак5 | 6 Фак6 | 7 Фак7 | 8 Фак8 | 9 Фак9 | 10 Фак10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 7 | 200 | 500 | 22 | 7,5 | 7,1 | 0,8 | 0,7 | 14,3 | 16,2 |
| 2 | 7 | 100 | 500 | 22 | 9,2 | 8,8 | 0,9 | 0,8 | 9,2 | 11,3 |
| 3 | 5 | 200 | 500 | 22 | 6,3 | 5,9 | 1 | 0,9 | 12,1 | 10,1 |
| 4 | 5 | 100 | 500 | 22 | 8,9 | 8,6 | 1,1 | 1 | 7,3 | 9,4 |
| 5 | 6 | 150 | 700 | 26 | 7,7 | 7,3 | 1,3 | 1,2 | 11,5 | 13,6 |
| 6 | 6 | 150 | 700 | 18 | 7,2 | 6,8 | 1,5 | 1,4 | 11,2 | 13,4 |
| 7 | 6 | 150 | 300 | 26 | 11,1 | 10,5 | 1,7 | 1,6 | 11,2 | 13,4 |
| 8 | 6 | 150 | 300 | 18 | 10,4 | 9,9 | 1,8 | 1,7 | 13,1 | 15,3 |
| 9 | 6 | 150 | 500 | 22 | 5,5 | 5,1 | 0,8 | 0,7 | 11,2 | 13,4 |
| 10 | 7 | 150 | 300 | 26 | 12,7 | 12,2 | 1,6 | 1,5 | 12,3 | 14,5 |
| 11 | 7 | 150 | 300 | 18 | 12,3 | 11,8 | 1,7 | 1,6 | 14,1 | 16,6 |
| 12 | 5 | 150 | 300 | 26 | 9,6 | 9,1 | 1,8 | 1,7 | 10,3 | 12,5 |
| 13 | 5 | 150 | 300 | 18 | 9,3 | 8,8 | 1,9 | 1,8 | 10,3 | 12,5 |
| 14 | 6 | 200 | 700 | 22 | 5,9 | 5,5 | 0,7 | 0,6 | 13,5 | 15,7 |
| 15 | 6 | 200 | 300 | 22 | 6,3 | 5,9 | 1,2 | 1,1 | 13,5 | 15,7 |
| 16 | 6 | 100 | 700 | 22 | 7,8 | 7,4 | 1 | 0,9 | 9,2 | 11,4 |
| 17 | 6 | 100 | 300 | 22 | 9,4 | 8,9 | 1,4 | 1,3 | 9,2 | 11,4 |
| 18 | 6 | 150 | 500 | 22 | 5,5 | 5,1 | 0,8 | 0,7 | 11,2 | 13,4 |
| 19 | 7 | 150 | 700 | 22 | 5,9 | 5,4 | 0,7 | 0,6 | 12,5 | 14,6 |
| 20 | 7 | 150 | 300 | 22 | 8,4 | 7,9 | 1,1 | 1 | 12,5 | 14,6 |
| 21 | 5 | 150 | 700 | 22 | 5,3 | 4,9 | 0,9 | 0,8 | 10,3 | 12,5 |
| 22 | 5 | 150 | 300 | 22 | 6,8 | 6,1 | 1,3 | 1,2 | 10,3 | 12,5 |
| 23 | 6 | 200 | 500 | 26 | 11,6 | 11,2 | 1,5 | 1,4 | 13,5 | 15,7 |
| 24 | 6 | 200 | 500 | 18 | 10,9 | 10,4 | 1,6 | 1,5 | 15,3 | 17,4 |
| 25 | 6 | 100 | 500 | 26 | 12,1 | 11,6 | 1,7 | 1,6 | 9,2 | 11,3 |
| 26 | 6 | 100 | 500 | 18 | 11,5 | 11,1 | 1,8 | 1,7 | 12 | 14 |
| 27 | 6 | 150 | 500 | 22 | 5,5 | 5,1 | 0,8 | 0,7 | 11,2 | 13,4 |

Фак1 – швидкість руху коренезбиральної машини $V_M$, км/год.

Фак2 – частота обертання шнека $n_ш$, об/хв.

Фак3 – частота обертання очисних елементів $n_e$, об/хв.

Фак4 – вологість грунту $w_\rho$, %.

Фак5 – загальні домішки (шнеки круглого перерізу) $ЗД_{кц}$, %.

Фак6 – загальні домішки (еліпсні шнеки) $ЗД_{ец}$, %.

Фак7 – налиплий грунт (шнеки круглого перерізу) $НГ_{кц}$, %.

Фак8 – налиплий грунт (еліпсні шнеки) $НГ_{ец}$, %.

Фак9 – пошкодження коренеплодів (шнеки круглого перерізу) $ПК_{кц}$, %.

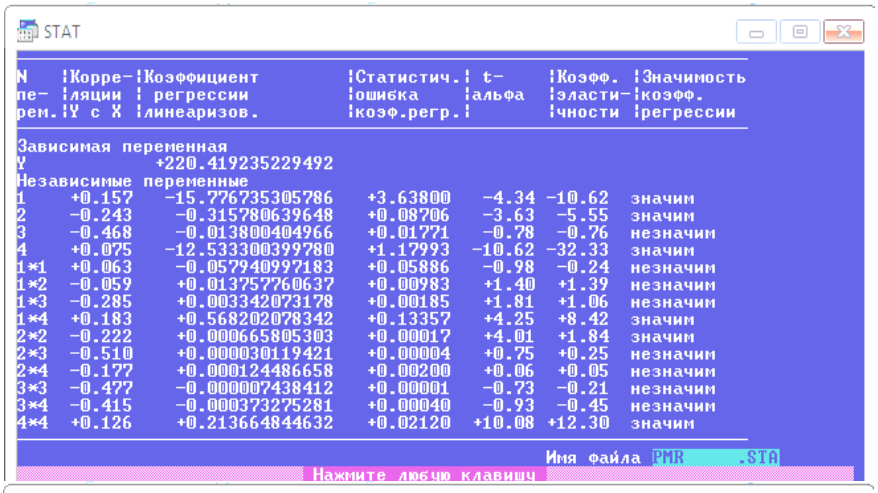
Фак10 – пошкодження коренеплодів (еліпсні шнеки) $ПК_{ец}$, %.

Додаток Ж.10.2

Результати статистичних розрахунків експериментального масиву даних з визначення показників якості роботи ОТТМ під час збирання цукрових буряків

Загальні домішки:

- шнеки круглого перерізу;

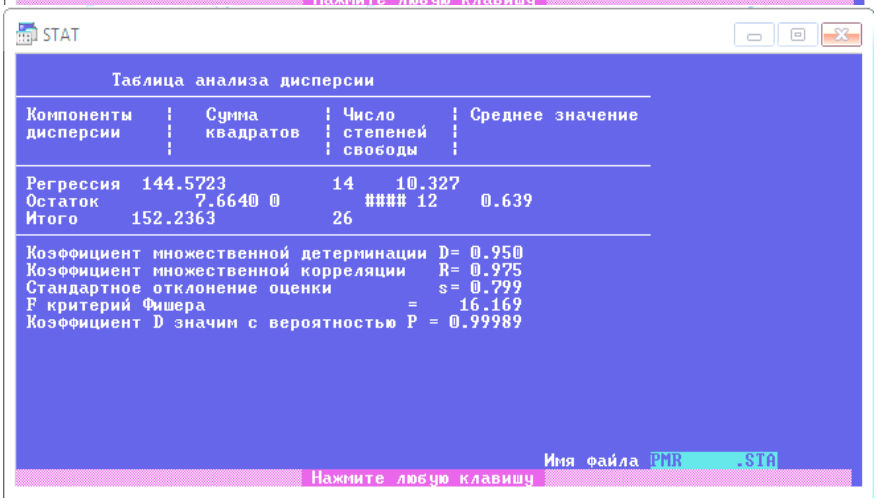


STAT

| N пе- рем. | Корре- ляции Y с X | Коэффициент регрессии линеаризов. | Статистич. ошибка коэф.регр. | t- альфа | Коэфф. эласти- чности | Значимость коэфф. регрессии |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Зависимая переменная | | | | | | |
| Y | | +220.419235229492 | | | | |
| Независимые переменные | | | | | | |
| 1 | +0.157 | -15.776735305786 | +3.63800 | -4.34 | -10.62 | значим |
| 2 | -0.243 | -0.315780639648 | +0.08706 | -3.63 | -5.55 | значим |
| 3 | -0.468 | -0.013800404966 | +0.01771 | -0.78 | -0.76 | незначим |
| 4 | +0.075 | -12.533300399780 | +1.17993 | -10.62 | -32.33 | значим |
| 1*1 | +0.063 | -0.057940997183 | +0.05886 | -0.98 | -0.24 | незначим |
| 1*2 | -0.059 | +0.013757760637 | +0.00983 | +1.40 | +1.39 | незначим |
| 1*3 | -0.285 | +0.003342073178 | +0.00185 | +1.81 | +1.06 | незначим |
| 1*4 | +0.183 | +0.568202078342 | +0.13357 | +4.25 | +8.42 | значим |
| 2*2 | -0.222 | +0.000665805303 | +0.00017 | +4.01 | +1.84 | значим |
| 2*3 | -0.510 | +0.000030119421 | +0.00004 | +0.75 | +0.25 | незначим |
| 2*4 | -0.177 | +0.000124486658 | +0.00200 | +0.06 | +0.05 | незначим |
| 3*3 | -0.477 | -0.000007438412 | +0.00001 | -0.73 | -0.21 | незначим |
| 3*4 | -0.415 | -0.000373275281 | +0.00040 | -0.93 | -0.45 | незначим |
| 4*4 | +0.126 | +0.213664844632 | +0.02120 | +10.08 | +12.30 | значим |

Имя файла PMR .STA

Нажмите любую клавишу



STAT

Таблица анализа дисперсии

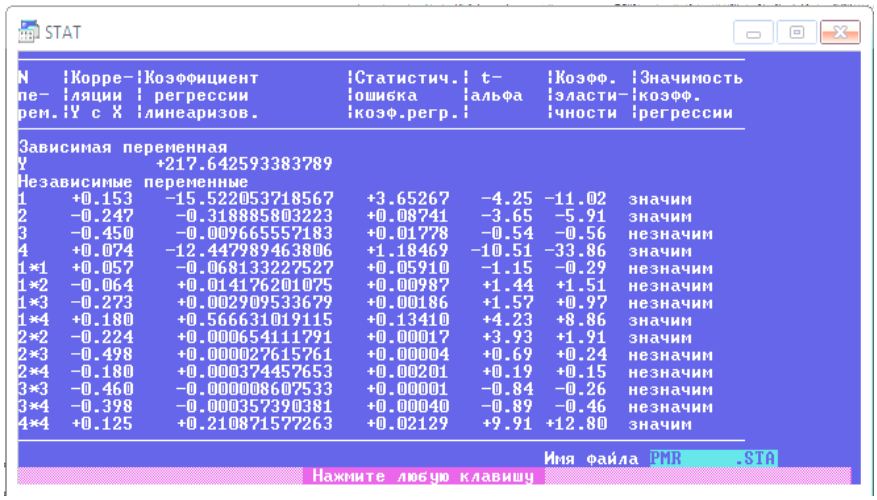
| Компоненты дисперсии | Сумма квадратов | Число степеней свободы | Среднее значение |
|---|---|---|---|
| Регрессия | 144.5723 | 14 | 10.327 |
| Остаток | 7.6640 0 | #### 12 | 0.639 |
| Итого | 152.2363 | 26 | |

Коэффициент множественной детерминации D= 0.950
Коэффициент множественной корреляции R= 0.975
Стандартное отклонение оценки s= 0.799
F критерий Фишера = 16.169
Коэффициент D значим с вероятностью P = 0.99989

Имя файла PMR .STA

Нажмите любую клавишу

- еліпсні шнеки.

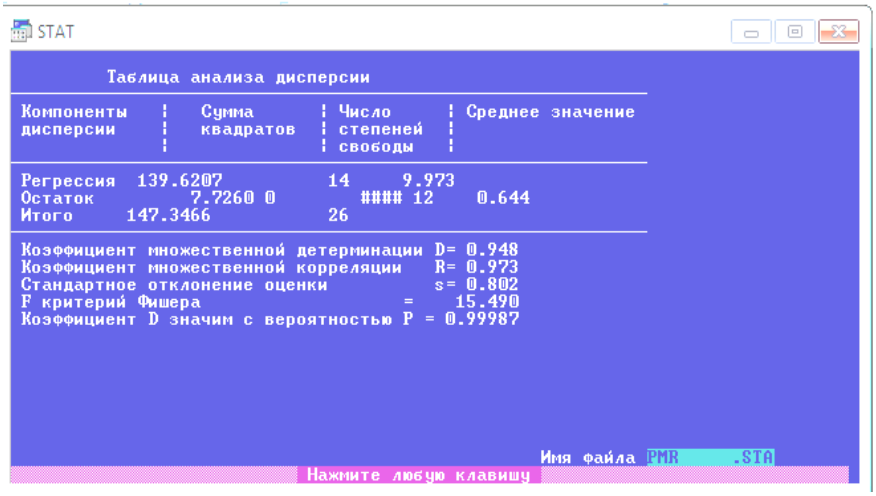


STAT

| N пе- рем. | Корре- ляции Y с X | Коэффициент регрессии линеаризов. | Статистич. ошибка коэф.регр. | t- альфа | Коэфф. эласти- чности | Значимость коэфф. регрессии |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Зависимая переменная | | | | | | |
| Y | | +217.642593383789 | | | | |
| Независимые переменные | | | | | | |
| 1 | +0.153 | -15.522053718567 | +3.65267 | -4.25 | -11.02 | значим |
| 2 | -0.247 | -0.318885803223 | +0.08741 | -3.65 | -5.91 | значим |
| 3 | -0.450 | -0.009665557183 | +0.01778 | -0.54 | -0.56 | незначим |
| 4 | +0.074 | -12.447989463806 | +1.18469 | -10.51 | -33.86 | значим |
| 1*1 | +0.057 | -0.068133227527 | +0.05910 | -1.15 | -0.29 | незначим |
| 1*2 | -0.064 | +0.014176201075 | +0.00987 | +1.44 | +1.51 | незначим |
| 1*3 | -0.273 | +0.002909533679 | +0.00186 | +1.57 | +0.97 | незначим |
| 1*4 | +0.180 | +0.566631019115 | +0.13410 | +4.23 | +8.86 | значим |
| 2*2 | -0.224 | +0.000654111791 | +0.00017 | +3.93 | +1.91 | значим |
| 2*3 | -0.498 | +0.000027615761 | +0.00004 | +0.69 | +0.24 | незначим |
| 2*4 | -0.180 | +0.000374457653 | +0.00201 | +0.19 | +0.15 | незначим |
| 3*3 | -0.460 | -0.000008607533 | +0.00001 | -0.84 | -0.26 | незначим |
| 3*4 | -0.398 | -0.000357390381 | +0.00040 | -0.89 | -0.46 | незначим |
| 4*4 | +0.125 | +0.210871577263 | +0.02129 | +9.91 | +12.80 | значим |

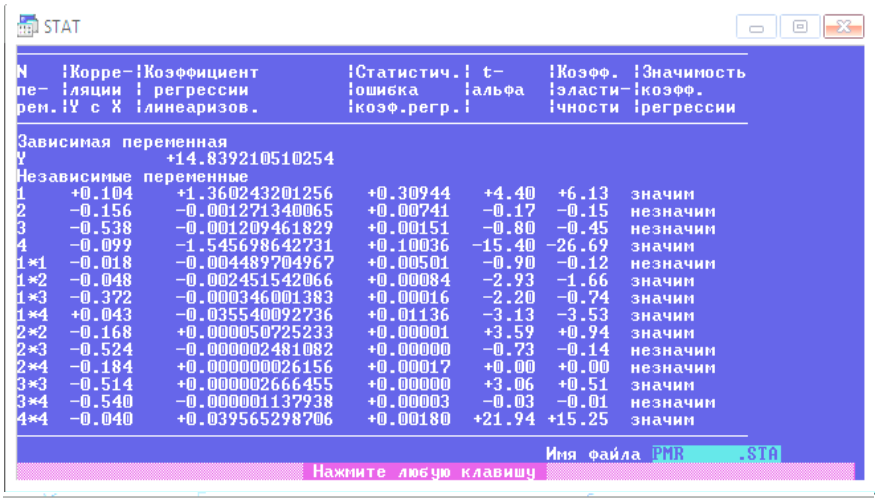
Имя файла PMR .STA

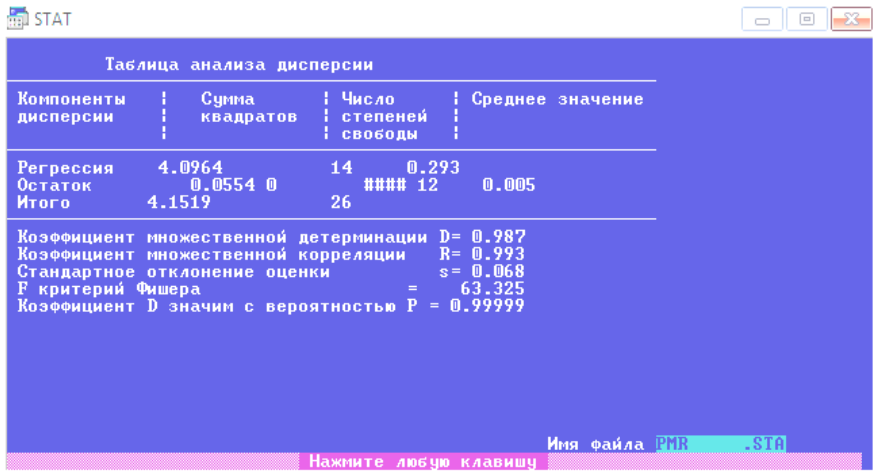
Нажмите любую клавишу



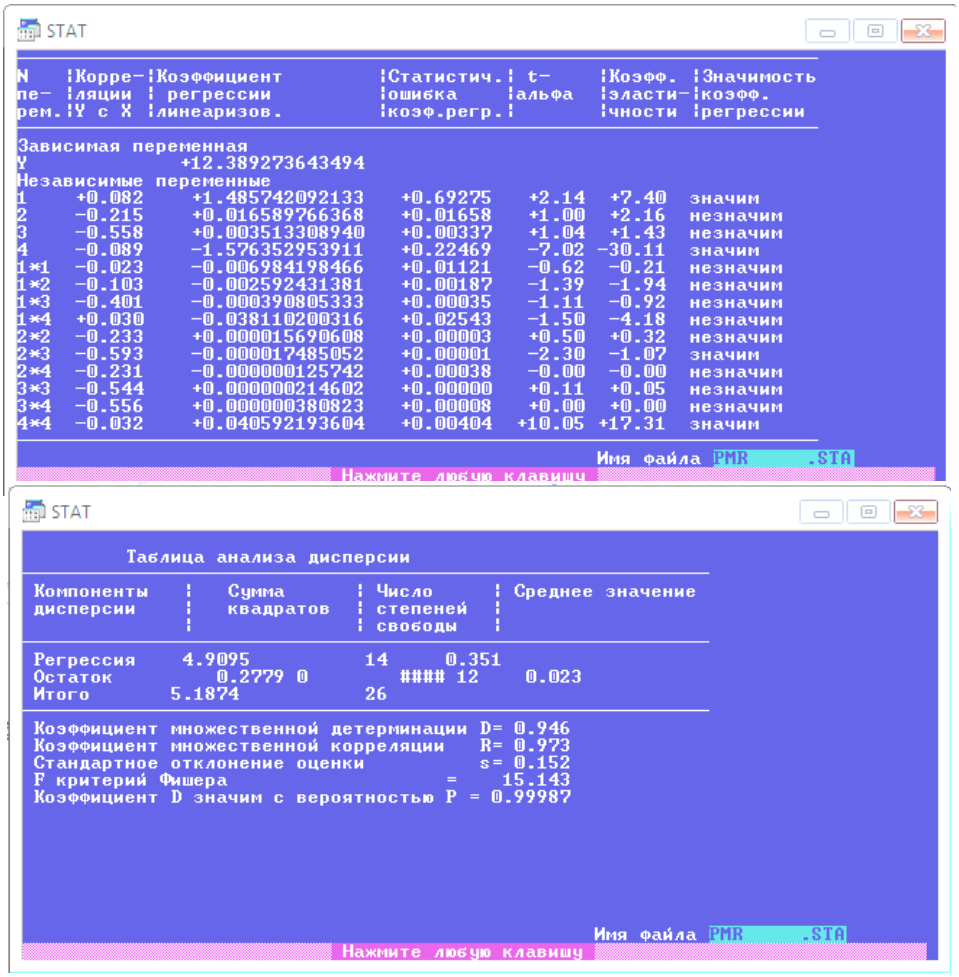

Налиплий грунт на коренеплодах

- шнеки круглого перерізу;



- еліпсні шнеки



STAT

| N пе- рем. | Корре- ляции Y с X | Коэффициент регрессии линеаризов. | Статистич. ошибка коэф.регр. | t- альфа | Коэфф. эласти- чности | Значимость коэфф. регрессии |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Зависимая переменная | | | | | | |
| Y | | +12.389273643494 | | | | |
| Независимые переменные | | | | | | |
| 1 | +0.082 | +1.485742092133 | +0.69275 | +2.14 | +7.40 | значим |
| 2 | -0.215 | +0.016589766368 | +0.01658 | +1.00 | +2.16 | незначим |
| 3 | -0.558 | +0.003513308940 | +0.00337 | +1.04 | +1.43 | незначим |
| 4 | -0.089 | -1.576352953911 | +0.22469 | -7.02 | -30.11 | значим |
| 1*1 | -0.023 | -0.006984198466 | +0.01121 | -0.62 | -0.21 | незначим |
| 1*2 | -0.103 | -0.002592431381 | +0.00187 | -1.39 | -1.94 | незначим |
| 1*3 | -0.401 | -0.000390805333 | +0.00035 | -1.11 | -0.92 | незначим |
| 1*4 | +0.030 | -0.038110200316 | +0.02543 | -1.50 | -4.18 | незначим |
| 2*2 | -0.233 | +0.000015690608 | +0.00003 | +0.50 | +0.32 | незначим |
| 2*3 | -0.593 | -0.000017485052 | +0.00001 | -2.30 | -1.07 | значим |
| 2*4 | -0.231 | -0.000000125742 | +0.00038 | -0.00 | -0.00 | незначим |
| 3*3 | -0.544 | +0.000000214602 | +0.00000 | +0.11 | +0.05 | незначим |
| 3*4 | -0.556 | +0.000000380823 | +0.00008 | +0.00 | +0.00 | незначим |
| 4*4 | -0.032 | +0.040592193604 | +0.00404 | +10.05 | +17.31 | значим |

Имя файла PMR .STA

Нажмите любую клавишу

STAT

Таблица анализа дисперсии

| Компоненты дисперсии | Сумма квадратов | Число степеней свободы | Среднее значение |
|---|---|---|---|
| Регрессия | 4.9095 | 14 | 0.351 |
| Остаток | 0.2779 0 | #### 12 | 0.023 |
| Итого | 5.1874 | 26 | |

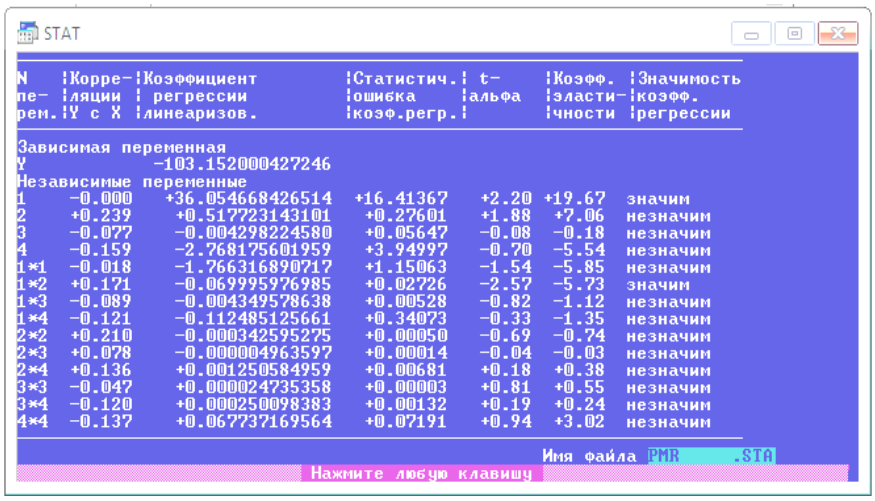
Коэффициент множественной детерминации D= 0.946
Коэффициент множественной корреляции R= 0.973
Стандартное отклонение оценки s= 0.152
F критерий Фишера = 15.143
Коэффициент D значим с вероятностью P = 0.99987

Имя файла PMR .STA

Нажмите любую клавишу

Пошкодження коренеплодів:

- шнеки круглого перерізу;

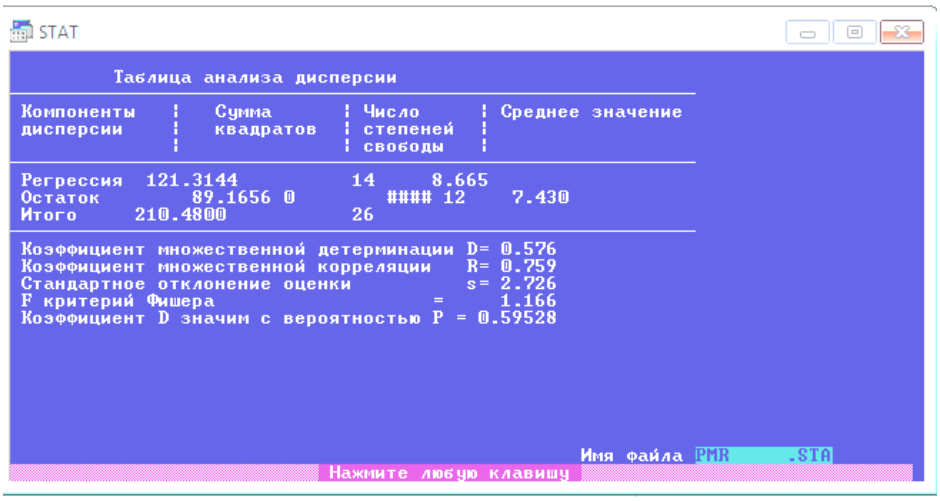


STAT

| N пе- рем. | Корре- ляции Y с X | Коэффициент регрессии линеаризов. | Статистич. ошибка коэф.регр. | t- альфа | Коэфф. эласти- чности | Значимость коэфф. регрессии |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Зависимая переменная | | | | | | |
| Y | | -103.152000427246 | | | | |
| Независимые переменные | | | | | | |
| 1 | -0.000 | +36.054668426514 | +16.41367 | +2.20 | +19.67 | значим |
| 2 | +0.239 | +0.517723143101 | +0.27601 | +1.88 | +7.06 | незначим |
| 3 | -0.077 | -0.004298224580 | +0.05647 | -0.08 | -0.18 | незначим |
| 4 | -0.159 | -2.768175601959 | +3.94997 | -0.70 | -5.54 | незначим |
| 1*1 | -0.018 | -1.766316890717 | +1.15063 | -1.54 | -5.85 | незначим |
| 1*2 | +0.171 | -0.069995976985 | +0.02726 | -2.57 | -5.73 | значим |
| 1*3 | -0.089 | -0.004349578638 | +0.00528 | -0.82 | -1.12 | незначим |
| 1*4 | -0.121 | -0.112485125661 | +0.34073 | -0.33 | -1.35 | незначим |
| 2*2 | +0.210 | -0.000342595275 | +0.00050 | -0.69 | -0.74 | незначим |
| 2*3 | +0.078 | -0.000004963597 | +0.00014 | -0.04 | -0.03 | незначим |
| 2*4 | +0.136 | +0.001250584959 | +0.00681 | +0.18 | +0.38 | незначим |
| 3*3 | -0.047 | +0.000024735358 | +0.00003 | +0.81 | +0.55 | незначим |
| 3*4 | -0.120 | +0.000250098383 | +0.00132 | +0.19 | +0.24 | незначим |
| 4*4 | -0.137 | +0.067737169564 | +0.07191 | +0.94 | +3.02 | незначим |

Имя файла PMR .STA

Нажмите любую клавишу




еліпсні шнеки.

Додаток Ж.11.2

Експериментальний масив даних польових досліджень ОТТМ під час збирання коренеплодів цикорію

Данные: Дані_ цикорій* (7v * 16c)

| | 1 Пер1 | 2 Пер2 | 3 Пер3 | 4 Пер4 | 5 Пер5 | 6 Пер6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 7 | 200 | 21 | 10,6 | 0,6 | 15,1 |
| 2 | 7 | 100 | 21 | 8,3 | 0,9 | 12,5 |
| 3 | 5 | 200 | 21 | 10,2 | 0,7 | 16,7 |
| 4 | 5 | 100 | 21 | 7,1 | 1,3 | 13,4 |
| 5 | 6 | 150 | 21 | 6,5 | 1 | 13,2 |
| 6 | 7 | 150 | 24 | 13,7 | 1,4 | 12,8 |
| 7 | 7 | 150 | 18 | 13,3 | 1,2 | 13 |
| 8 | 5 | 150 | 24 | 10,6 | 1,6 | 14,4 |
| 9 | 5 | 150 | 18 | 10,3 | 1,4 | 14,8 |
| 10 | 6 | 100 | 21 | 6,7 | 1 | 12,9 |
| 11 | 6 | 150 | 18 | 11,4 | 1,2 | 14,3 |
| 12 | 6 | 200 | 18 | 11,7 | 1 | 15,9 |
| 13 | 6 | 100 | 24 | 12,4 | 1,7 | 11,7 |
| 14 | 6 | 100 | 18 | 11,7 | 1,5 | 11,9 |
| 15 | 6 | 200 | 21 | 10,2 | 0,8 | 16 |

Пер1 – швидкість руху коренезбиральної машини $\vartheta_M$, км/год.

Пер2 – частота обертання шнекового конвеєра $n_{ш.к}$, об/хв.

Пер3 – вологість грунту $w_\rho$, %.

Пер4 – загальні домішки $ЗД_{цк}$, %.

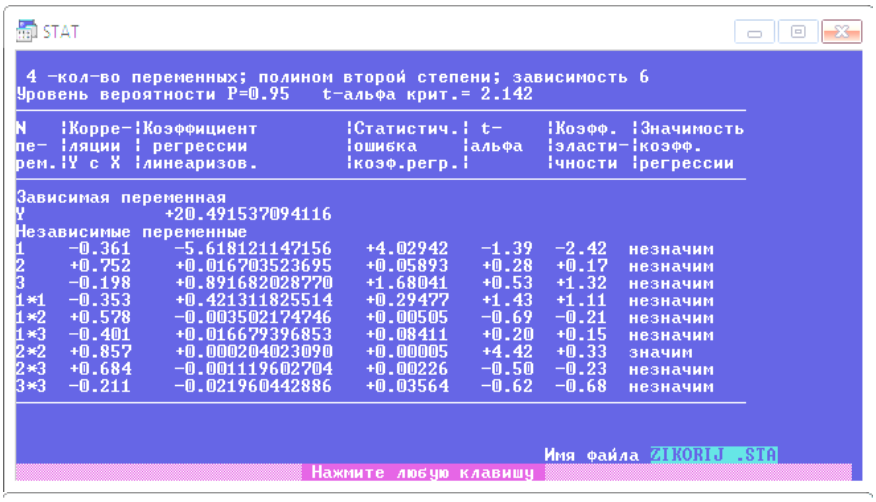
Пер5 – налиплий грунт на коренеплодах $НГ_{цк}$, %.

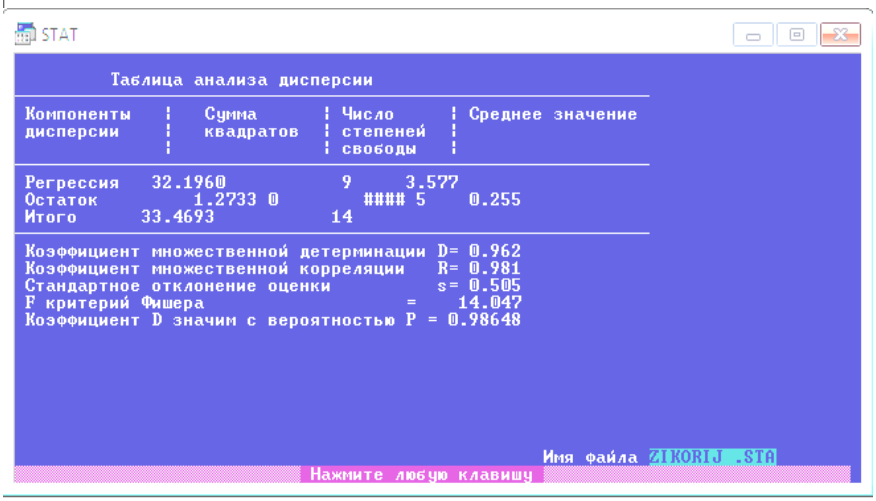
Пер6 – пошкодження коренеплодів $ПК_{цк}$, %.

Додаток Ж.12.2

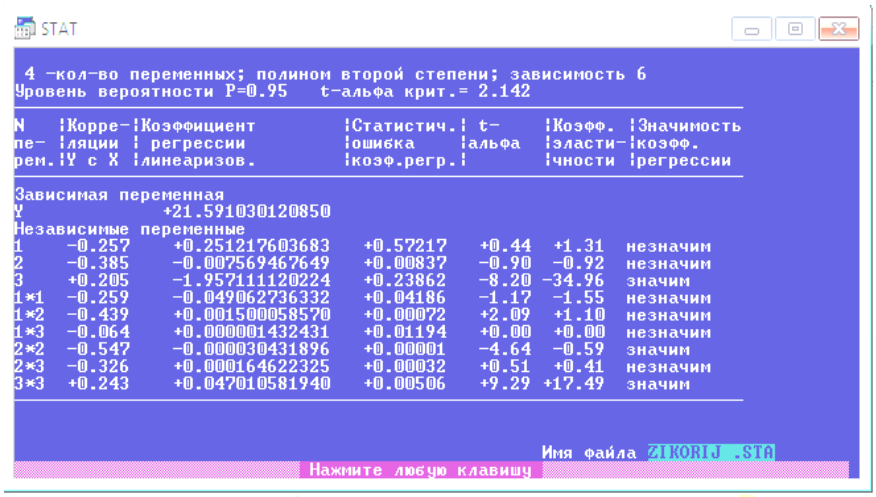
Результати статистичних розрахунків експериментального масиву даних з визначення показників якості роботи ОТТМ під час збирання коренеплодів цикорію

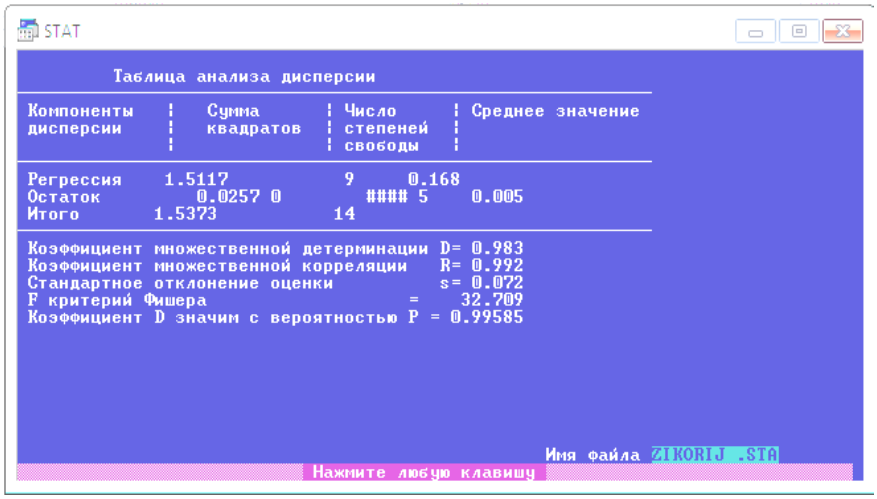
Загальні домішки.



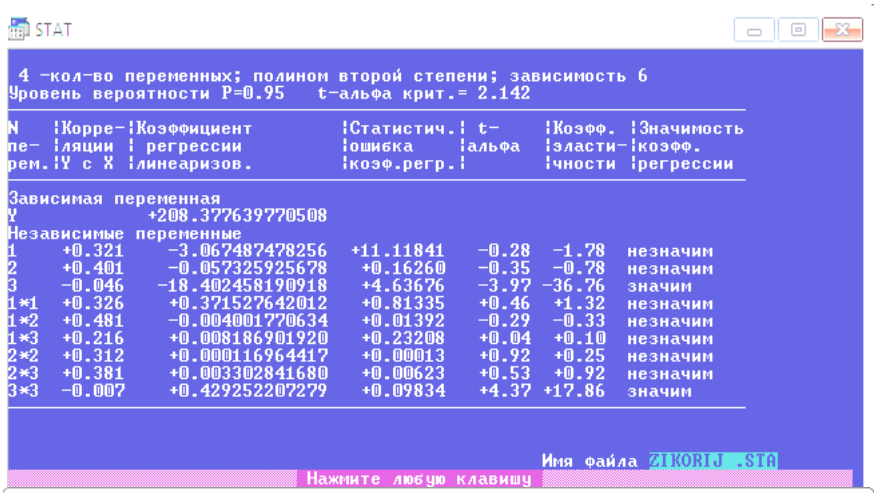



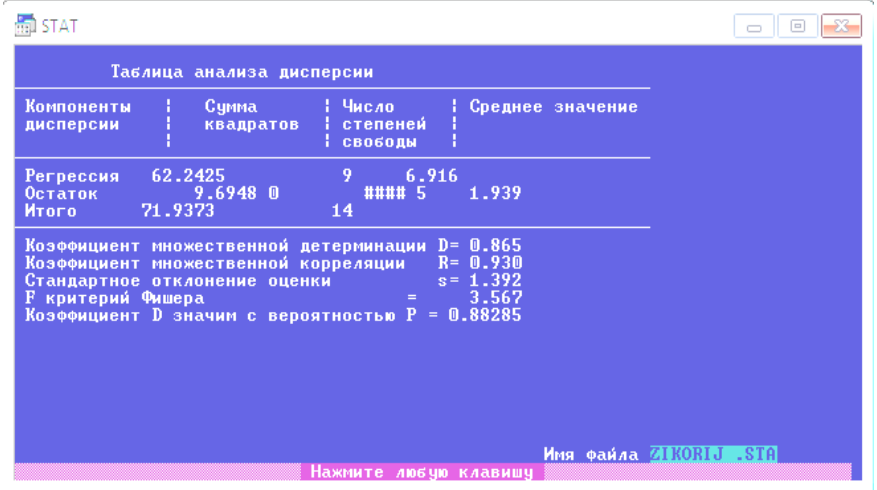

Маса налиплого грунту на коренеплодах.





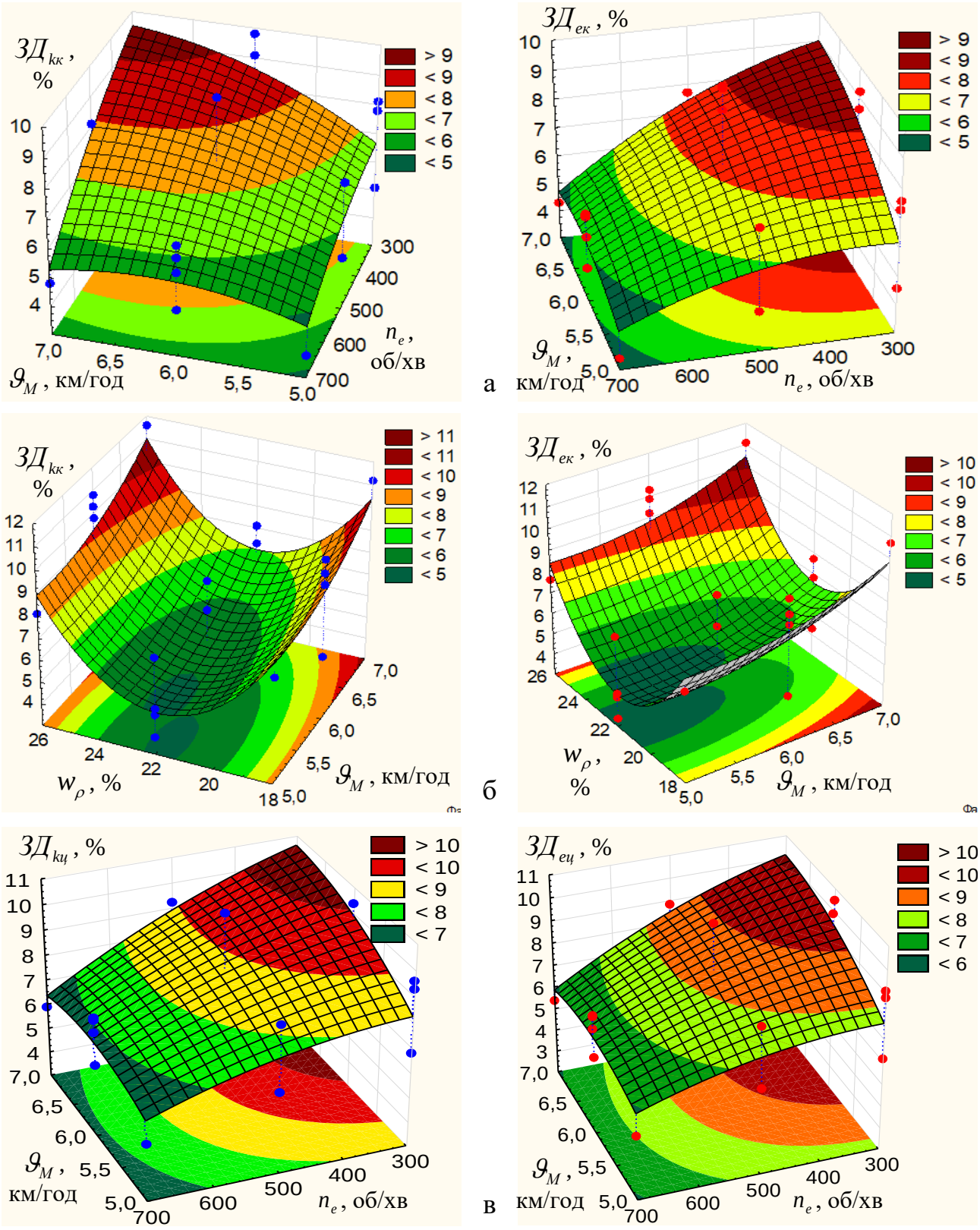

Пошкодження коренеплодів.



Додаток Ж.13.2

Поверхні відгуку загальних домішок під час збирання кормових і цукрових буряків



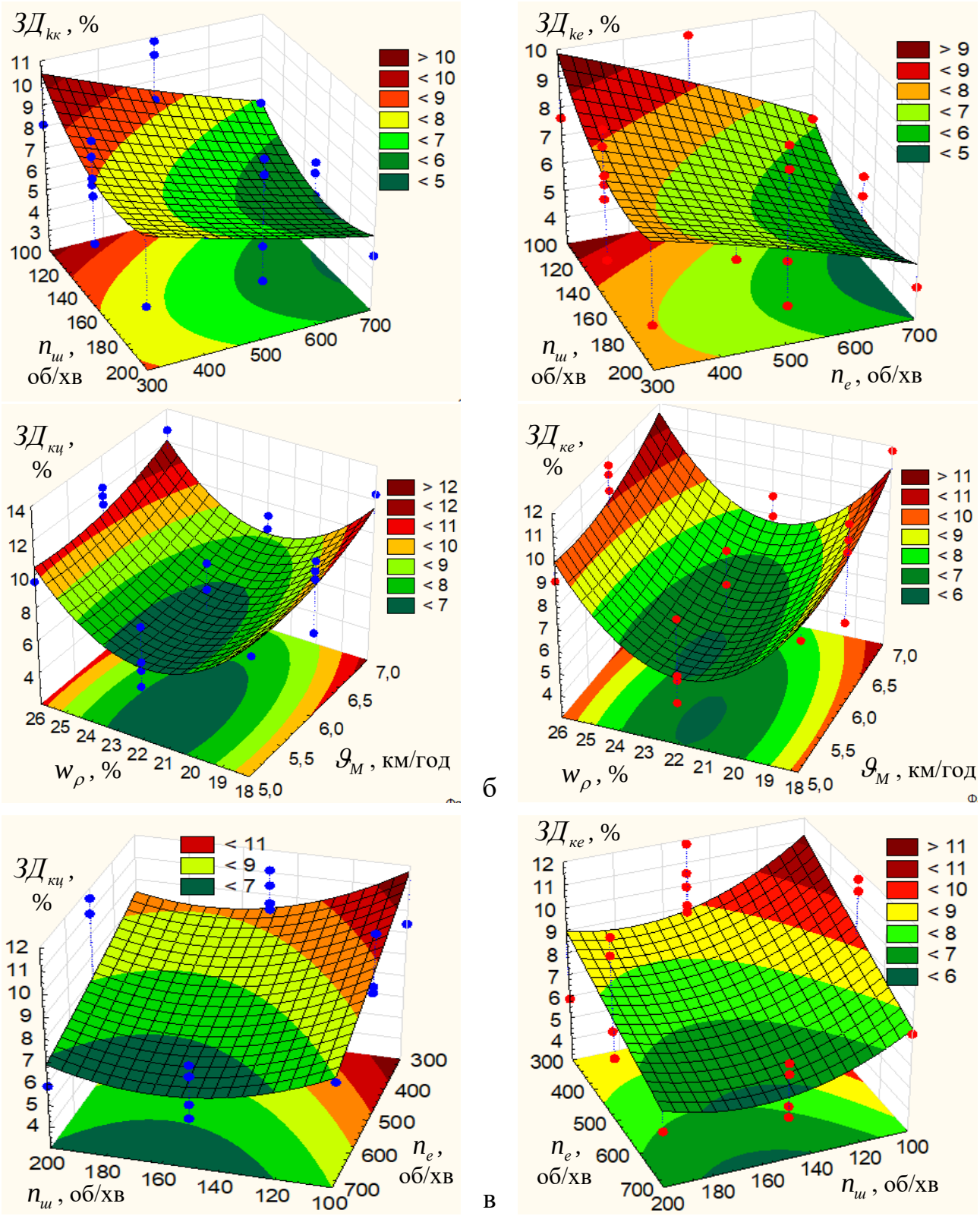

а – $ЗД_{кк} = f_{ЗД}(\vartheta_M; n_e)$, $ЗД_{ек} = f_{ЗД}(\vartheta_M; n_e)$; б – $ЗД_{кк} = f_{ЗД}(\vartheta_M; w_\rho)$, $ЗД_{ек} = f_{ЗД}(\vartheta_M; w_\rho)$;

в – $ЗД_{кц} = f_{ЗД}(\vartheta_M; n_e)$, $ЗД_{ец} = f_{ЗД}(\vartheta_M; n_e)$

Додаток Ж.14.2

Поверхні відгуку загальних домішок

під час збирання кормових і цукрових буряків

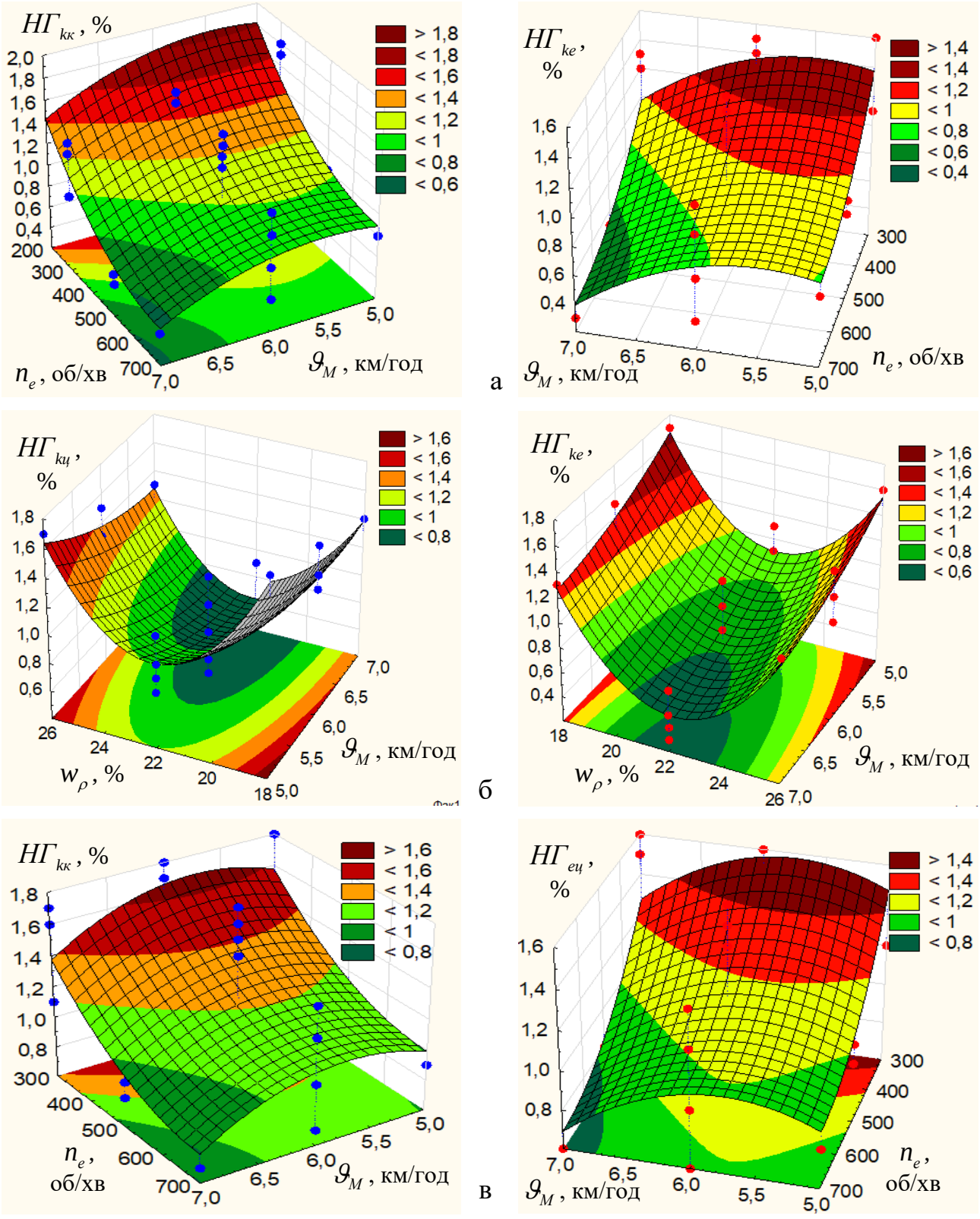



а – $ЗД_{кк} = f_{ЗД}(n_ш; n_е)$, $ЗД_{кц} = f_{ЗД}(n_ш; n_е)$; б – $ЗД_{кц} = f_{ЗД}(\vartheta_М; w_ρ)$, $ЗД_{ец} = f_{ЗД}(\vartheta_М; w_ρ)$;

в – $ЗД_{кц} = f_{ЗД}(n_ш; n_е)$, $ЗД_{ец} = f_{ЗД}(n_ш; n_е)$

Додаток Ж.15.2

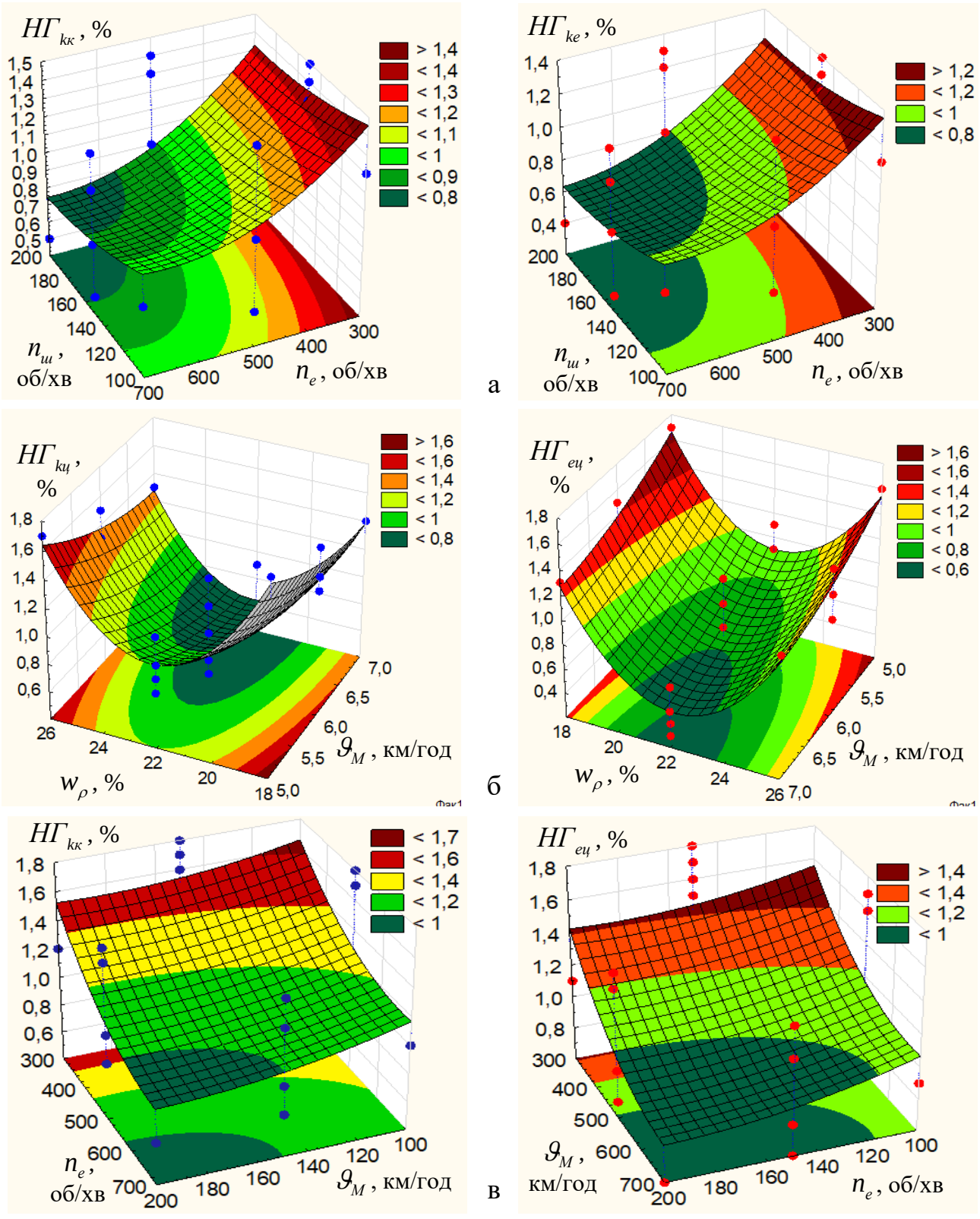
Поверхні відгуку налиплого грунту на коренеплодах
під час збирання кормових і цукрових буряків




а – $НГ_{кк} = f_{НГ}(\vartheta_M; n_e)$, $НГ_{ек} = f_{НГ}(\vartheta_M; n_e)$; б – $НГ_{кк} = f_{НГ}(\vartheta_M; w_\rho)$,
$НГ_{ек} = f_{НГ}(\vartheta_M; w_\rho)$; в – $НГ_{кц} = f_{НГ}(\vartheta_M; n_e)$, $НГ_{ец} = f_{НГ}(\vartheta_M; n_e)$

Додаток Ж.16.2

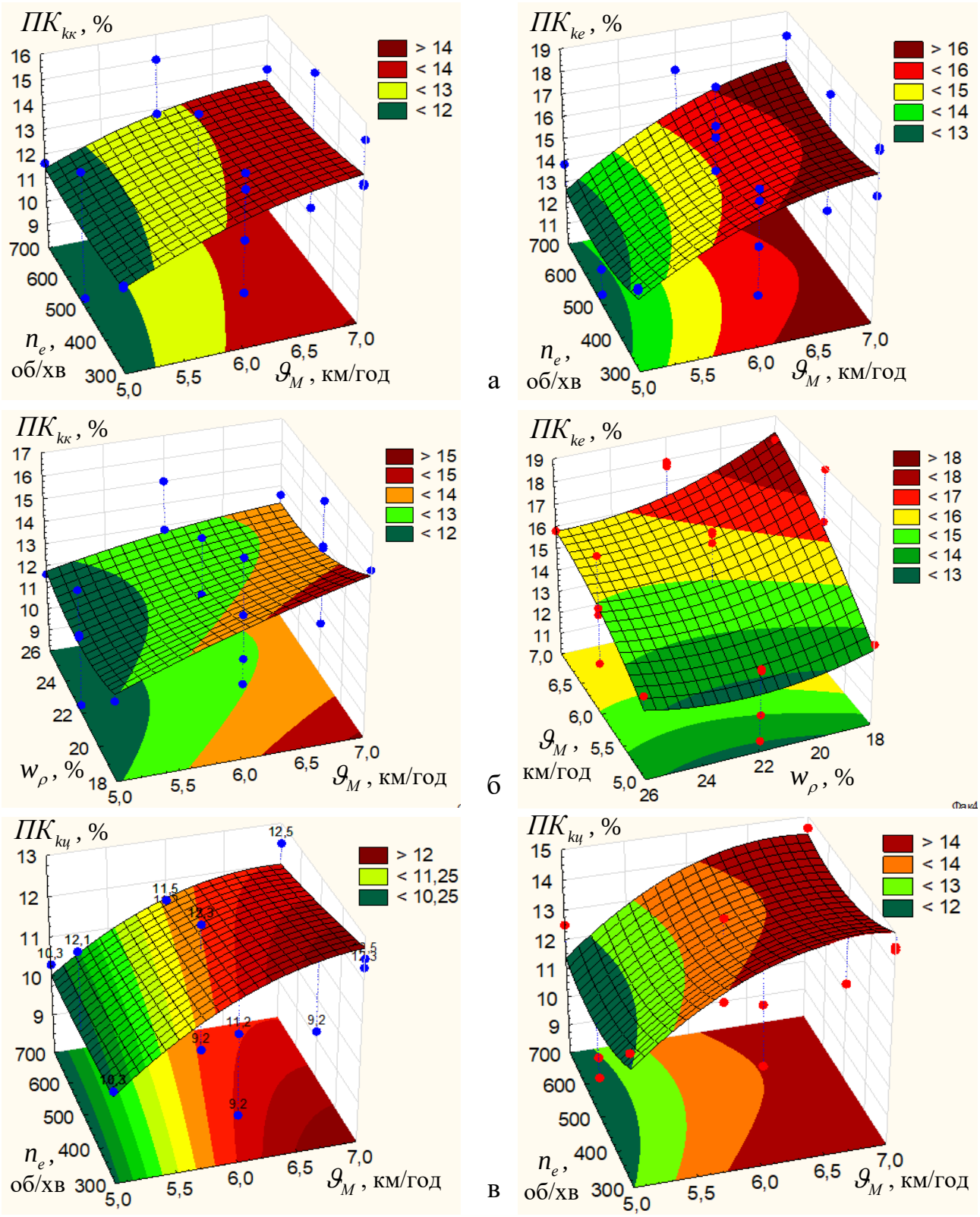
Поверхні відгуку налиплого грунту на коренеплодах
під час збирання кормових і цукрових буряків




а – $НГ_{кк} = f_{НГ}(n_ш; n_e)$, $НГ_{ек} = f_{НГ}(n_ш; n_ш)$; б – $НГ_{кц} = f_{НГ}(\vartheta_M; w_\rho)$,
$НГ_{ец} = f_{НГ}(\vartheta_M; w_\rho)$; в – $НГ_{кц} = f_{НГ}(n_ш; n_e)$, $НГ_{ец} = f_{НГ}(n_ш; n_ш)$

Додаток Ж.17.2

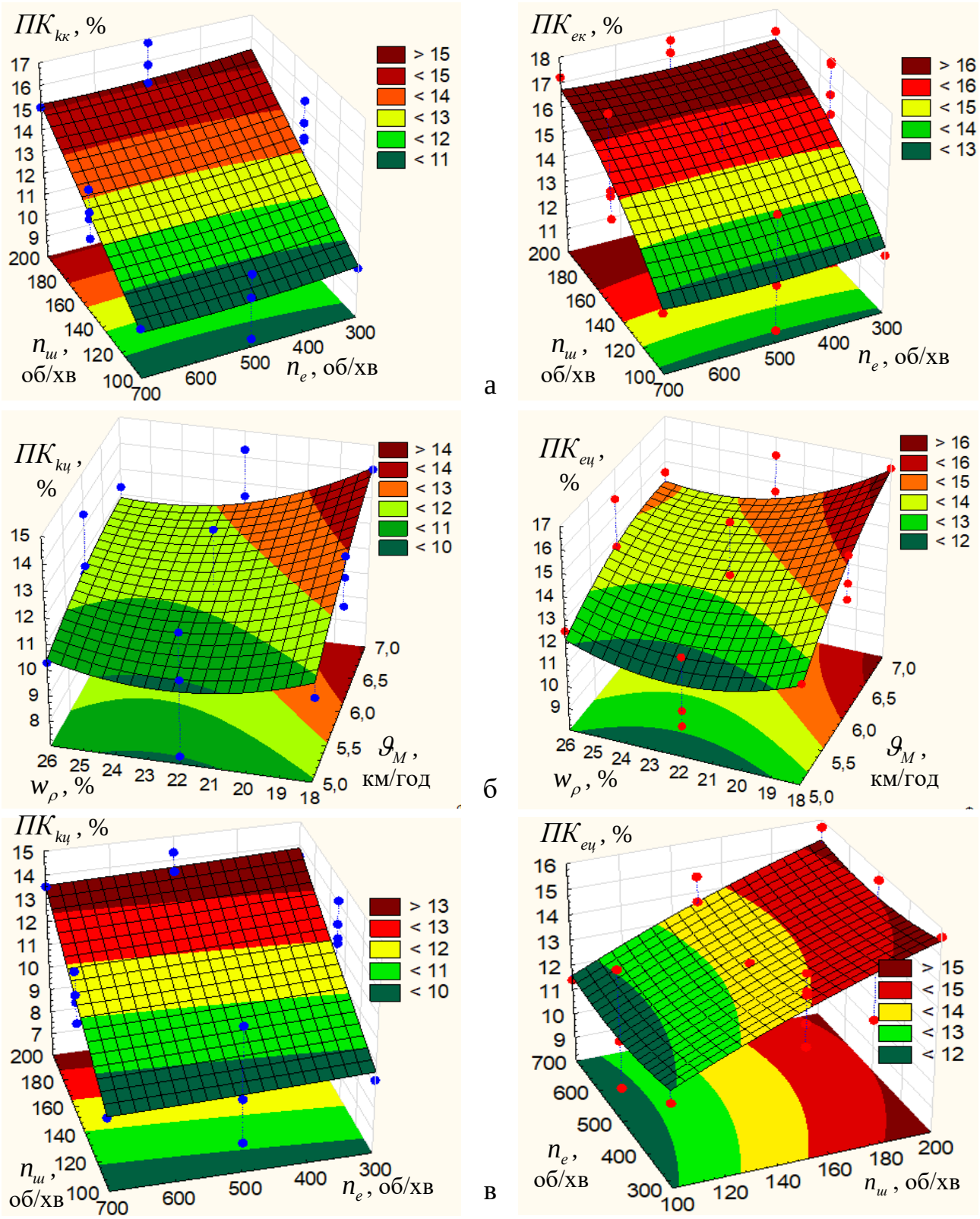
Поверхні відгуку пошкодження коренеплодів
під час збирання кормових і цукрових буряків




а – $ПК_{кк} = f_{ПК}(\vartheta_M; n_e)$, $ПК_{ек} = f_{ПК}(\vartheta_M; n_e)$; б – $ПК_{кк} = f_{ПК}(\vartheta_M; w_\rho)$,
$ПК_{ек} = f_{ПК}(\vartheta_M; w_\rho)$; в – $ПК_{кц} = f_{ПК}(\vartheta_M; n_e)$, $ПК_{ец} = f_{ПК}(\vartheta_M; n_e)$

Додаток Ж.18.2

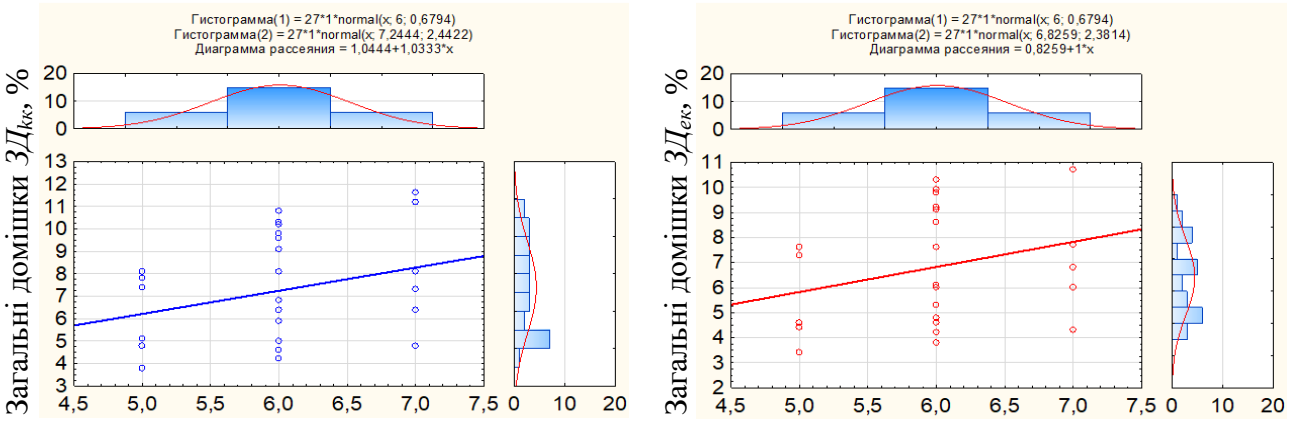
Поверхні відгуку пошкодження коренеплодів
під час збирання кормових і цукрових буряків




а – $ПК_{кк} = f_{ПК}(n_ш; n_e)$, $ПК_{ек} = f_{ПК}(n_ш; n_ш)$; б – $ПК_{кц} = f_{ПК}(\vartheta_M; w_\rho)$,
$ПК_{ец} = f_{ПК}(\vartheta_M; w_\rho)$; в – $ПК_{кц} = f_{ПК}(n_ш; n_e)$, $ПК_{ец} = f_{ПК}(n_ш; n_ш)$

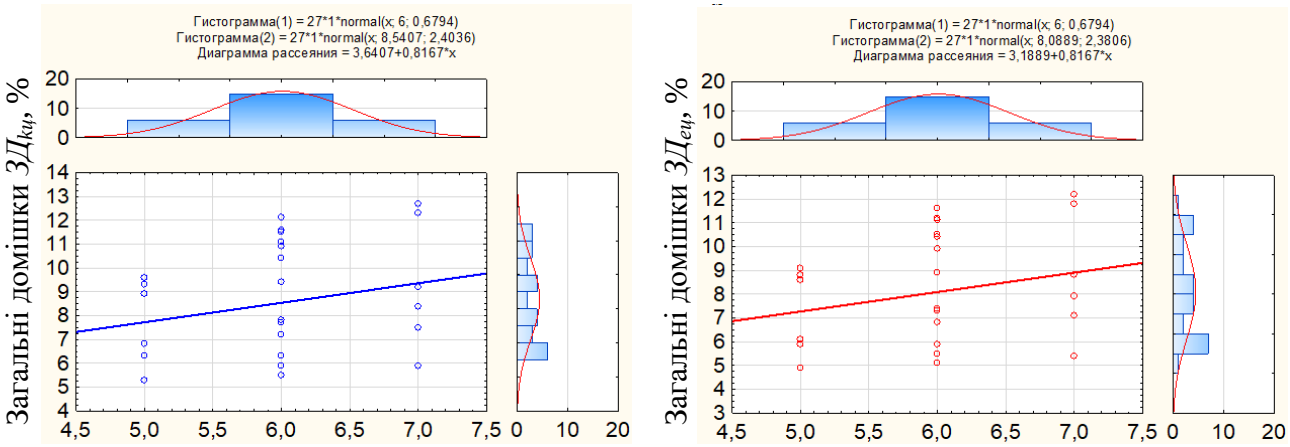
Додаток Ж.19.2

Графічна інтерпретація діаграми розсіювання ймовірного розподілу випадкової величини (загальних домішок $ЗД_i$) відносно зміни вхідного фактора Швидкості руху коренезбиральної машини $\vartheta_M$:



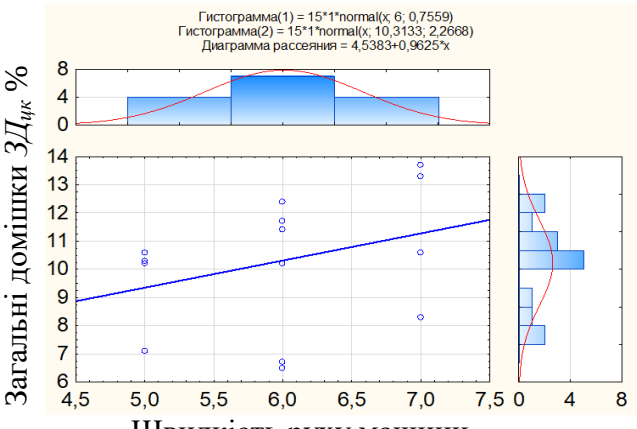

а б

коренеплоди кормових буряків: а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки;




а б

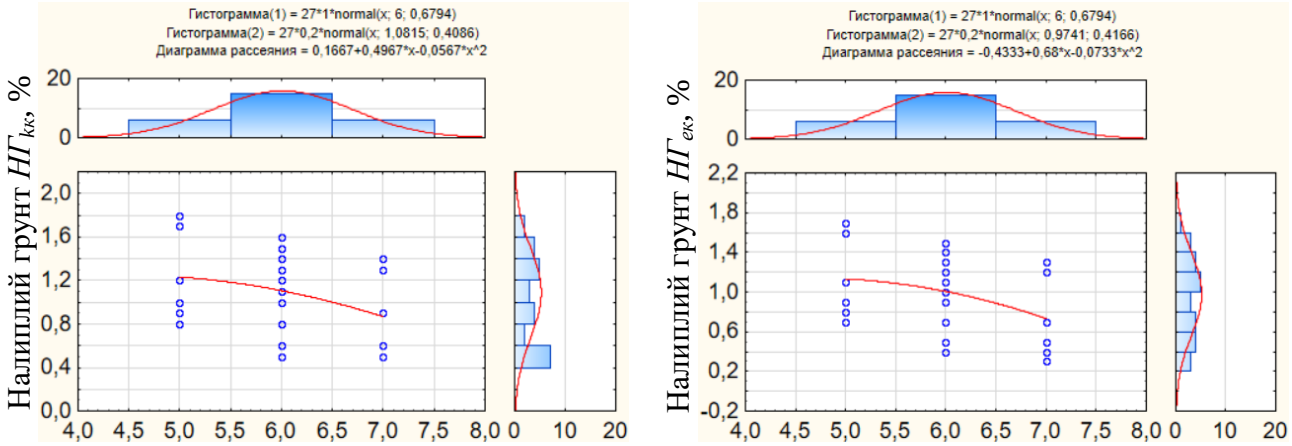
коренеплоди цукрових буряків: а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки;



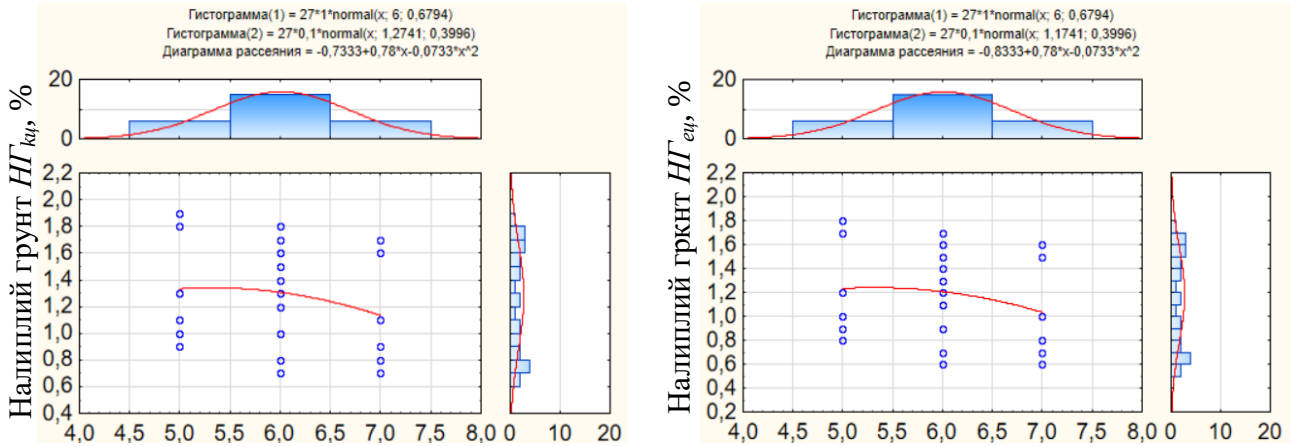

коренеплоди цикорію

Додаток Ж.20.2

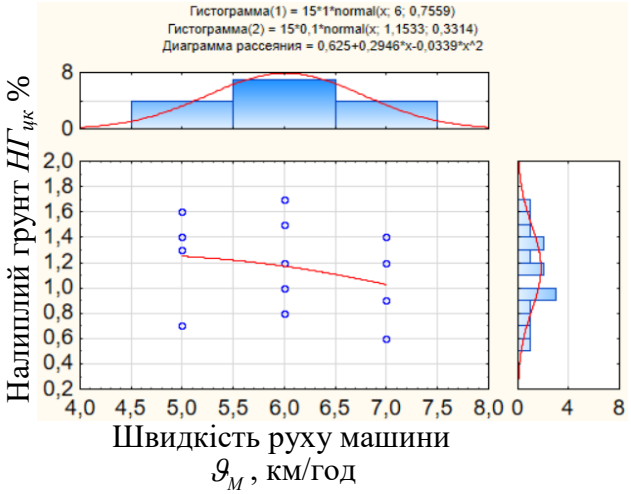
Графічна інтерпретація діаграми розсіювання ймовірного розподілу випадкової величини (налиплого грунту $НГ_i$) відносно зміни вхідного фактора Швидкості руху коренезбиральної машини $\vartheta_M$:




коренеплоди кормових буряків: а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки;



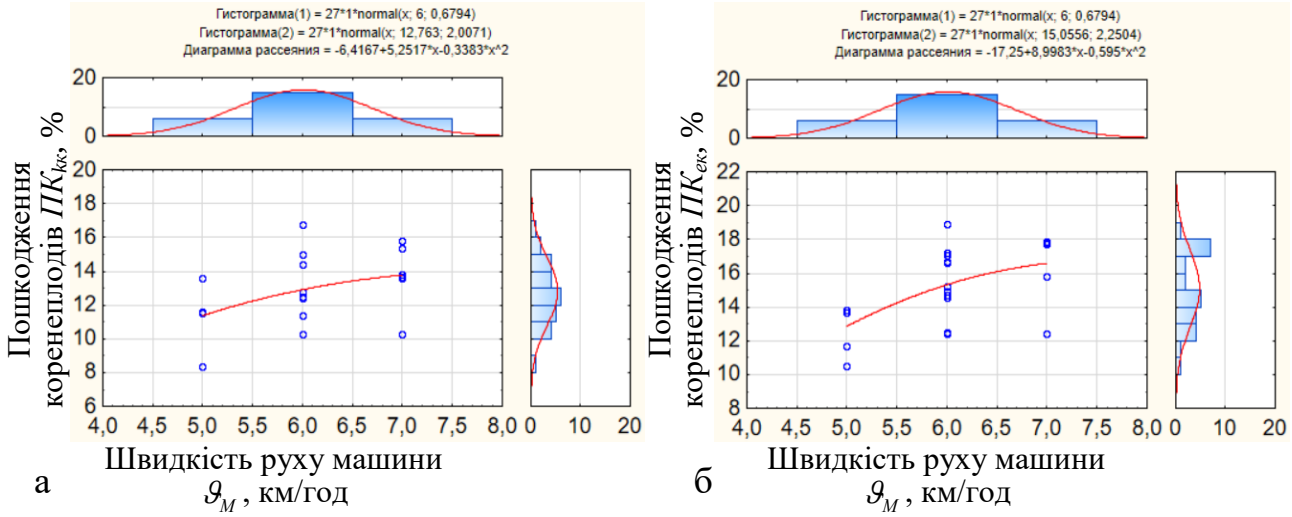

коренеплоди цукрових буряків: а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки;




коренеплоди цикорію.

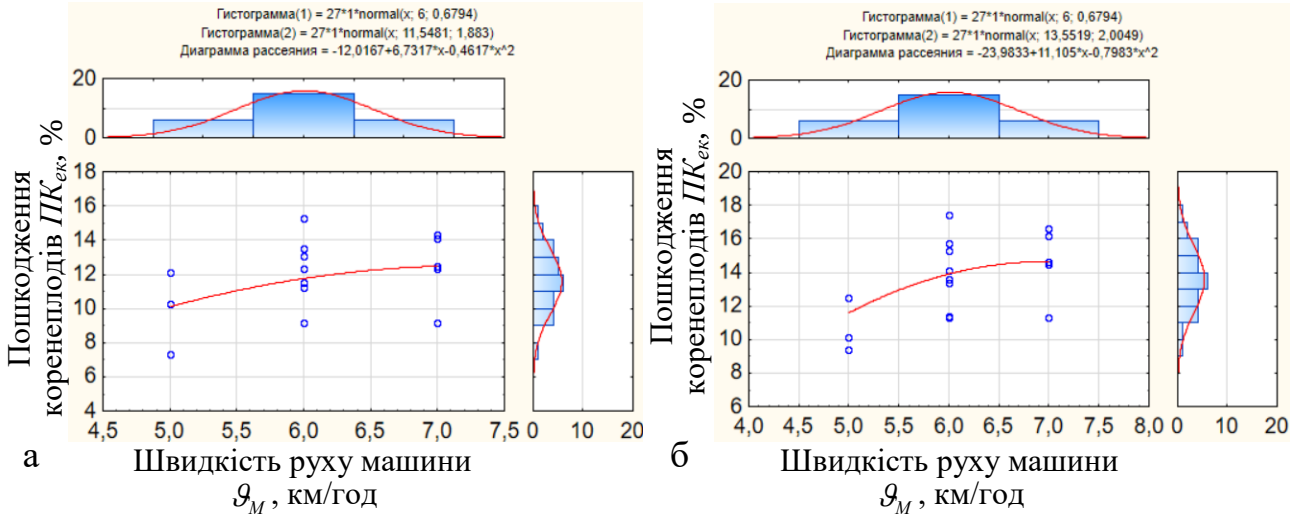
Додаток Ж.21.2

Графічна інтерпретація діаграми розсіювання ймовірного розподілу випадкової величини (пошкодження коренеплодів $ПК_i$) відносно зміни вхідного фактора Швидкості руху коренезбиральної машини $\vartheta_M$:



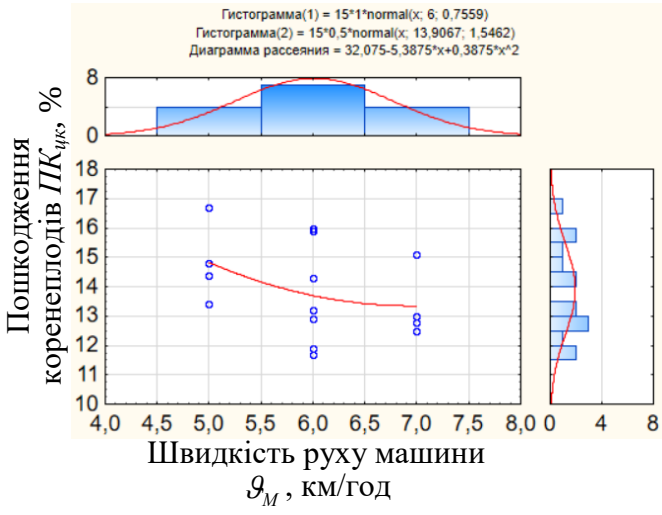

а б

коренеплоди кормових буряків: а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки;




а б

коренеплоди цукрових буряків: а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки;

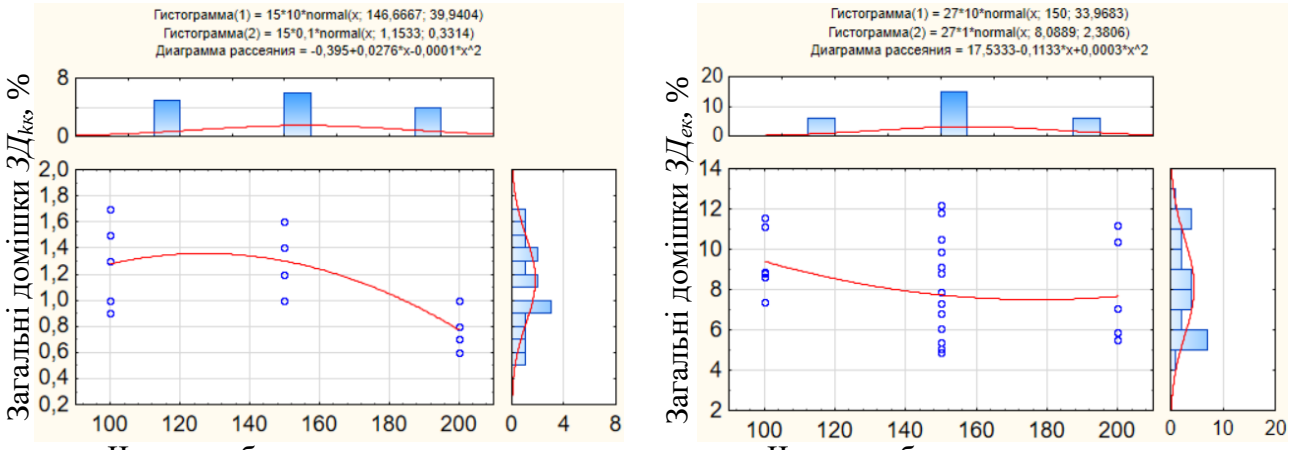



коренеплоди цикорію

Додаток Ж.22.2

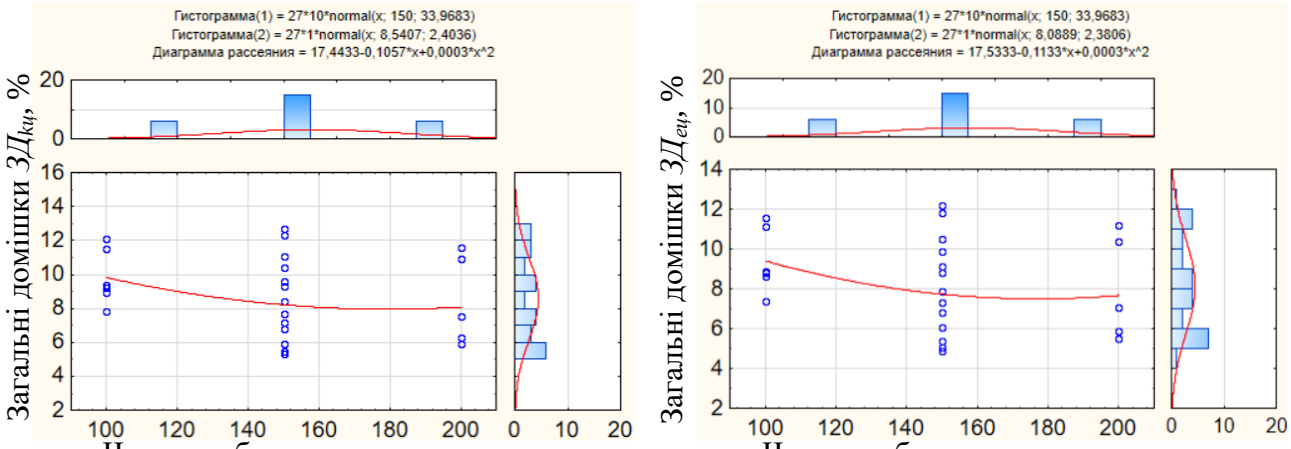
Графічна інтерпретація діаграми розсіювання ймовірного розподілу випадкової величини (загальних домішок $ЗД_i$) відносно зміни вхідного фактора:

Частоти обертання шнека $n_ш$ або шнекового конвеєра $n_{ш.к}$:



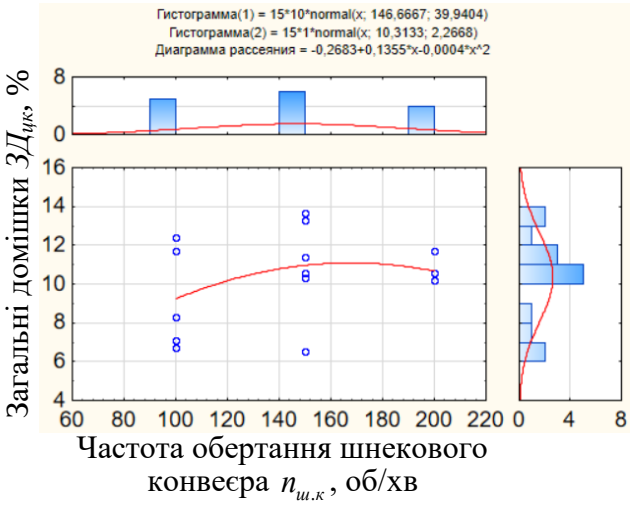

а б

коренеплоди кормових буряків: а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки;




а б

коренеплоди цукрових буряків: а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки;

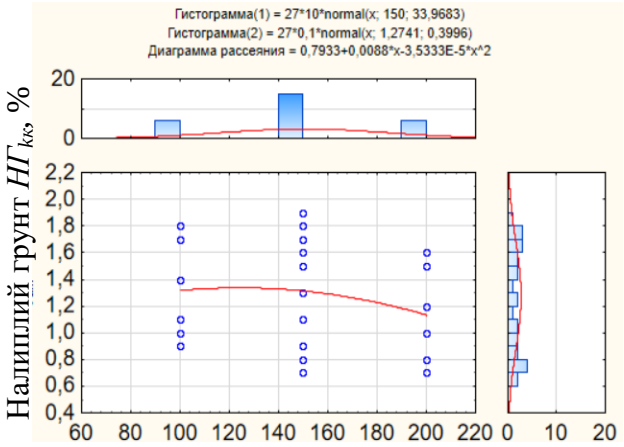



коренеплоди цикорію.

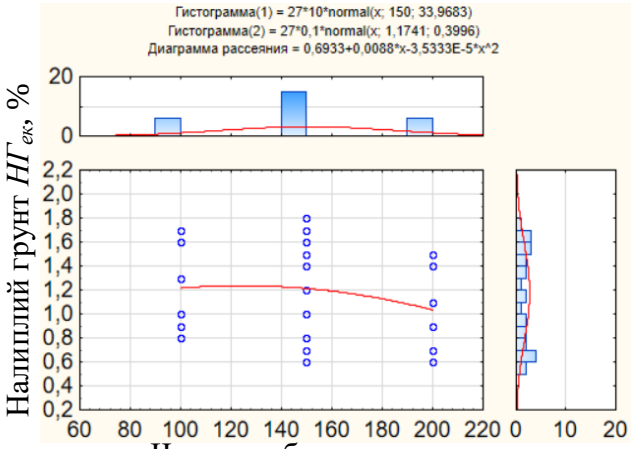
Додаток Ж.23.2

Графічна інтерпретація діаграми розсіювання ймовірного розподілу випадкової величини (налиплого грунту $НГ_i$) відносно зміни вхідного фактора:

Частоти обертання шнека $n_ш$ або шнекового конвеєра $n_{ш.к}$:

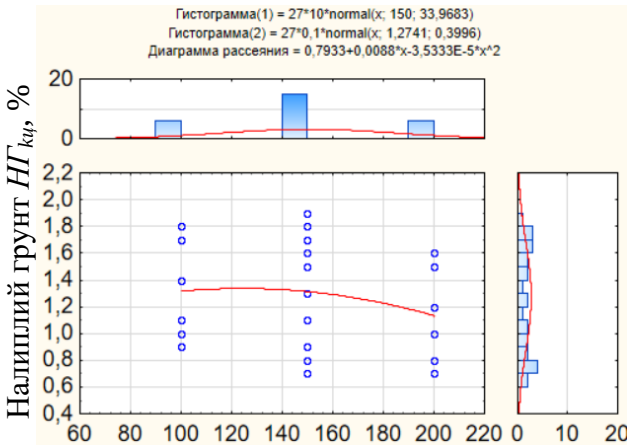



а

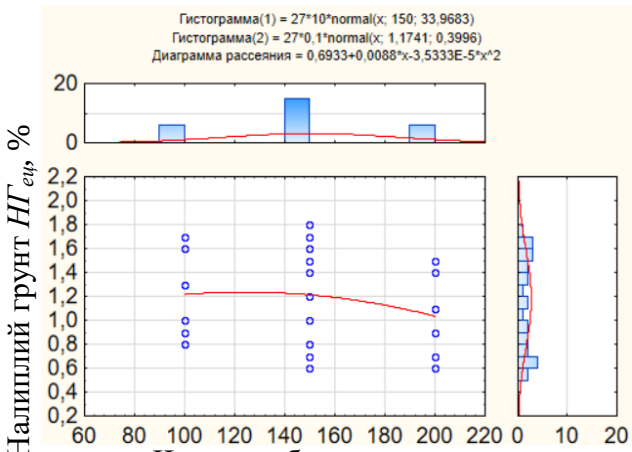



б

коренеплоди кормових буряків а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки;

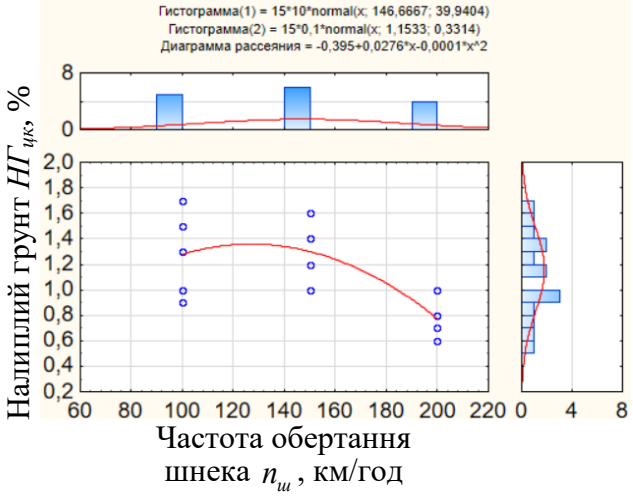



а




б

коренеплоди цукрових буряків а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки;

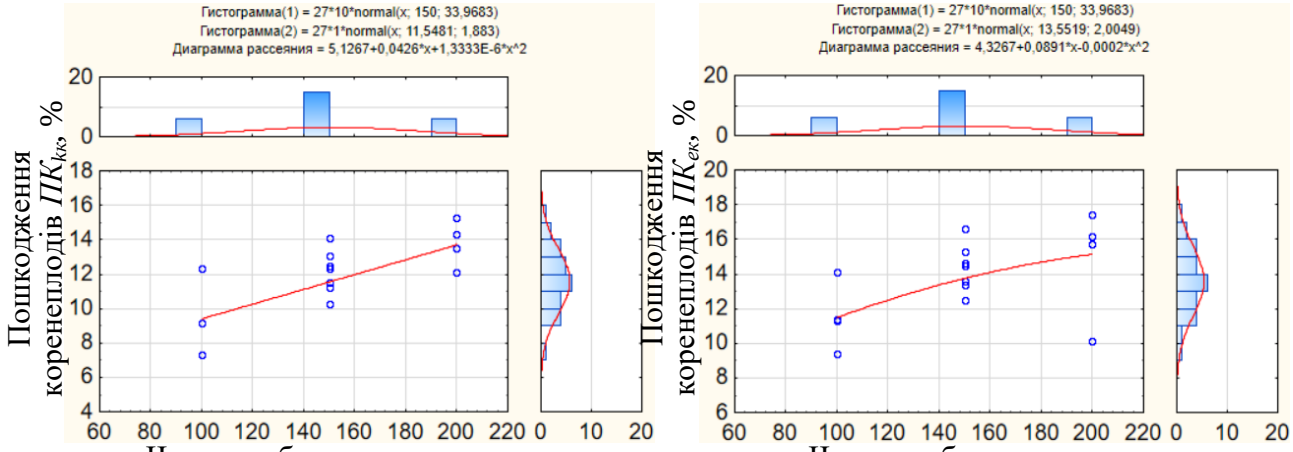



коренеплоди цикорію.

Додаток Ж.24.2

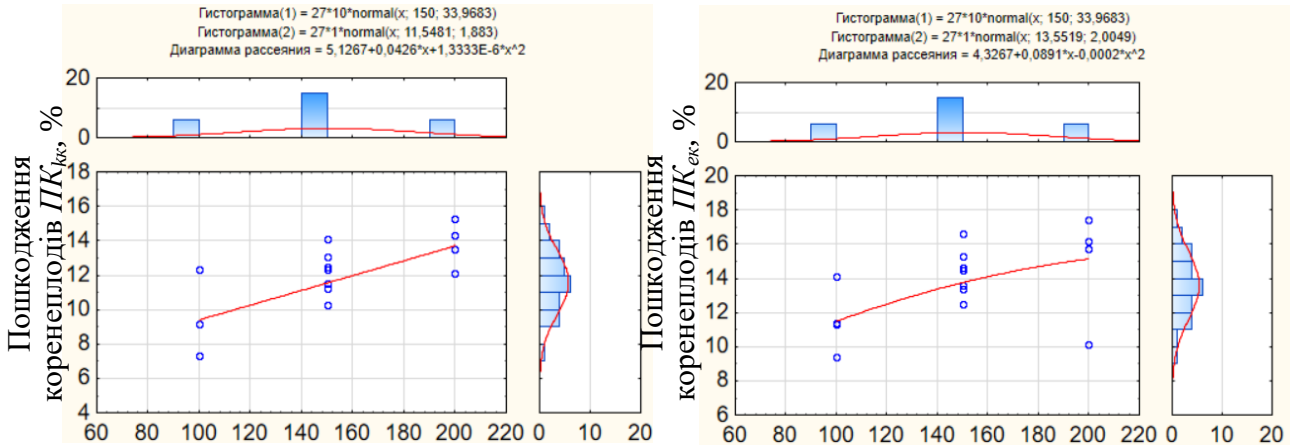
Графічна інтерпретація діаграми розсіювання ймовірного розподілу випадкової величини (пошкодження коренеплодів $ПК_i$) відносно зміни вхідного фактора:

Частоти обертання шнека $n_ш$ або шнекового конвеєра $n_{ш.к}$:



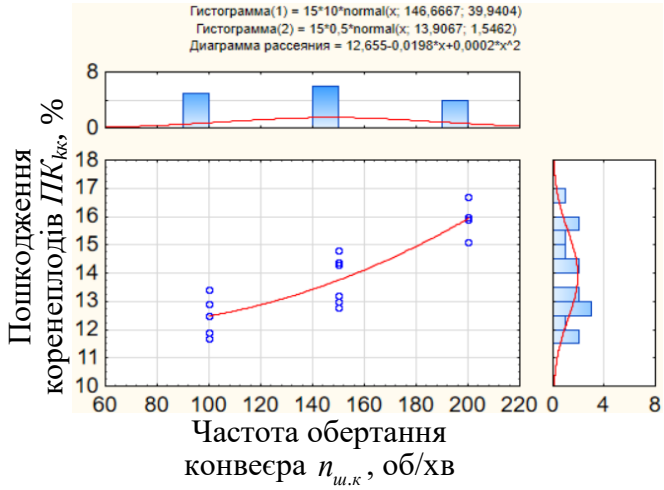

а б

коренеплоди кормових буряків а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки;




а б

коренеплоди цукрових буряків а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки;

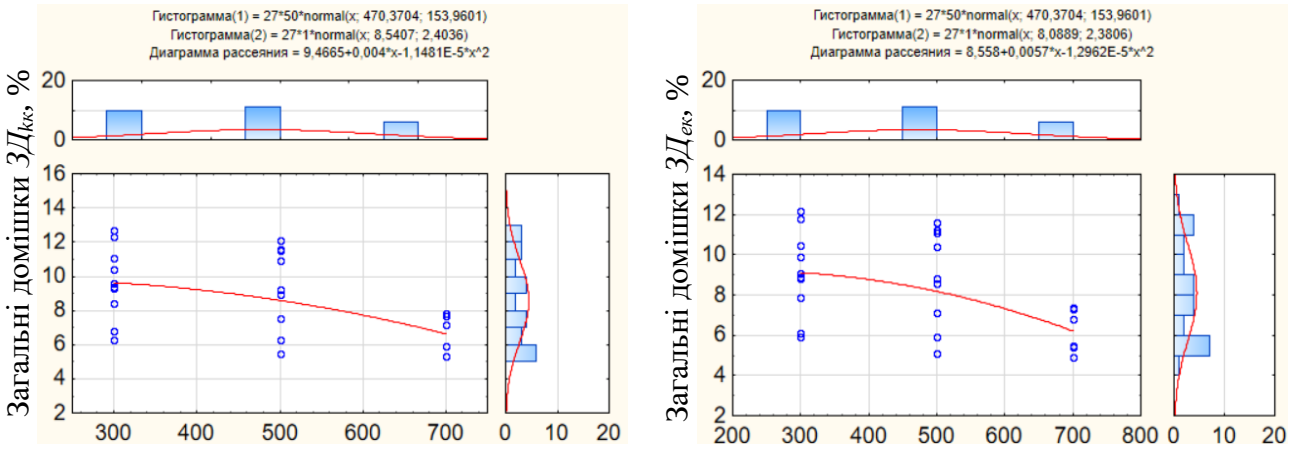



коренеплоди цикорію

Додаток Ж.25.2

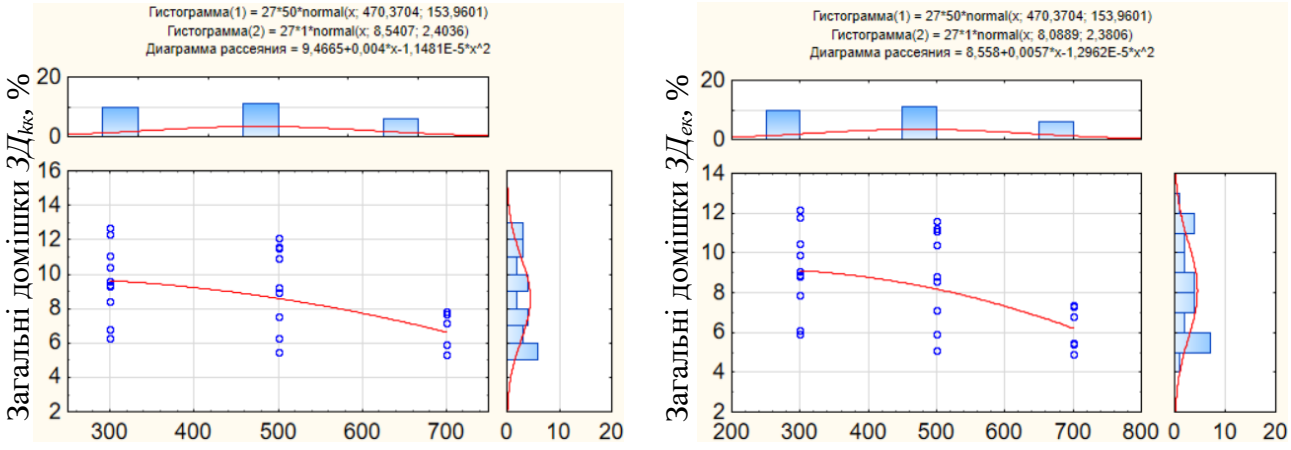
Графічна інтерпретація діаграми розсіювання ймовірного розподілу випадкової величини (загальних домішок $ЗД_i$) відносно зміни вхідного фактора:

Частоти обертання очисних пружних елементів $n_e$:




а б

коренеплоди кормових буряків а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки;



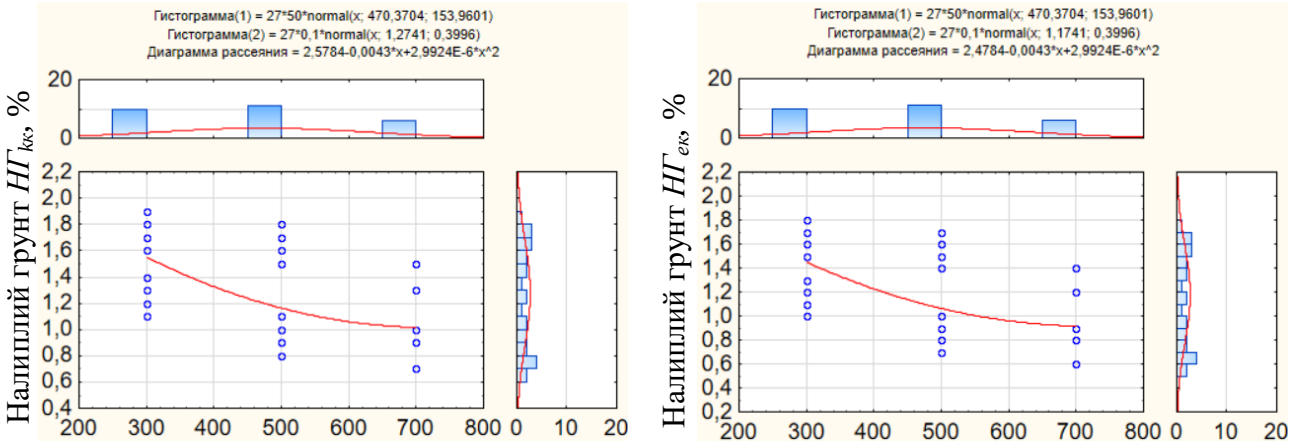

а б

коренеплоди цукрових буряків а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки

Додаток Ж.26.2

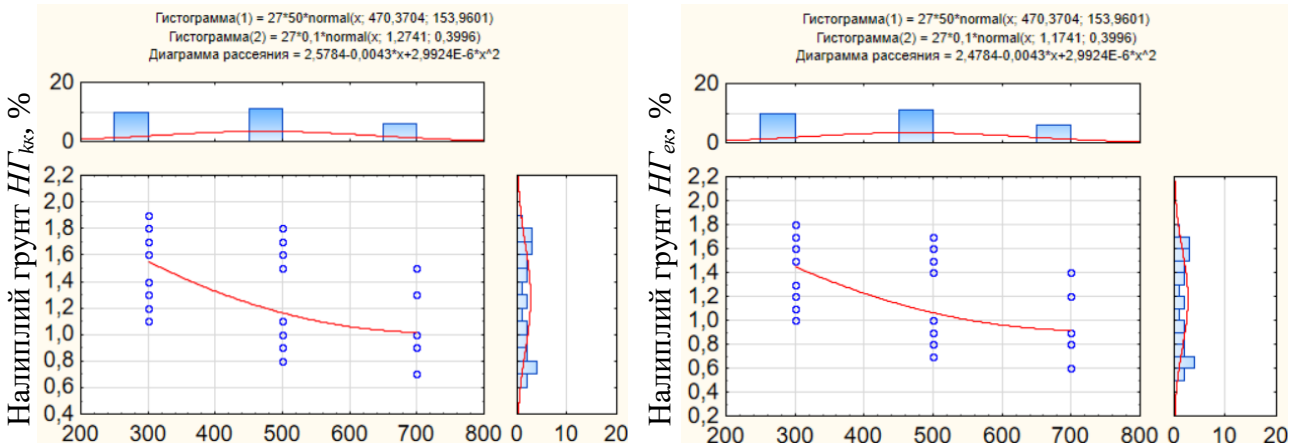
Графічна інтерпретація діаграми розсіювання ймовірного розподілу випадкової величини (налиплого грунту $НГ_i$) відносно зміни вхідного фактора:

Частоти обертання очисних пружних елементів $n_e$:




а б

коренеплоди кормових буряків а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки;



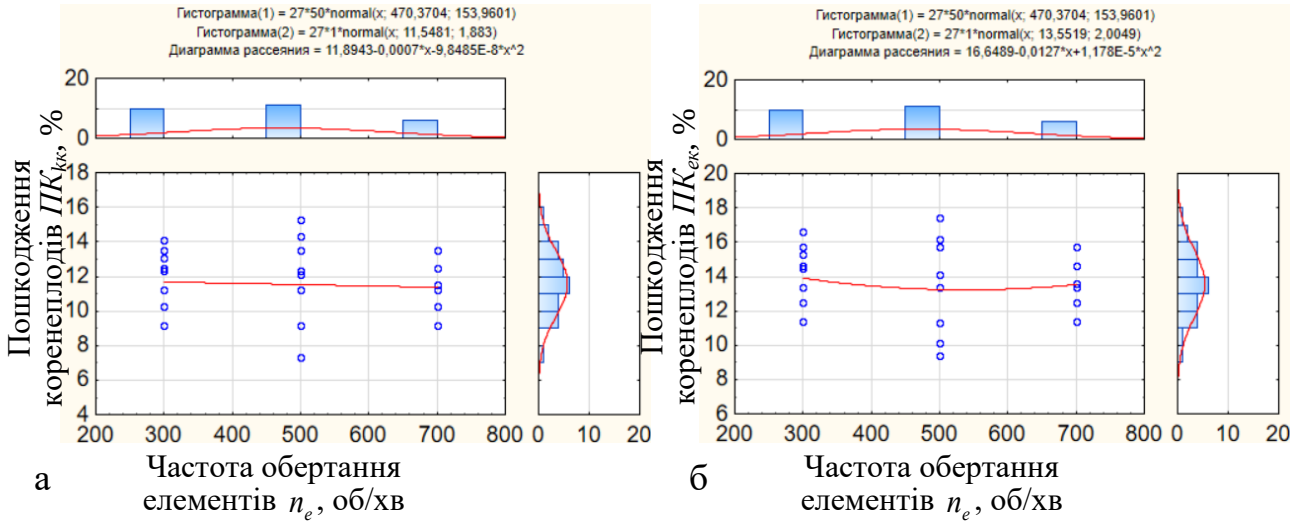

а б

коренеплоди цукрових буряків а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки

Додаток Ж.27.2

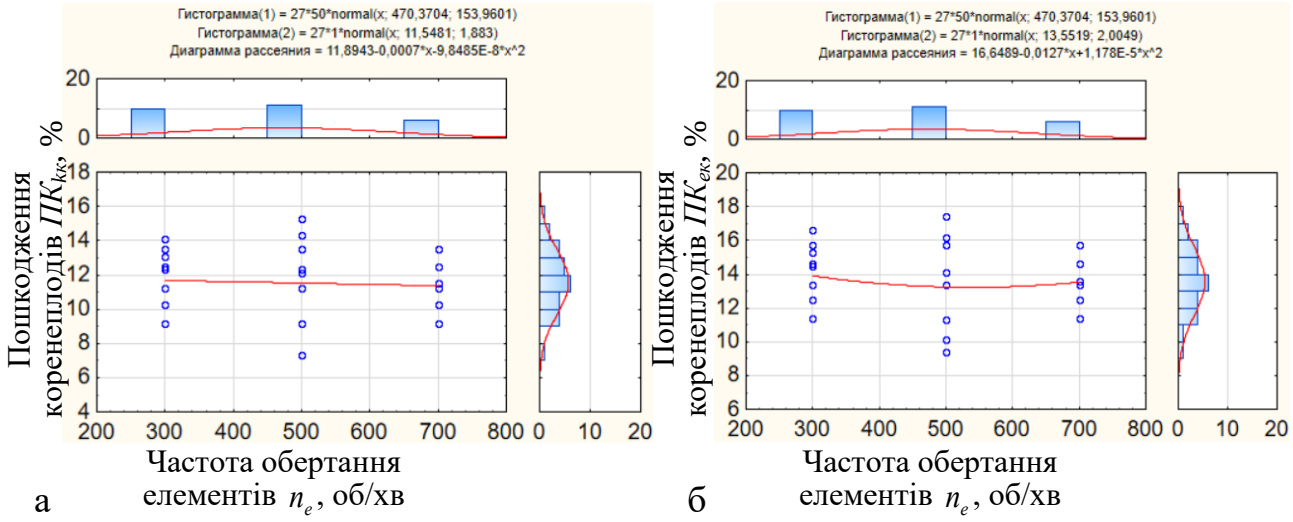
Графічна інтерпретація діаграми розсіювання ймовірного розподілу випадкової величини (пошкодження коренеплодів $ПК_i$) відносно зміни вхідного фактора:

Частоти обертання очисних пружних елементів $n_e$:




а б

коренеплоди кормових буряків а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки;

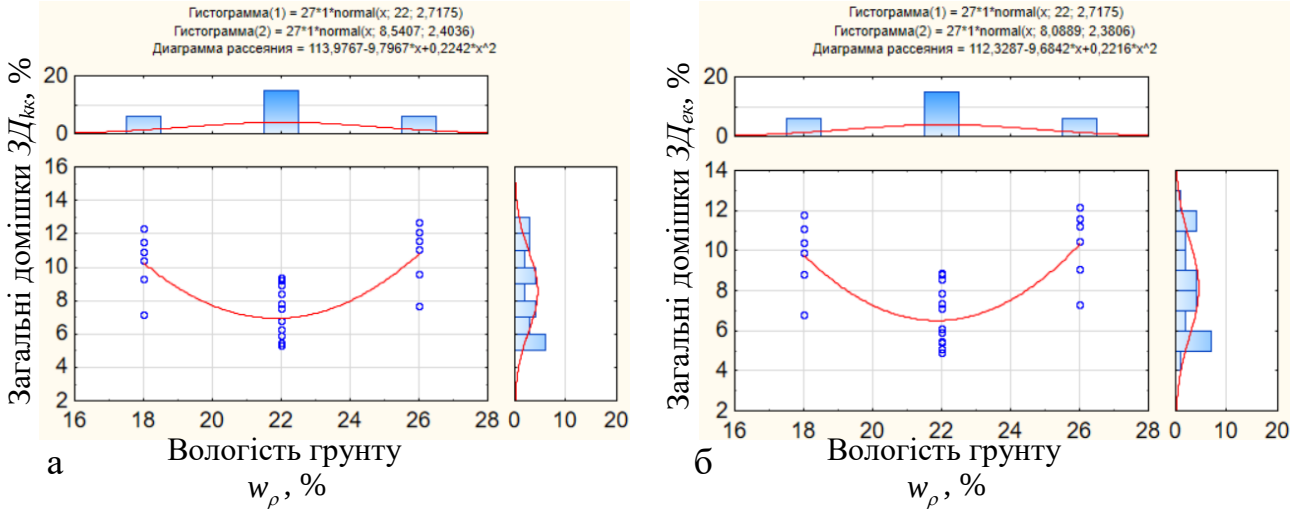



а б

коренеплоди цукрових буряків а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки

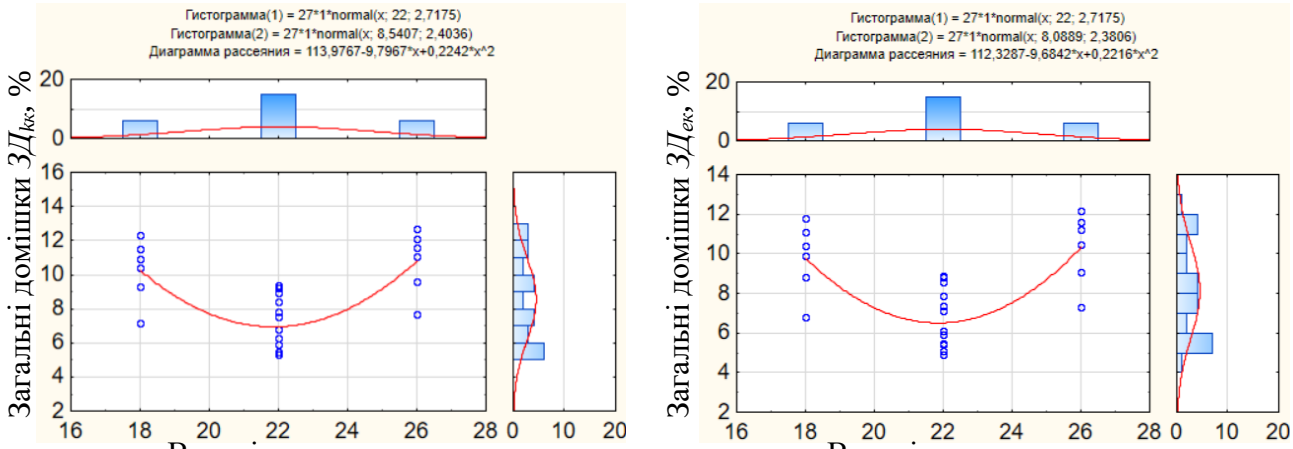
Додаток Ж.28.2

Графічна інтерпретація діаграми розсіювання ймовірного розподілу випадкової величини (загальних домішок $ЗД_i$) відносно зміни вхідного фактора Вологості грунту $w_\rho$:




а б

коренеплоди кормових буряків а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки



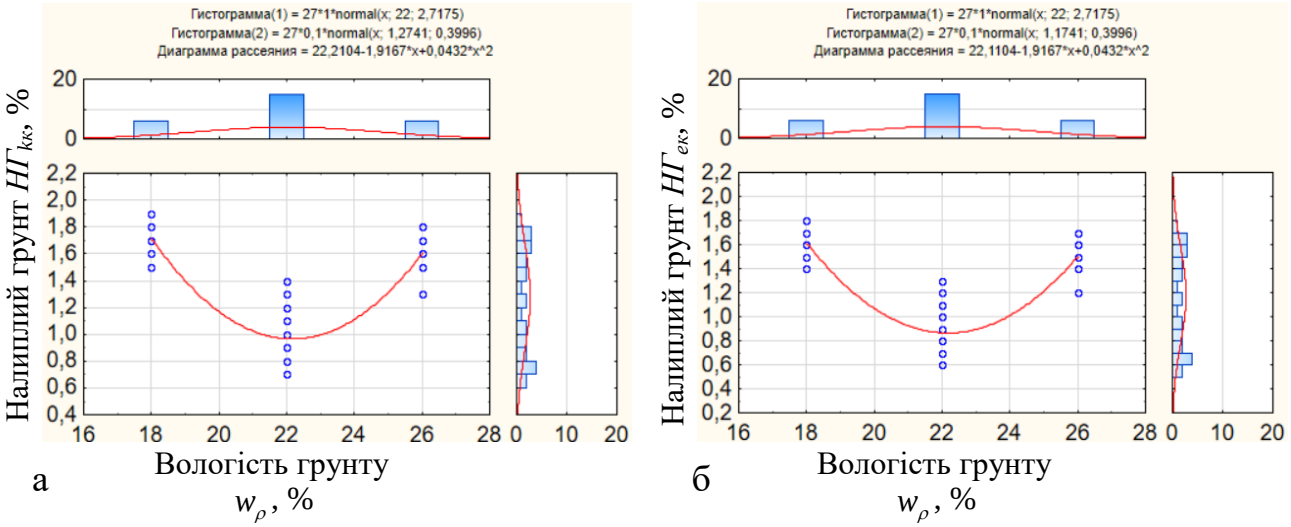

а б

коренеплоди цукрових буряків а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки

Додаток Ж.29.2

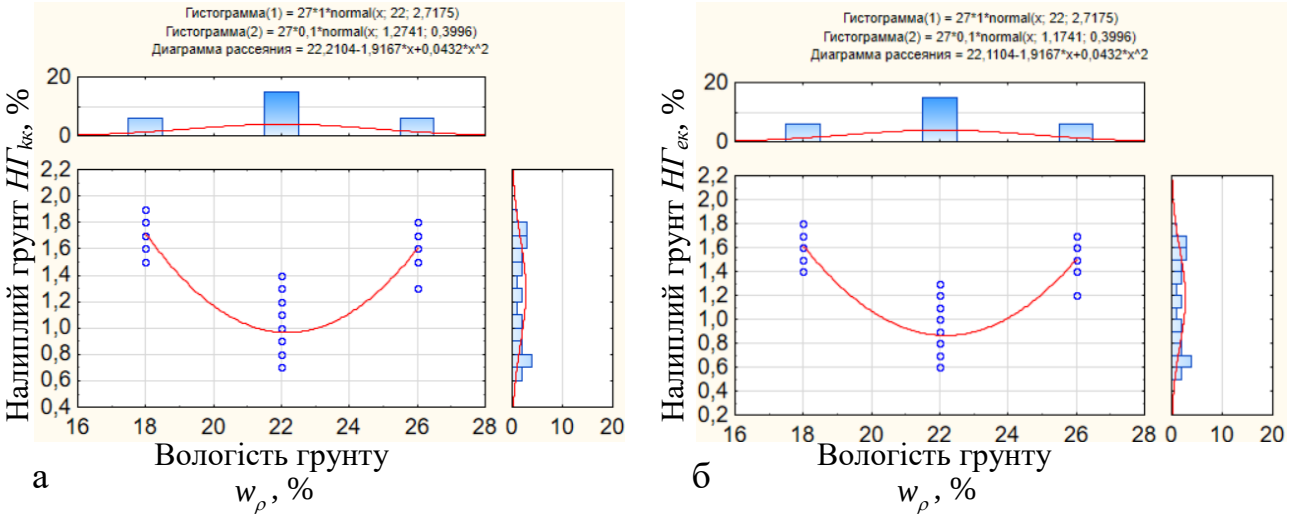
Графічна інтерпретація діаграми розсіювання ймовірного розподілу випадкової величини (налиплого грунту $НГ_i$) відносно зміни вхідного фактора:

Вологості грунту $w_\rho$:



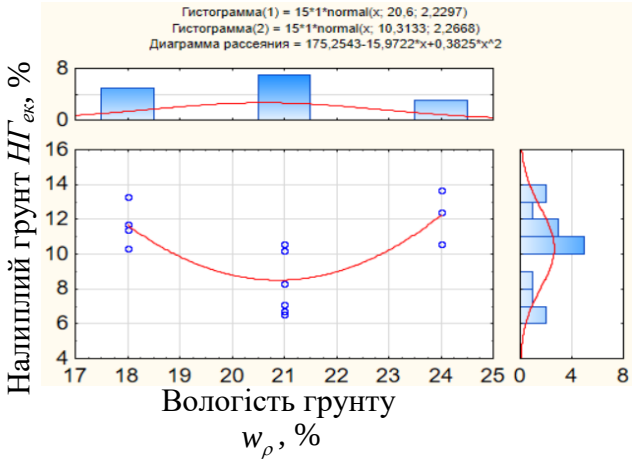

а б

коренеплоди кормових буряків а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки




а б

коренеплоди цукрових буряків а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки

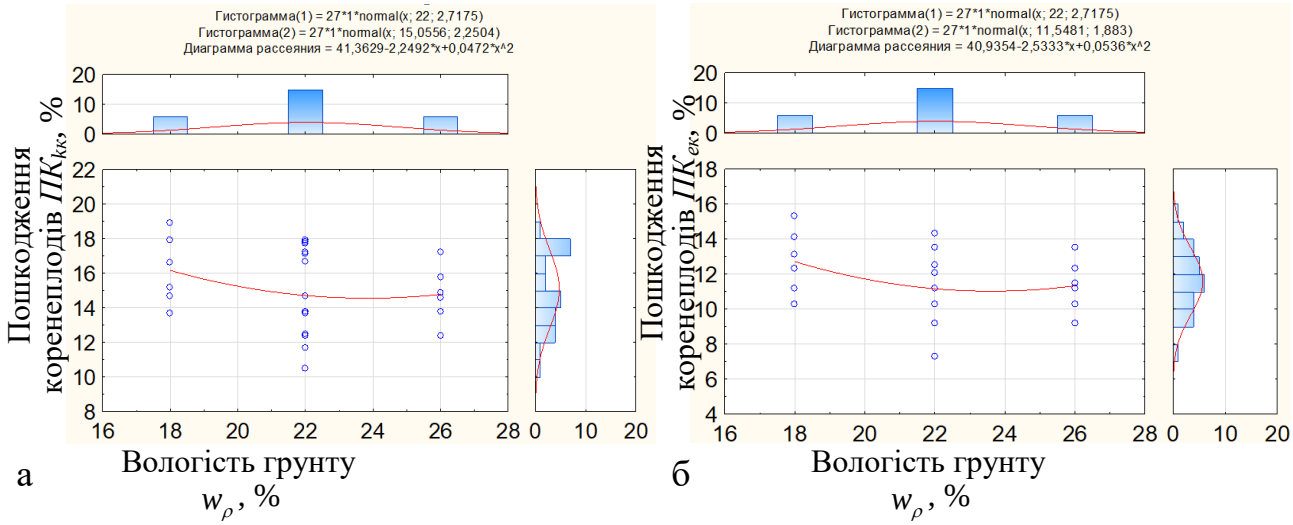



коренеплоди цикорію

Додаток Ж.30.2

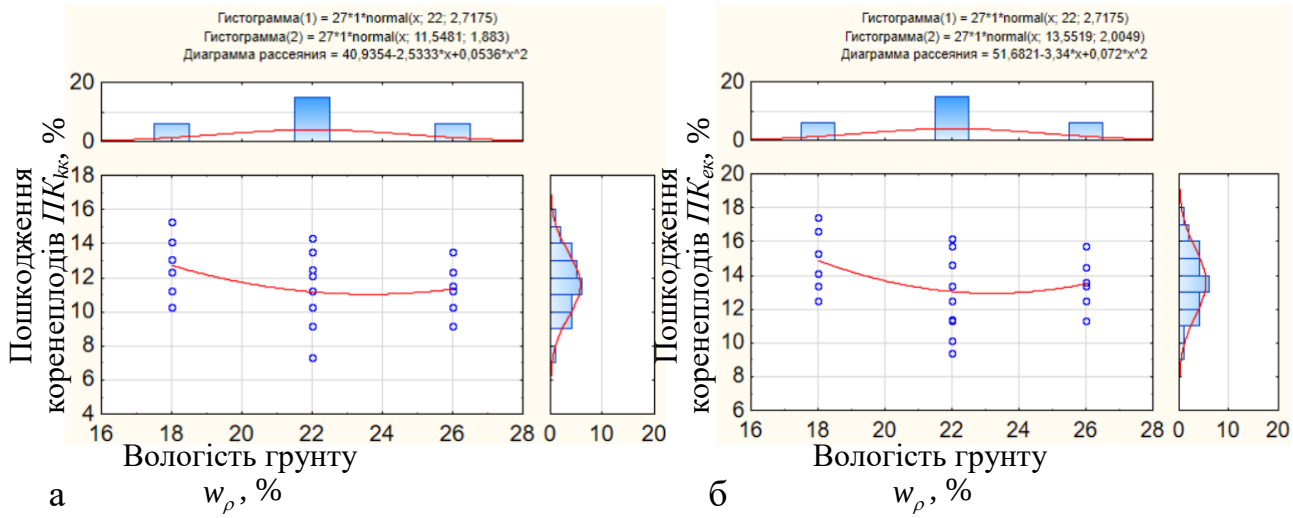
Графічна інтерпретація діаграми розсіювання ймовірного розподілу випадкової величини (пошкодження коренеплодів $ПК_i$) відносно зміни вхідного фактора:

Вологості грунту $w_\rho$:



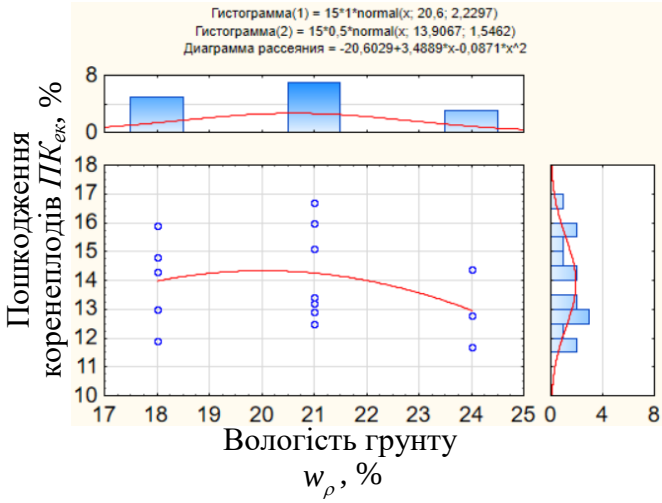

а б

коренеплоди кормових буряків а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки;




а б

коренеплоди цукрових буряків а – шнеки круглого перерізу; б – еліпсні шнеки;




коренеплоди цикорію

Додаток Ж.31.3

Показники якості роботи під час проведення порівняльних досліджень

ПРИВАТНЕ АГРОПРОМИСЛОВЕ ПІДПРИЄМСТВО
АГРОПРОДСЕРВІС
47734, Тернопільська область, Тернопільський район, с.Настасів, тел./факс (0352) 49-80-32, 42-52-70.
р/р 260059721 АТ ТОД «Райфайзен Банк Аваль» МФО 338501 ЄДРПОУ 30356854

Показники якості виконання технологічного процесу збирання кормових буряків при проведенні порівняльних польових досліджень

| Найменування показників | Значення показників | | |
|---|---|---|---|
| | Модерні-зована | Базова | АТВ |
| Робоча швидкість руху, м/с | 1,6 | 1,6 | до 1,6 |
| Глибина підкопування: | | | |
| - середня, см | 9,0 | 9,0 | - |
| - середньоквадратичне відхилення, ± см | 0,85 | 0,85 | - |
| Якість підкопування і підбору коренеплодів, %: | | | |
| - зібрано машиною | 98,7 | 98,7 | - |
| - втрати, всього | 1,3 | 1,3 | 1,5 |
| у тому числі: | | | |
| - невикопаних коренеплодів | 0,4 | 0,4 | 0,5 |
| - на поверхні грунту | 0,3 | 0,4 | - |
| - присипаних грунтом | 0,6 | 0,5 | - |
| Склад вороху зібраних коренеплодів, %: | | | |
| - коренеплоди | 95,4 | 90,9 | - |
| - домішки, всього | 4,6 | 8,7 | 8,0 |
| у тому числі: | | | |
| - вільного грунту | 1,3 | 3,2 | 1,5 |
| - налиплого грунту на коренеплодах | 0,9 | 1,7 | - |
| - рослинних решток, всього | 2,4 | 3,8 | 3,5 |
| у тому числі: | | | |
| - вільної гички та бур'янів | 0,8 | 1,2 | 2,0 |
| - залишків гички на головках коренеплодів | 1,6 | 2,6 | 1,5 |
| Пошкодження коренеплодів, %: | | | |
| - всього | 9,4 | 9,7 | 15,0 |
| у тому числі: | | | |
| - сильнопошкоджених | 3,7 | 3,5 | 5,0 |

Директор
ПАП «Агропродсервіс» І.В. Карачка

Додаток Ж.32.3

Показники якості роботи під час проведення порівняльних досліджень

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор Львівської філії
Державної наукової установи
УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого
_____ О.Д. Москаленко
11 листопада 2023 р.

АКТ

результатів польових порівняльних досліджень базової та удосконаленої коренезбиральної машини МПК-4 під час збирання цукрових буряків на полях Товариства з обмеженою відповідальністю «АГРО-ЛАН», Львівська обл., Жовківський р-н, с. Звертів)

| Найменування показників | Значення показників | | |
|---|---|---|---|
| | Модернізована | Базова | АТВ |
| Швидкість руху, м/с | 1,6 | 1,6 | до 1,6 |
| Продуктивність, га/год. | 1,4 | 1,4 | до 1,4 |
| Глибина підкопування: | | | |
| - середня, см | 9,2 | 9,2 | - |
| - середньоквадратичне відхилення, ± см | 0,95 | 0,95 | - |
| Якість підкопування коренеплодів, %: | | | |
| - зібрано машиною | 98,9 | 98,9 | 98,5 |
| - втрати, всього | 1,1 | 1,1 | 1,5 |
| у тому числі: | | | |
| - не викопаних коренеплодів | 0,3 | 0,3 | 0,5 |
| - на поверхні грунту | 0,4 | 0,6 | - |
| - присипаних грунтом | 0,4 | 0,2 | - |
| Склад вороху зібраних коренеплодів, %: | | | |
| - коренеплоди | 95,0 | 91,4 | - |
| - домішки, всього | 5,0 | 5,9 | 8,0 |
| в тому числі: | | | |
| - вільного грунту | 1,1 | 1,5 | 1,5 |
| - налиплого грунту на коренеплодах | 1,5 | 1,9 | - |
| - рослинних домішок | 2,4 | 2,5 | 3,5 |
| Пошкодження коренеплодів, %: | | | |
| - усього | 9,8 | 9,4 | 15,0 |
| в тому числі сильно пошкоджених | 3,7 | 3,7 | 8,0 |

Завідувач лабораторії
наукових досліджень,
випробувань
техніки і технологій _____ Я.М. Сало

Додаток Ж.33.3
Показники якості роботи під час проведення порівняльних досліджень
(коренеплоди цикорію)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ДП «ДГ Самчики»
ХДСГДС ІКСПГ НААН
підпис
16 листопада 2021 р.

Показники якості виконання технологічного процесу
збирання коренеплодів цикорію

| Найменування показників | Значення показників | | |
|---|---|---|---|
| | Модерні-зована | Базова | АТВ |
| Робоча швидкість руху машини, м/с | 1,6 | 1,6 | до 1,5 |
| Продуктивність за годину основного часу, га/год. | 1,2 | 1,2 | до 1,4 |
| Глибина підкопування: | | | |
| – середня, см | 11,5 | 11,5 | - |
| – середньоквадратичне відхилення, ± см | 0,81 | 0,81 | - |
| Якість підкопування та підбору коренеплодів, %: | | | |
| – зібрано машиною | 97,3 | 97,3 | - |
| – втрати, всього | 2,7 | 2,7 | 2,5 |
| у тому числі: | | | |
| – не викопаних коренеплодів | 2,1 | 2,1 | 2,0 |
| – на поверхні грунту | 0,3 | 0,4 | - |
| – присипаних грунтом | 0,3 | 0,2 | - |
| Склад вороху зібраних коренеплодів, %: | | | |
| – коренеплоди | 95,6 | 92,2 | - |
| – домішки, всього | 6,1 | 6,9 | 8,0 |
| у тому числі: | | | |
| – грунтові домішки: | 2,5 | 3,2 | 5,0 |
| – вільного грунту | 1,5 | 1,8 | - |
| – налиплого грунту на коренеплодах | 1,0 | 1,4 | 1,5 |
| – рослинні домішки: | 3,6 | 3,8 | 3,0 |
| – вільні рослинні домішки | 2,5 | 2,6 | - |
| – залишки гички на головках коренеплодів | 1,1 | 1,2 | 0,5 |
| Пошкодження коренеплодів, %: | | | |
| – всього | 22,5 | 22,5 | 20,0 |
| у тому числі сильно пошкоджених | 11,5 | 11,5 | 9,0 |

Додаток З.1.1
Загальний вигляд пристрою Altivar 71

Додаток З.2.1
Експериментальні дані витрат споживаної потужності
(шнеки круглого перерізу)

Данные: Дані затрат потужності* (11v * 10c)

| | 1 Var1 | 2 Var2 | 3 Var3 | 4 Var4 | 5 Var5 | 6 Var6 | 7 Var7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 100 | 1,15 | 1,95 | 3,1 | 2,75 | 3,9 |
| 2 | 6 | 100 | 1,25 | 2,1 | 3,35 | 2,9 | 4,15 |
| 3 | 7 | 100 | 1,45 | 2,4 | 3,85 | 3,2 | 4,65 |
| 4 | 5 | 150 | 2,15 | 2,15 | 4,3 | 3,3 | 5,5 |
| 5 | 6 | 150 | 2,25 | 2,85 | 5,1 | 3,65 | 5,9 |
| 6 | 7 | 150 | 2,55 | 2,9 | 5,45 | 3,7 | 6,25 |
| 7 | 5 | 200 | 2,45 | 3,25 | 5,7 | 4,15 | 6,5 |
| 8 | 6 | 200 | 2,5 | 3,55 | 6,05 | 4,45 | 6,95 |
| 9 | 7 | 200 | 2,65 | 3,7 | 6,35 | 4,5 | 7,15 |

Фак1 – швидкість руху коренезбиральної машини $\vartheta_M$, км/год.

Фак2 – частота обертання шнека $n_ш$, об/хв.

Фак3 – витрати споживаної потужності очисною гіркою $P_г$, кВт;

Фак4 – витрати споживаної потужності системою шнеків $P_{кш}$, кВт;

Фак5 – сумарні витрати споживаної потужності $\sum P_{(г+кш)}$ очисною гіркою $P_г$ та системою шнеків $P_ш$, кВт;

Фак6 – витрати споживаної потужності комбінованого робочого органу $P_{кр}$, кВт;

Фак7 – сумарні витрати споживаної потужності $\sum P_{kOTTM}$ ОТТМ очисною гіркою $P_г$ та комбінованого робочого органу $P_{кр}$, кВт.

Додаток 3.3.1

Експериментальні дані витрат споживаної потужності (еліпсні шнеки)

Данные: Дані затрат потужності_еліпс (11v * 10c)

| | 1 Var1 | 2 Var2 | 3 Var3 | 4 Var4 | 5 Var5 | 6 Var6 | 7 Var7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 100 | 1,15 | 2,25 | 3,4 | 3,05 | 4,2 |
| 2 | 6 | 100 | 1,25 | 2,4 | 3,65 | 3,2 | 4,45 |
| 3 | 7 | 100 | 1,45 | 2,7 | 4,15 | 3,5 | 4,95 |
| 4 | 5 | 150 | 2,15 | 2,55 | 4,7 | 3,7 | 5,9 |
| 5 | 6 | 150 | 2,25 | 3,15 | 5,5 | 4,05 | 6,3 |
| 6 | 7 | 150 | 2,55 | 3,2 | 5,85 | 4,1 | 6,65 |
| 7 | 5 | 200 | 2,45 | 3,55 | 6,2 | 4,65 | 7 |
| 8 | 6 | 200 | 2,5 | 3,85 | 6,55 | 4,95 | 7,45 |
| 9 | 7 | 200 | 2,65 | 4 | 6,85 | 5 | 7,65 |

Фак1 – швидкість руху коренезбиральної машини $\vartheta_M$, км/год.

Фак2 – частота обертання шнека $n_ш$, об/хв.

Фак3 – витрати споживаної потужності очисною гіркою $P_г$, кВт;

Фак4 – витрати споживаної потужності системою шнеків $P_{еш}$, кВт;

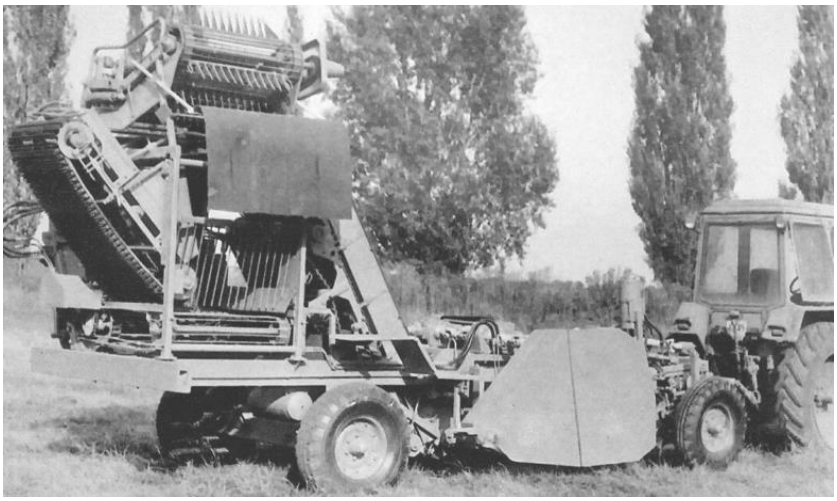
Фак5 – сумарні витрати споживаної потужності $\sum P_{(г+еш)}$ очисною гіркою $P_г$ та системою шнеків $P_{еш}$, кВт;

Фак6 – витрати споживаної потужності комбінованого робочого органу $P_{ер}$, кВт;

Фак7 – сумарні витрати споживаної потужності $\sum P_{еОТТМ}$ ОТТМ очисною гіркою $P_г$ та комбінованого робочого органу $P_{ер}$, кВт.

Додаток 3.4.2

Загальний вигляд серійної коренезбиральної машини МПК-4



Додаток 3.5.2

Довідка про апробацію результатів наукових досліджень

СЕРТИФІКАТ

*виданий*

***Паньків Марії Романівні***

*яка прийняла активну участь у роботі XVII міжнародної наукової конференції*

***«СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЗЕМЛЕРОБСЬКОЇ МЕХАНІКИ»***

*присвяченій 116-річчю з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка на базі Сумського національного аграрного університету*

***17-18 жовтня 2016р.***
***м. Суми***

***Оргкомітет конференції***

Сумський національний аграрний університет
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Продовження додатку 3.5.2

СЕРТИФІКАТ

підтверджує, що

Паньків Марія

взяв (ла) участь у XVIII Міжнародній науковій конференції

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЗЕМЛЕРОБСЬКОЇ МЕХАНІКИ

присвяченій 117-річниці від дня народження академіка
Петра Мефодійовича Василенка
яка відбулася 16-18 жовтня 2017 року у м. Кам'янець-Подільський

Голова оргкомітету, ректор
Подільського державного аграрно-технічного
університету, д.е.н., професор

В.В. Іванишин

State Agrarian University of Moldova

Agricultural Engineering and Auto Transportation

CERTIFICATE

granted to Mr. (Mrs.)

Maria Pankiv

has participated in the International Scientific Symposium
"Achievements and Perspectives in Agricultural Engineering and Auto Transport"
dedicated to the 85th anniversary of the State Agrarian University of Moldova

Dean,
PhD, Associate Professor V. Gorobeț

CHIȘINĂU
OCTOBER 4-6, 2018

Додаток 3.6.2

Довідка про апробацію результатів наукових досліджень

ДОВІДКА
про апробацію результатів наукових досліджень

Довідка видана докторанту кафедри інжинірингу машинобудівних технологій факультету інженерії машин, споруд та технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Паньків Марії Романівни про те, що вона приймала участь у Міжнародних науково-практичних конференціях:

- Міжн. наук.-практ. конф. присвяченої 90-річчю від дня народження професора Рибака Тимофія Івановича та 60-річчю кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин (м. Тернопіль, ТНТУ ім. І. Пулюя, 2022 р.), тема доповіді: «Моделювання – метод оптимізації робочих процесів транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин»;
- Міжн. наук.-техн. конф. до 100-річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя (100-річчя з дня смерті). Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій (м. Тернопіль, ТНТУ ім. І. Пулюя, 2018 р.), тема доповіді: «Детермінована модель процесу відокремлення грунту від коренеплодів»;
- Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій (м. Тернопіль, ТНТУ ім. І. Пулюя, 2017 р.), тема доповіді: «Технологічні аспекти процесу відокремлення домішок від коренеплодів»;
- XV наук.-практ. конф. Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, ТНТУ ім. І. Пулюя, 2012 р.), тема доповіді: «Оптимізаційний синтез компонувальних схем технологічних систем»;
- наук. конф. Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті. (м. Тернопіль, ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011 р.), тема доповіді: «Побудова імітаційної моделі роботи систем масового обслуговування».

Декан факультету інженерії машин,
споруд та технологій,
к.т.н. доцент Роман ЛЕЩУК

Додаток З.7.3

Довідка про апробацію наукових досліджень

**Інститут механіки та автоматики**
**агропромислового виробництва**
**Національної академії аграрних наук України**
**(ІМА АПВ НААН)**

08631, Україна, Київська обл., Фастівський р-н, с-ще Глеваха, вул. Вокзальна, 11/1
www.imaap.org.ua E-mail: ima. apv.naan@gmail.com
тел.066-230-00-41 код ЄДРПОУ 44668713

№ 292 від 29. 07 2024 р.

ДОВІДКА
про апробацію результатів наукових досліджень

Довідка видана докторанту кафедри інжинірингу машинобудівних технологій факультету інженерії машин, споруд та технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Паньків Марії Романівні про те, що результати дисертаційної роботи на тему «Механіко-технологічне моделювання процесів роботи комбінованих очисних систем коренезбиральних машин» було заслухано та обговорено на розширеному засіданні відділу механіко-технологічних проблем овочівництва Інституту механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України, протокол №6 від 19 липня 2024 р.

Завідувач відділу,
кандидат технічних наук,
ст. науковий співробітник Ігор САВЧЕНКО

Продовження додатку 3.7.3

**ЗАТВЕРДЖУЮ**
Директор ІМА АПВ НААН
доктор технічних наук, професор,
академік НААН України
_____ Валерій АДАМЧУК
«19» липня 2024 р.

**ВИСНОВОК**

про дисертаційну роботу докторанта кафедри інжинірингу машинобудівних технологій факультету інженерії машин, споруд та технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Паньків Марії Романівни на тему «Механіко-технологічне моделювання процесів роботи комбінованих очисних систем коренезбиральних машин», поданої на здобуття наукового ступеня доктор технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва

**ВИТЯГ**

із протоколу № 6 розширеного засідання відділу механіко-технологічних проблем овочівництва Інституту механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України
від 19 липня 2024 року

**Присутні:** Адамчук В. В., д.т.н. (спеціальність 05.05.11), професор, академік НААН України, директор інституту; Савченко І. Ф., к.т.н., зав. відділу; Мироненко В. Г., д.т.н. (спеціальність 05.05.11), професор; Вожик Ю. Г., д.т.н. (спеціальність 05.05.11); Степаненко С. П., д.т.н. (спеціальність 05.05.11); Головач І. В., д.т.н. (спеціальність 05.05.11), професор; Підгурський М. І., д.т.н. (спеціальність 05.05.11), професор; Барановський В. М., д.т.н. (спеціальність 05.05.11), професор; Грицишин М. І., к.т.н., заст. директора, учен. секретар вченої ради.; Борис А. М., к.т.н., заст. директора з наукової роботи.; Кузьменко В. Ф., к.т.н.; Приєжний В. Г., к.т.н.; Корнюшин В. М., к.т.н.; Рихлівський П. А., к.т.н.; Паньків М. Р., к.т.н., доцент; Панасюк В. І., н.с.; Крупич С. О., н.с.; Сахневич В. Г., н.с.

Всього 18 чоловік. З присутніх – 7 докторів технічних наук та 4 кандидати технічних наук – фахівці за профілем представленої дисертації.

Голова засідання – завідувач відділу механіко-технологічних проблем овочівництва Савченко Ігор Феодосійович, к.т.н., ст.н.с.

**ПОРЯДОК ДЕННИЙ**: Обговорення дисертаційної роботи Паньків Марії Романівни на тему «Механіко-технологічне моделювання процесів роботи комбінованих очисних систем коренезбиральних машин», поданої на здобуття наукового ступеня доктор технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва.

Науковий керівник, професор кафедри інжинірингу машинобудівних технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, доктор технічних наук, професор Підгурський Микола Іванович.

**СЛУХАЛИ:** доповідь докторанта Паньків М. Р. про основні положення дисертаційної роботи на тему «Механіко-технологічне моделювання процесів роботи комбінованих очисних систем коренезбиральних машин», яку подано на здобуття наукового ступеня доктор технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва.

По доповіді, докторанту Паньків М.Р. було задано 27 запитань, на які доповідач надав правильні та грунтовні відповіді й пояснення.

**Питання задавали:**

Вожик Ю.Г., д.т.н., Кузьменко В.Ф., к.т.н., Головач І.В., д.т.н., Степаненко С.П., д.т.н., Мироненко В.Г., д.т.н., Борис А.М., к.т.н., Присяжний В.Г., к.т.н., Адамчук В.В., д.т.н.

**ВИСТУПИЛИ:** Мироненко В.Г., д.т.н., Головач І.В., д.т.н., Вожик Ю.Г., д.т.н., Адамчук В.В., д.т.н., Савченко І.Ф., к.т.н.

**ПОСТАНОВИЛИ:**

За результатами розгляду і обговорення дисертаційної роботи Паньків Марії Романівни на тему «Механіко-технологічне моделювання процесів роботи комбінованих очисних систем коренезбиральних машин», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва, рекомендувати до подальшого прилюдного захисту на засіданні спеціалізованої вченої ради.

## ВИСНОВОК

**1. Актуальність теми досліджень.**

Запропонована концепція переходу до ефективного післявоєнного відновлення та розвитку промисловості України передбачає впровадження стратегічних підходів до нарощування виробництва різнопланової сільськогосподарської продукції, в тому числі крупних коренеплодів – цукрових і кормових буряків, коренеплодів цикорію, які є цінними енергонакопичувальними культурами, а її переробка забезпечує отримання харчових (цукор, спирт, соковиті корми, інуліни для медицини) й технічних (відновлювальні джерела енергії – біопаливо) продуктів.

Для якісного вирішення науково-технічної проблеми підвищення агротехнологічних показників якості збирання крупних коренеплодів у складних умовах роботи прийнято наукову гіпотезу, реалізація якої забезпечить інтенсифікацію процесу відокремлення домішок від коренеплодів шляхом розроблення конструктивно-технологічної схеми та оптимізації раціональних параметрів робочих органів очисних систем коренезбиральних 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 є подальшим кроком у розвитку аграрної науки як на теоретичному, так і емпіричному рівні.

**2 Ступінь достовірності результатів проведених досліджень, висновків та рекомендацій, що викладені у дисертації.**

Достовірність результатів проведених досліджень і загальних висновків дисертації підтверджена результатами аналітичних та експериментальних досліджень, проведених на основі:

- математичного та фізичного моделювання технологічного процесу переміщення домішок і коренеплодів робочими поверхнями очисних систем коренезбиральних машини і методів вирішення інтегрально-диференціальних рівнянь з використанням основних положень аналітичної механіки, теорії машин і механізмів, теорії пружності та вищої математики, з використанням стандартних та спеціальних методик;

- реалізації пошукових експериментів на основні положень методології математичного планування та методів проведення факторних планованих експериментів.

- використанням методів математичної статистики для обробки даних експериментів, графічного відтворення результатів досліджень з застосування прикладних програм для персонального комп'ютера.

- підтвердження результатів виробничими перевірками та випробуваннями.

Продовження додатку 3.7.3

**3 Новизна результатів, отриманих автором дисертації:**

За результатами проведених досліджень визначено комплексні наукові засади основних напрямків підвищення ефективності збирання крупних коренеплодів у різних ґрунтово-кліматичних умовах шляхом інтенсифікації процесів відокремлення домішок від коренеплодів й новітні концептуальні принципи розроблення та оптимізації параметрів робочих органів очисних систем.

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.

**4 Практична цінність роботи.**

Розроблено та експериментально обґрунтовано удосконалені конструкції очисних систем коренезбиральних машин, застосування яких у складі коренезбиральних машин у виробничих умовах дозволило підвищити технологічну ефективність або показники якості збирання крупних коренеплодів. 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.

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).

Річний економічний ефект від застосування очисних систем у складі коренезбиральної машини складає 188482,6 грн.

**5 Апробація роботи та повнота викладу матеріалів дисертації в друкованих працях**

Основні результати досліджень, представлені в дисертації, обговорено та схвалено на 15 міжн. наук.-практичних конференціях, опубліковано у 72 наукових працях, із них – 4 статті у рецензованих періодичних виданнях, цитованих у наукометричній базі Scopus, 3 монографії – у співавторстві, 26 статей – у фахових виданнях України, 3 статті – в закордонному періодичному рецензованому виданні країни ОЕСР, 2 статті – у періодичних виданнях інших зарубіжних країн, 15 тез наукових конференцій, 18 патентів України на корисні моделі.

**6 Впровадження результатів досліджень.**

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); компанії ПАП «Агропродсервіс» (Тернопільська обл., с. Настасів); в Хмельницькій державній сільськогосподарській дослідній станції інституту кормів та сільського господарства Поділля Національної академії аграрних наук України (Хмельницька обл., с. Самчики).

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 систем коренезбиральних машин застосовано під час виконання практичних і лабораторних робіт на кафедрі технічної механіки та сільськогосподарських машин ТНТУ ім. І. Пулюя студентами освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування.

**УХВАЛИЛИ:** враховуючи актуальність теми досліджень, обґрунтованість отриманих результатів, наукову новизну та практичне значення виконаних досліджень, впровадження їх у виробництво, достатню повноту викладених матеріалів дисертації в опублікованих працях, відповідність дисертації вимогам «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», яку затверджено постановою Кабінету Міністрів України № 1197 від 17 листопада 2021 р. рекомендувати дисертаційну роботу Паньків Марії Романівни на тему «Механіко-технологічне моделювання процесів роботи комбінованих очисних систем коренезбиральних машин» до захисту на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва.

| | |
|---|---|
| Голова засідання, к.т.н., с.н.с., завідувач відділу | Ігор САВЧЕНКО |
| Д.т.н., проф., завідувач відділу | Валентин МИРОНЕНКО |
| Секретар, к.т.н., с.н.с. | Петро РИХЛИЦЬКИЙ |

Додаток З.8.3

Довідка про впровадження результатів наукових досліджень

**МІНІСТЕРСТВО АГРАРНОЇ ПОЛІТИКИ ТА ПРОДОВОЛЬСТВА УКРАЇНИ**
**ДЕРЖАВНА НАУКОВА УСТАНОВА**
**УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ**
**ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ ТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ**
**ДЛЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА**
**ІМЕНІ ЛЕОНІДА ПОГОРІЛОГО**
**(УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого)**

**ЛЬВІВСЬКА ФІЛІЯ**

**вул. Л. Мартовича,15, смт. Магерів, Львівський р-н, Львівська обл., 80327, тел.: 8-032-52-46-235**

**E-mail: lfilia@ukr.net Код ЄДРПОУ 33894357**

**11.11.23** №_____

на №_____від_____

ДОВІДКА

Видана докторанту кафедри інжинірингу машинобудівних технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Паньків Марії Романівні про те, що в період з 17.10 по 22.10. 2022 р. та в період з 23.10 по 28.10.2023 р. були проведені порівняльні польові експериментальні дослідження з визначення показників якості збирання коренеплодів цукрових буряків причіпною коренезбиральною машиною МПК-4, яку було обладнано очисним транспортно-технологічним модулем. Очисник складався з похилого транспортера, очисної гірки, в нижньому сході якої було встановлено комбінований робочий орган, який являє собою систему шнеків над якими встановлено приводний вал з очисними пружними елементами.

Акт результатів польових порівняльних досліджень удосконаленої та базової машини додається.

Директор Львівської філії
УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого Москаленко О.Д.

Додаток 3.9.3

Довідка про впровадження результатів наукових досліджень

**Національна академія аграрних наук України**
**Хмельницька державна сільськогосподарська дослідна станція Інституту кормів та сільського господарства Поділля**
**Державне підприємство Дослідне господарство «Самчики»**
**31182, Україна, с.Самчики, Старокостянтинівський район, Хмельницька область**
**тел. (03854) 44-273, факс (03854) 44-183, e-mail: dpdg_samchuku@ukr.net**

***№ 18*** ***16 листопада 2021 р.***

**ДОВІДКА**

**Видана докторанту кафедри інжинірингу машинобудівних технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Паньків Марії Романівни про те, що результати наукових дисертаційних досліджень впроваджено під час проведення порівняльних польових експериментальних досліджень процесу збирання коренеплодів цикорію причіпною трирядною коренезбиральною машиною в період з 17.10 по 26.10 2020 р. та в період з 16.10 по 25.10. 2021 р., яку було обладнано очисним транспортно-технологічним модулем. Було отримано такі показники якості роботи відокремлення компонентів домішок від коренеплодів, відповідно, базова/модернізована: загальних домішок – 6,9%/6,1%; грунтових домішок – 3,2%/2,5%; вільного грунту – 1,8%/1,5%; налиплого грунту на коренеплодах – 1,4%/1,0%. ОТТМ являв собою горизонтальний**

**Від Учасника:**

**Директор ДП «ДГ «Самчики» ХДСГДС ІКСГП НААН»** _____ **Ю.М. Вовколуп**
**підпис**

**М.П.**

Додаток 3.10.3

Довідка про впровадження результатів наукових досліджень

ПРИВАТНЕ АГРОПРОМИСЛОВЕ ПІДПРИЄМСТВО
АГРОПРОДСЕРВІС
47734, Тернопільська область, Тернопільський район, с.Настасів, тел./факс (0352) 49-80-32, 42-52-70.
р/р 260059721 АТ ТОД «Райфайзен Банк Аваль» МФО 338501 ЄДРПОУ 30356854

**ДОВІДКА**

Видана докторанту кафедри інжинірингу машинобудівних технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Паньків Марії Романівни про те, що результати наукових дисертаційних досліджень впроваджено в виробничий процес підприємства для приготування кормів для сільськогосподарських тварин – удосконалена конструкція транспортно-очисної системи застосовувалась в технологічній лінії попередньої підготовки коренеплодів кормових буряків до їх переробки, де відбувалося остаточне очищення кормових буряків від грунтових і рослинних домішок.

Транспортно-очисна система з рекомендованими параметрами робочих органів складалася з похилого транспортера, очисної гірки, системи шнеків, над якими встановлено горизонтальний приводний вал з очисними пружними елементами.

Директор
ПАП «Агропродсервіс» _____ І.В. Карачка

Додаток З.11.3

Довідка про впровадження результатів дослідження в навчальний процес

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
**ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
**імені ІВАНА ПУЛЮЯ**
вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001. Тел. (0352)52-41-81. Факс (0352)25-49-83
http://www.tntu.edu.ua, E-mail: univ@tu.edu.te.ua. Код ЄДРПОУ 05408102

11.06.2024 №2/28-237 На № від

ДОВІДКА
про впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес

Даною довідкою стверджується, що результати дисертаційної роботи Паньків Марії Романівни на тему: «Механіко-технологічне моделювання процесів роботи комбінованих очисних систем коренезбиральних машин» за спеціальністю 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва впроваджено в навчальну програму під час викладання дисципліни «Сільськогосподарські машини: конструкції та розрахунок»: будова, принцип роботи та теоретичні основи розрахунку основних параметрів робочих органів очисного транспортно-технологічного модуля коренезбиральних машин застосовано під час виконання практичних і лабораторних робіт на кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машини Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя для підготовки освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування.

Проректор з наукової роботи
Тернопільського національного технічного
університету імені Івана Пулюя,
д.т.н., професор Павло МАРУЩАК

Завідувач кафедри технічної механіки
та сільськогосподарських машин
Тернопільського національного технічного
університету імені Івана Пулюя,
д.т.н., професор Андрій БАБІЙ