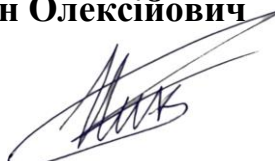


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Никифоров Антон Олексійович



УДК 631.362.3-26

**ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ
ВІБРОФРИКЦІЙНОГО СЕПАРАТОРА ДРІБНОНАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ**

Спеціальність 05.05.11 – Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Кропивницький – 2024

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному біотехнологічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук
Галич Іван Васильович,
Державний біотехнологічний університет,
доцент кафедри мехатроніки, безпеки
життєдіяльності та управління якістю.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший
дослідник
Алієв Ельчин Бахтияр огли
Дніпровський державний аграрно-економічний
університет, професор кафедри інжинірингу
технічних систем;

доктор технічних наук, професор
Алфьоров Олексій Ігорович
Виконуючий обов'язки директора Інституту
овочівництва і баштанництва НААН.

Захист відбудеться 29 листопада 2024 р. об 11.00 годині на засіданні спеціалізованої ради Д 23.073.01 при Центральноукраїнському національному технічному університеті за адресою: 25030, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

З дисертацією та авторефератом можна ознайомитись у бібліотеці Центральноукраїнського національного технічного університету за адресою: 25030, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

Автореферат розісланий 25 жовтня 2024 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 23.073.01



Каліч В.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Важливою задачею агропромислового виробництва слід вважати забезпечення підприємств різних форм власності якісним посівним матеріалом для одержання високих врожаїв сільськогосподарських культур. Це завдання узгоджується з цілями та задачами, що сформульовано у: законі України «Про стимулювання розвитку вітчизняного машинобудування для агропромислового комплексу» N 5478-VI (5478-17) від 06.11.2012 р.; постанові Кабінету Міністрів України № 556 від 23.08.2016 р. «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2024 року»; плані дій затвердженого Міністерством аграрної політики та продовольства України «Стратегічні напрями розвитку сільського господарства України на період до 2024 року»; проєкті ЄС «Підтримка впровадження сільськогосподарської та продовольчої політики в Україні»; регіональній програмі «Стратегія сталого розвитку Харківської області до 2024 року».

Для підвищення якості насінневого матеріалу здійснюється його очистка від домішок та сепарація на фракції. Аналізом досліджень процесів сепарації встановлено перспективність застосування у технологічних лініях віброфрикційних сепараторів. Віброфрикційні насінневі сепаратори (ВФНС) є дешевим та ефективним засобом розділення дрібнонасінневих матеріалів (деякі овочеві, лікарські культури та інші) за сукупністю геометричних (форма та розміри), фізичних (коефіцієнт тертя) та механічних (твердість, пружкість, маса, моменти інерції) властивостей насінин різних фракцій. Але у відомих роботах недостатньо вивчено процес віброфрикційної сепарації таких культур з урахуванням аеродинамічних властивостей насінин. Досить обмежено досліджено вплив на кінематичні параметри руху насінневого матеріалу аеродинамічних ефектів, що виникають внаслідок взаємодії робочих органів ВФНС з повітряним середовищем. При нарощуванні продуктивності ВФНС за рахунок застосування блоків робочих поверхонь, сусідні робочі поверхні утворюють плоскі канали, на гранях яких виникає знакозмінний тиск та швидкість повітря внаслідок синхронних коливань поверхонь при роботі ВФНС. Знакозмінний повітряний потік, обтікаючи насінини, викликає виникнення на їх криволінійних поверхнях аеродинамічних сил та їх моментів. Внаслідок цього змінюється кінематика віброфрикційного руху насінин різних фракцій. Збільшуються кути розкриття та перекриття секторів можливих траєкторій насіння різних фракцій. Погіршується якість розділення насінневого матеріалу.

Для усунення негативного впливу знакозмінного потоку доцільно застосовувати аеродинамічні екрани, якими треба оснащати робочі блоки ВФНС. За рахунок застосування екранів зменшується, аж до повного усунення, виникнення знакозмінних швидкостей та перепадів тиску на гранях області повітря між робочими поверхнями блоку ВФНС. Також на поле швидкостей та тиску повітря у робочій області впливають конструктивно-режимні параметри ВФНС (амплітуда коливань, вертикальний зазор між робочими поверхнями блоку). Таким чином, підвищення ефективності процесу сепарації насінневих

матеріалів дрібнонасіньєвих культур, чутливих до дії повітряного потоку, на ВФНС та обґрунтування його конструктивно-режимних параметрів, є актуальною та перспективною науково-прикладною задачею для агропромислового виробництва.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота є частиною науково-дослідних держбюджетних тем Державного біотехнологічного університету: «Розробка та удосконалення мехатронних машино-технологічних систем, що відповідають вимогам ергономіки, технічної естетики та охорони праці для механізованого виробництва сільськогосподарської продукції на основі енергозберігаючих та економічно безпечних технологій» (ДР № 0123U101678, 2023-2025 рр.).

Наукова гіпотеза. Усунення можливості виникнення знакозмінного повітряного потоку всередині області між паралельними робочими поверхнями блоку ВФНС при його роботі за рахунок оснащення блоку аеродинамічним екраном.

Мета дослідження: підвищення ефективності процесу вібросепарації насінньєвих матеріалів дрібнонасіньєвих культур шляхом обґрунтування раціональних конструктивно-режимних параметрів роботи ВФНС з аеродинамічним екраном.

Задачі дослідження:

– дослідити механізм впливу знакозмінного повітряного потоку на процес вібросепарації насіння з виразними аеродинамічними властивостями;

– розробити математичну модель та чисельний алгоритм розрахунку кінематичних параметрів безвідривного віброфрикційного руху насіння з урахуванням процесів: створення знакозмінного повітряного потоку в середині робочого блоку ВФНС; виникнення аеродинамічних сил та моментів на поверхнях насінин; суперпозиції аеродинамічних і механічних сил при вібраційному русі насіння;

– з використанням розробленої математичної моделі дослідити вплив знакозмінного повітряного потоку на кінематичні параметри безвідривного віброфрикційного руху та ефективність розділення насіння дрібнонасіньєвих культур залежно від конструктивно-режимних параметрів ВФНС. Перевірити адекватність отриманих результатів за допомогою натурального експерименту;

– обґрунтувати конструктивно-режимні параметри ВФНС з аеродинамічним екраном за критерієм мінімізації або виключення впливу знакозмінного повітряного потоку на процес вібросепарації;

– провести експериментальні випробування з насінням пастернаку за умов використання удосконаленого ВФНС, який оснащений аеродинамічним екраном.

Об'єкт дослідження: процес віброфрикційного руху насіння з урахуванням дії аеродинамічних сил та моментів, його зв'язок з конструкцією аеродинамічного екрану, блоку робочих поверхонь та режимом роботи ВФНС.

Предмет дослідження: закономірності впливу конструкції блоку робочих поверхонь та аеродинамічного екрану ВФНС, режиму коливань на кінематичні параметри руху насіння під впливом вібрації та руху повітря.

Методи дослідження: в роботі використано методи класичної механіки, механіки суцільного середовища, аналізу та синтезу, математичного моделювання, математичної статистики, розв'язку систем нелінійних диференціальних рівнянь. Для розв'язання математичної моделі динаміки віброфрикційного руху насінини застосовано чисельні методи. Експериментальні дослідження проведено із застосуванням чисельного, фізичного моделювання та випробувань, які виконані в лабораторних умовах. Математичне моделювання, теоретичні дослідження та обробка результатів наукових досліджень виконані з використанням програмного забезпечення GNU Octave, PAST, Matlab та Microsoft Office.

Наукова новизна одержаних результатів.

Вперше:

– встановлено залежність впливу знакозмінного повітряного потоку на якість вібросепарації насіннєвих матеріалів пастернаку, кропу запашного та салату листового залежно від вертикального зазору між робочими поверхнями блоку ВФНС, амплітуди коливань, висоти перекриття вертикальної стінки аеродинамічного екрану та його відстані від торцю блоку робочих поверхонь;

Отримало подальший розвиток:

– уявлення основних закономірностей та зв'язків процесу віброфрикційного безвідривного руху насіння об'ємної форми по нахиленій шорсткій поверхні робочого блоку, де, на відміну від відомих підходів, враховується вплив аеродинамічних сил і моментів, що діють на насіння, а також геометричних характеристик, амплітуди коливань робочого блоку ВФНС і конструкційних параметрів аеродинамічного екрану;

Удосконалено:

– спосіб оцінки аеродинамічних сил та моментів, що діють на насіння визначеної геометричної форми, залежно від параметрів повітряного потоку у просторі між робочими поверхнями блоку ВФНС та положення насінини у цьому просторі;

– метод оцінки параметрів повітряного потоку у просторі між робочими поверхнями блоку ВФНС залежно від амплітуди коливань, зазору між робочими поверхнями та конструкційних параметрів аеродинамічного екрану.

Практичне цінність і реалізація результатів роботи. Розроблено інженерну методику з оцінки прогнозного рівня впливу знакозмінного повітряного потоку на якість вібросепарації насіннєвих матеріалів визначених рослинних культур, рекомендації щодо раціональних конструктивно-режимних параметрів ВФНС з аеродинамічним екраном, які передано на ПрАТ «Карлівський машинобудівний завод» для використання при проведенні дослідно-конструкторських і науково-дослідних робіт з удосконалення технології вібросепарації насіння з виразними аеродинамічними властивостями. За рахунок модифікації ВФНС, шляхом перекриття блоку робочих площин аеродинамічним екраном, отримано збільшення на 3%, порівняно зі звичайним ВФНС, середньозваженого показника сортової чистоти кондиційної частки вихідного насіннєвого матеріалу пастернаку: з 95,5% до 98,5%. При цьому частка некондиційного матеріалу знизилась на 37%: з 44% до 7% від загального обсягу

матеріалу. Також ВФНС з екраном, на відміну від звичайного сепаратору, дозволив виділити фракції насіння, які належать групам оригінального, елітного та репродуктивного насіння, в той час як обробка на звичайному ВФНС виділяла тільки групу репродуктивного насіння.

Особистий внесок здобувача полягає у проведенні аналізу процесу сепарації дрібнонасінного матеріалу на вібраційних сепараторах, формулюванні мети і задач досліджень, розробленні методики, проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, аналізі їх результатів, обґрунтуванні раціональних конструктивно-режимних параметрів роботи ВФНС з аеродинамічним екраном.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації пройшли апробацію і отримали позитивні оцінки на міжнародних науково-практичних конференціях: Commission of motorization and energetics in agriculture An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery (Lublin – Rzeszow 2013), «Технічний прогрес в АПВ» (Харків, ХНТУСГ, 2017-2020 рр.); «Молодь і технічний прогрес в АПВ» (Харків, ХНТУСГ, 4 квітня 2019 р.); всеукраїнська НПК «Оптимізація технічних та технологічних систем агровиробництва» (Харків, ХНТУСГ, 18-19 квітня 2019 р.); Science and education: problems, prospects and innovations: the 1 st International scientific and practical conference (Kyoto, 7-9 жовтня 2020); «Експлуатаційна та сервісна інженерія» (Харків, ХНТУСГ, 15-16 жовтня 2020 р.); «Сучасні проблеми землеробської механіки» присвяченої 90-річчю Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка та 120-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка (Харків, 17-18 жовтня 2020 р.); сучасна інженерія агропромислових харчових виробництв (Харків, 24–25 листопада 2022 року) Матеріали XIX міжнародного форуму молоді "Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті" (Харків, 06-07 квітня 2023 р.); міжнародна науково-практична конференція «Технічний прогрес в АПВ» (Харків, 9-10 травня 2023 р.); всеукраїнська науково-практична конференція «Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання сільськогосподарської продукції» (Кропивницький, 21 квітня 2024 р.); міжнародна науково-практична конференція «Технічний прогрес в АПВ» (Харків, 21-22 травня 2024 р.); всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Новітні технології в АПК: проблеми та перспективи впровадження» (Полтава, 27-28 червня 2024 р.).

В повному обсязі дисертаційна робота обговорювалась та позитивно схвалена на науковому семінарі «Науково-технічної ради» факультету мехатроніки та інжинірингу Державного біотехнологічного університету (Харків, 21 березня 2024 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 32 наукових працях, у тому числі: 14 статей у спеціалізованих наукових виданнях України (з них 4 статті у виданні, що включено до міжнародної науково-метричної бази даних Scopus); 2 публікації у закордонному виданні; 15 тез у збірниках доповідей наукових конференцій, отримано 3 патенти.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації

складає 268 сторінок, у тому числі 10 додатків на 64 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 170 сторінок, 78 рисунків та 20 таблиць. Список використаних джерел нараховує 148 найменувань на 19 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано гіпотезу, мету, завдання, об'єкт і предмет досліджень, описано використані методи і методики досліджень та зв'язок роботи з науковими програмами, визначено наукову новизну і практичну цінність, наведено дані щодо апробації основних положень дисертаційного дослідження та загальна характеристика роботи.

В першому розділі «Аналіз результатів наукових досліджень щодо підвищення ефективності вібросепарації дрібнонасінневих матеріалів» проведено аналіз та узагальнено науково-технічну літературу за темою дисертаційного дослідження.

Задачі підвищення ефективності вібросепарації дрібнонасінневих матеріалів вирішували: Заїка П.М., Манчинський Ю.О., Василенко П.М., Козаченко О.В., Степаненко С.П., Алієв Е.Б., Алфьоров О.І., Бакум М.В., Сичов В.В., Лук'яненко В.М., Завгородній О.І., Галич І.В., Котов Б.І., Тіщенко Л.М., Гончаров Є.С., Харченко С.О., Бредихін В.В., Васильковський О.М. та ін. Цими науковцями досліджено технологічний процес сепарації дрібнонасінневого матеріалу на вібраційних сепараторах, виявлено, що ступінь впливу динаміки повітряного потоку на робочий процес значною мірою пов'язаний з конструкцією та режимом роботи технічного засобу. Встановлено, що процес вібросепарації насіння з виразними аеродинамічними властивостями (пастернак, кріп, салат листовий, та ін.) є неефективним при підвищенні продуктивності ВФНС (збільшення амплітуди коливань, використання блоків робочих поверхонь), оскільки, це разом з позитивним збільшенням інтенсивності механічних впливів, також збільшує негативні аеродинамічні впливи на насіння, що призводить до істотного погіршення розділення фракцій насінневого матеріалу та значно збільшується частка відходів.

Підвищити ефективність процесу сепарації такого насінневого матеріалу при використанні ВФНС вдається за рахунок застосування аеродинамічних екранів, що зменшують періодичний повітряний потік всередині блоків робочих поверхонь.

Аналіз наукових джерел щодо урахування впливу аеродинамічного фактору, які представляють результати, де: розглядається плоский випадок руху; вплив аеродинамічних сил та моментів представлений лише дією сили аеродинамічного опору (перенесення насіння повітрям) без урахування дії бокових аеродинамічних сил (викривлення траєкторії віброфрикційного руху); не розглядають режим безвідривного віброфрикційного руху, який є найбільш доцільним для обробки дрібно-насінневих матеріалів.

Отже, провівши аналіз результатів наукових досліджень щодо підвищення ефективності процесу вібросепарації дрібнонасінневих матеріалів, встановлено,

що залишається не вирішеною задачею зниження впливу просторового руху повітря між робочими поверхнями ВФНС за умов використання безвідривних режимів руху насіння з виразними аеродинамічними властивостями.

В другому розділі «Теоретичні дослідження віброфрикційного безвідривного руху насіння з урахуванням дії аеродинамічних сил і моментів» виконано аналіз впливу режимів роботи ВФНС, конструкції її робочих блоків та аеродинамічного екрану на параметри тривимірного руху повітря у просторі між робочими поверхнями, кінематичні параметри віброфрикційного руху дрібного насіння.

Для оцінки аеродинамічних сил та моментів, що діють на насінину об'ємної форми, використано відому аналітичну методику для визначення аеродинамічних характеристик плоских аеродинамічних профілів. Насінина розглянута як сукупність плоских аеродинамічних профілів (перерізів), які паралельні вектору швидкості повітряного потоку (рис. 1). Для кожного плоского перерізу визначаються коефіцієнти аеродинамічних сил та моментів на підставі результатів продувок близьких до отримуваних перерізів аеродинамічних профілів з встановленими геометричними характеристиками при заданих критеріях подоби. В якості геометричних характеристик профілів-перерізів розглядається: відносна кривизна профіля $\bar{f} = f/b$; відносна товщина $\bar{c} = c/b$, відносна абсциса кривизни профіля $\bar{x}_f = x_f/b$, де b – хорда профіля; c – товщина профіля (рис. 2). В якості критеріїв подоби використано: число Рейнольдса, Re , та число Маха, M .

Загальна аеродинамічна сила і аеродинамічний момент визначаються шляхом підсумовування елементарних аеродинамічних сил і моментів за створеними плоскими перерізами:

$$R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{L/\Delta l} R_i, \quad M_{z_{\Sigma}} = \sum_{i=1}^{L/\Delta l} M_{z_i}, \quad (1)$$

$$R_i = C_{R_i} \left(\rho V^2 / 2 \right) \cdot [\tilde{S}^M], \quad M_{z_i} = C_{m_i} \left(\rho V^2 / 2 \right) \cdot [\tilde{S}^M] \cdot b_i, \quad (2)$$

$$C_{R_i} = \sqrt{C_{X_i}^2 + C_{Y_i}^2}, \quad (3)$$

$$C_{m_i} = -(C_{Y_i} \cos \alpha_i + C_{X_i} \sin \alpha_i) \cdot \bar{x}_{T_i}, \quad (4)$$

де R, M_{z_i} – аеродинамічна сила і аеродинамічний момент, що діють на i -ий елементарний профіль-переріз; $[\tilde{S}]^M$ – ймовірний мідалевий переріз насінини; b_i – хорда i -го елементарного профілю; ρ – щільність повітря; V – швидкість повітряного потоку; L – довжина насінини уздовж осі, яка перпендикулярна вектору швидкості V , Δl – заданий крок просування уздовж осі L ; $\bar{x}_{T_i} = x_{T_i}/b_i$ – відносна абсциса центру тиску i -го профілю. Для розрахунків приймається $\bar{x}_{T_i} = 0,25$; C_{R_i}, C_{m_i} – коефіцієнти аеродинамічної сили та кабіруючого моменту у зв'язаній системі координат насінини; C_{X_i}, C_{Y_i} – коефіцієнти сили аеродинамічного опору та підйомної сили, що діють на насінину у швидкісній системі координат. Дані коефіцієнти визначаються на підставі продувок профілів з подібними геометричними характеристиками при встановлених кутах атаки; α_i – кут атаки для i -го профілю-перерізу (кут між вектором швидкості повітря і будівної віссю профіля).

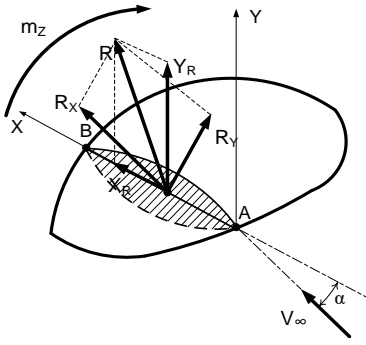


Рисунок 1 – Розрахункова схема для визначення аеродинамічних сил і моментів з використанням перерізів

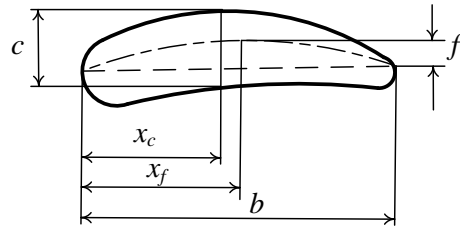


Рисунок 2 – Геометричні характеристики профілю-перерізу

При розробці оригінальної методики визначення параметрів тривимірного руху повітря в області між двома паралельними робочими площинами, що синхронно коливаються, використано газодинамічну модель ідеального газу, яка включає рівняння Ейлера та співвідношення нерозривності суцільного середовища.

Для розв'язання системи рівнянь газодинаміки здійснено її подання у вигляді крайової задачі з кінцево-різницевою формою запису системи диференціальних рівнянь газодинаміки (5) та визначеними крайовими умовами (6) – (10) для області повітря Ξ (рис. 3), що знаходиться між двох робочих поверхонь блоку ВФНС.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2h} \mathbf{B}_{(i+1),j,k,(\tau-1)} \mathbf{Q}_{(i+1),j,k,\tau} + \frac{1}{2l} \mathbf{C}_{i,(j+1),k,(\tau-1)} \mathbf{Q}_{i,(j+1),k,\tau} + \\ & + \frac{1}{2z} \mathbf{D}_{i,j,(k+1),(\tau-1)} \mathbf{Q}_{i,j,(k+1),\tau} + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{I} \mathbf{Q}_{i,j,k,\tau} - \frac{1}{2h} \mathbf{B}_{(i-1),j,k,(\tau-1)} \mathbf{Q}_{(i-1),j,k,\tau} - \\ & - \frac{1}{2l} \mathbf{C}_{i,(j-1),k,(\tau-1)} \mathbf{Q}_{i,(j-1),k,\tau} - \frac{1}{2z} \mathbf{D}_{i,j,(k-1),(\tau-1)} \mathbf{Q}_{i,j,(k-1),\tau} = \mathbf{F} + \frac{1}{\Delta t} \mathbf{I} \mathbf{Q}_{i,j,k,(\tau-1)}, \end{aligned} \quad (5)$$

де $\mathbf{I} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$; $\mathbf{B} = \begin{vmatrix} u & 0 & 0 & c^2 \\ 0 & u & 0 & 0 \\ 0 & 0 & u & 0 \\ 1 & 0 & 0 & u \end{vmatrix}$; $\mathbf{C} = \begin{vmatrix} v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v & 0 & c^2 \\ 0 & 0 & v & 0 \\ 0 & 1 & 0 & v \end{vmatrix}$; $\mathbf{D} = \begin{vmatrix} w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & w & c^2 \\ 0 & 0 & 1 & w \end{vmatrix}$;

$\mathbf{Q} = \begin{vmatrix} u \\ v \\ w \\ p/\rho c^2 \end{vmatrix}$; $\mathbf{F} = \begin{vmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \\ 0 \end{vmatrix}$; u, v, w – проєкції швидкості повітря для елемента області Ξ ;

c – швидкість звуку; p, ρ – тиск та щільність повітря у визначеному елементі Ξ .

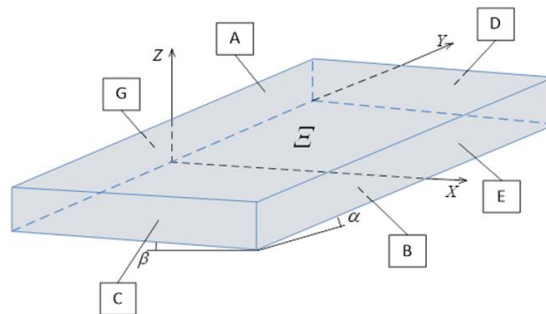


Рисунок 3 – Схема для визначення меж області повітря, що знаходиться між двома робочими поверхнями блоку ВФНС

$$V^B(t)/_{C,D,E,G} = -V^K(t), \quad (6)$$

$$p^B/_{C,D,E,G} = p^{\text{атм.}}, \quad (7)$$

$$V^B(t)/_{A,B} = 0, \quad (8)$$

$$p^B/_{A} = p^{\text{атм.}} + \rho \frac{V^K(t)^2}{2} (-\text{sign}(V_Z^K(t))), \quad (9)$$

$$p^B/_{B} = p^{\text{атм.}} + \rho \frac{V^K(t)^2}{2} \text{sign}(V_Z^K(t)), \quad (10)$$

де $V^K(t)$ – швидкість коливань робочого органу ВФНС, $p^{\text{атм.}}$ – атмосферний тиск; $V^{\text{п}}(t)/_{C,D,E,G}$, $V^{\text{п}}(t)/_{A,B}$ – відповідно, швидкість повітря у точках граней C, D, E, G та A, B області Ξ ; $p^{\text{п}}/_{C,D,E,G}$, $p^{\text{п}}/_{A}$, $p^{\text{п}}/_{B}$ – тиск повітря на визначених гранях області Ξ .

Отриману систему алгебраїчних рівнянь розв'язано методом прогонки для тривимірного випадку. Створено чисельний алгоритм, на підставі якого досліджено вплив конструктивно-режимних параметрів ВФНС з аеродинамічним екраном на поле швидкостей та тиску всередині області між робочими поверхнями блоку. Встановлено, що:

- зменшення відстані між робочими поверхнями (від 16 до 8 мм) призводить, до незначного (до 15%) зменшення знакозмінних швидкостей повітряного потоку (рис. 2 а), далі (для відстані 4 мм, рис. 4 б) швидкості різко зменшуються в межах 40÷60%;

- при зростанні амплітуди коливань відбувається пропорційне збільшення відносних швидкостей повітря (рис. 5 а, б);

- при збільшенні висоти вертикальної стінки екрану відбувається суттєве зменшення знакозмінних швидкостей повітря у порівнянні з полем швидкостей без екрану (при перекритті вертикальною стінкою зазору між робочими поверхнями на 110% - швидкості повітря зменшуються на 95÷100%).

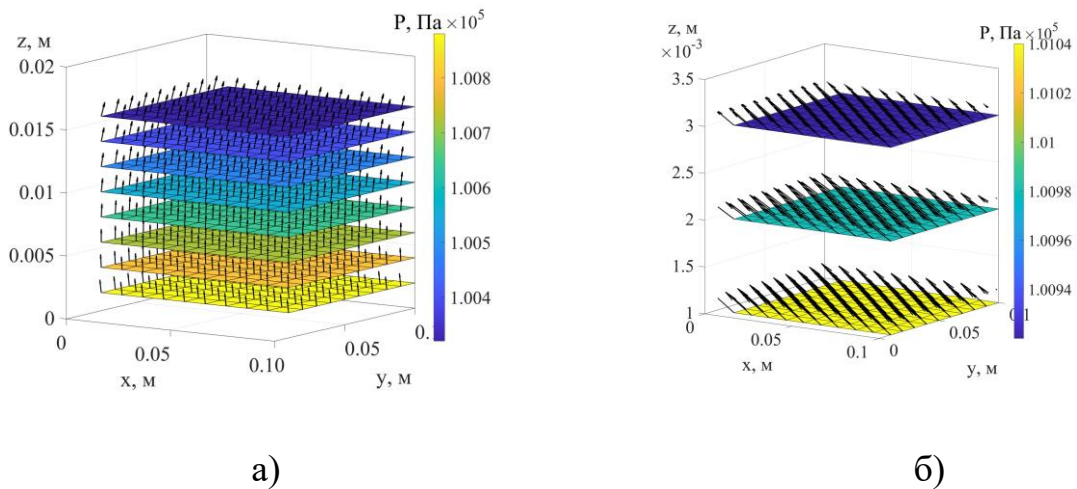


Рисунок 4 – Змінення поля швидкостей при зменшенні відстані між робочими площинами: а) відстань 16 мм, б) відстань 4 мм

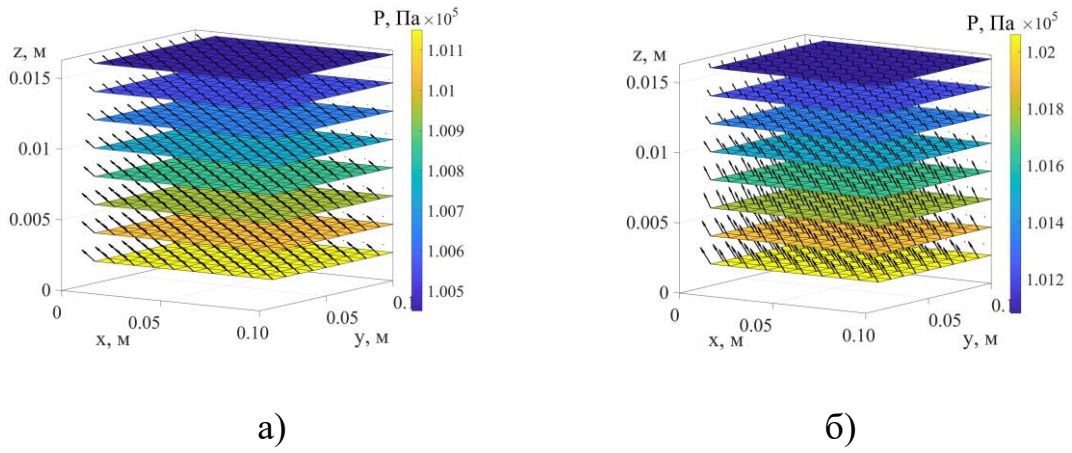


Рисунок 5 – Змінення поля швидкостей за різної амплітуди коливань: а) 1 мм; б) 2 мм

Для визначення кінематичних параметрів віброфрикційного руху насіння з урахуванням аеродинамічних сил і моментів використана математична модель руху твердого тіла еліпсоїдної форми з перекочуванням і проковзуванням. Систему диференціальних рівнянь складено на основі балансу сил і моментів з урахуванням дії сили реакції, тяжіння, моменту опору, а також аеродинамічних сил і моментів:

$$\begin{aligned} m[\dot{\omega}_y R_{Cz} - \dot{\omega}_z R_{Cy} + (\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{R}_C)\omega_x - \omega^2 R_{Cx} + \ddot{x}_{\text{КВЗ}} + \ddot{r}_{\text{вб}x}] = \\ = G_x - Nf \frac{\dot{x}_{\text{КВЗ}}}{\sqrt{\dot{x}_{\text{КВЗ}}^2 + \dot{y}_{\text{КВЗ}}^2}} + R_x^{\text{аер}}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} m[\dot{\omega}_z R_{Cx} - \dot{\omega}_x R_{Cz} + (\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{R}_C)\omega_y - \omega^2 R_{Cy} + \ddot{y}_{\text{КВЗ}} + \ddot{r}_{\text{вб}y}] = \\ = G_y - Nf \frac{\dot{y}_{\text{КВЗ}}}{\sqrt{\dot{x}_{\text{КВЗ}}^2 + \dot{y}_{\text{КВЗ}}^2}} + R_y^{\text{аер}}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} m[\dot{\omega}_x R_C^2 - R_{Cx}(\mathbf{R}_C \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}}) + (\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{R}_C)(R_{Cy}\omega_z - R_{Cz}\omega_y) + H_x - \\ - R_{Cz}\ddot{y}_{\text{КВЗ}} + R_{Cy}\ddot{r}_{\text{вб}z} - R_{Cz}\ddot{r}_{\text{вб}y}] = R_{Cy}G_z - R_{Cz}G_y + M_{\text{кч}x} - M_{\text{аер}x}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} m[\dot{\omega}_y R_C^2 - R_{Cy}(\mathbf{R}_C \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}}) + (\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{R}_C)(R_{Cz}\omega_x - R_{Cx}\omega_z) + H_y + \\ + R_{Cz}\ddot{x}_{\text{КВЗ}} + R_{Cx}\ddot{r}_{\text{вб}x} - R_{Cx}\ddot{r}_{\text{вб}z}] = R_{Cz}G_x - R_{Cx}G_z + M_{\text{кч}y} - M_{\text{аер}y}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} m[\dot{\omega}_z R_C^2 - R_{Cz}(\mathbf{R}_C \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}}) + (\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{R}_C)(R_{Cx}\omega_y - R_{Cy}\omega_x) + H_z + \\ + R_{Cx}\ddot{y}_{\text{КВЗ}} - R_{Cy}\ddot{x}_{\text{КВЗ}} + R_{Cx}\ddot{r}_{\text{вб}y} - R_{Cy}\ddot{r}_{\text{вб}x}] = R_{Cx}G_y - R_{Cy}G_x - M_{\text{аер}z}, \end{aligned} \quad (15)$$

$$N = m[\dot{\omega}_x R_{Cy} - \dot{\omega}_y R_{Cx} + (\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{R}_C)\omega_z - \omega^2 R_{Cz} + \ddot{r}_{\text{вб}z} - G_z - R_z^{\text{аер}}], \quad (16)$$

де $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекції вектора кутової швидкості обертання насінини, відносно миттєвого центру обертання K , на осі системи координат робочої поверхні; R_{Cx}, R_{Cy}, R_{Cz} – проекції радіус-вектора \mathbf{R}_C , що визначає місцеположення центру маси насінини; $\dot{x}_{\text{КВЗ}}, \dot{y}_{\text{КВЗ}}, \ddot{x}_{\text{КВЗ}}, \ddot{y}_{\text{КВЗ}}$ – проекції швидкості та прискорення проковзування насінини; $\ddot{r}_{\text{вб}x}, \ddot{r}_{\text{вб}y}, \ddot{r}_{\text{вб}z}$ – проекції прискорення робочої поверхні при здійсненні гармонійних коливань; G_x, G_y, G_z – проекції сили ваги насінини; N – реакція опору; f – коефіцієнт тертя ковзання; $M_{\text{кч}x}, M_{\text{кч}y}$ – проекції вектора моменту опору кочення; $M_{\text{аер}x}, M_{\text{аер}y}, M_{\text{аер}z}$ – проекції вектора

аеродинамічного моменту насінини, що виникає при його обдуванні потоком повітря; $R_x^{aep}, R_y^{aep}, R_z^{aep}$ – проєкції аеродинамічної сили, що діє на насінину; H_x, H_y, H_z – проєкції кінетичного моменту насінини.

Систему (11) – (16) було перетворено відносно її кутових прискорень кутів Ейлера та лінійних прискорень ковзання точки контакту у системі координат робочої поверхні для визначеного моменту часу.

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{P} = \mathbf{B}, \quad (17)$$

де $\mathbf{A} = \{A_{i,j}(\theta, \phi, \psi, x_{KB3}, y_{KB3}, t)\}, i, j = 1, \dots, 5$ – матриця коефіцієнтів; $\mathbf{P} = (\ddot{\theta} \quad \ddot{\phi} \quad \ddot{\psi} \quad \ddot{x}_{KB3} \quad \ddot{y}_{KB3})^T$ – вектор прискорень; $\mathbf{B} = \{B_i(\theta, \phi, \psi, x_{KB3}, y_{KB3}, t)\}, i = 1, \dots, 5$ – вектор вільних членів (правих частин). Елементи $A_{i,j}(\theta, \phi, \psi, x_{KB3}, y_{KB3}, t)$ та $B_i(\theta, \phi, \psi, x_{KB3}, y_{KB3}, t)$ є постійними для встановленого моменту часу t .

Систему диференціальних рівнянь руху насінини розв'язано як задачу Коші шляхом здійснення інтегрування методом Ейлера з покроковим просуванням по осі часу. Прискорення для кожного кроку інтегрування визначалися за допомогою (17) при застосуванні метода Крамера.

Результати моделювання віброфрикційного руху насіння з урахуванням дії динаміки повітря показали, що апроксимуюча вісь руху насіння відхиляється у бік скату робочої поверхні блоку ВФНС та збільшується сектор розхилу його можливих траєкторій. Здійснено моделювання віброфрикційного руху насіння пастернаку, кропу запашного та салату листового. На рис. 6 наведено приклад результатів моделювання для насінини пастернаку з урахуванням та без урахування впливу знакозмінного повітряного потоку.

Доведено ефективність використання аеродинамічного екрану з точки зору усунення впливу руху повітря.

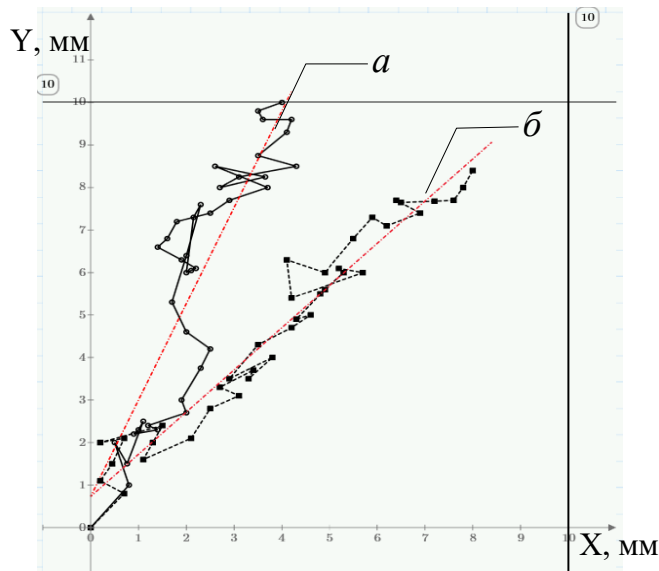


Рисунок 6 – Результати моделювання віброфрикційного руху насіння пастернаку: а) без урахування та б) з урахуванням аеродинамічних сил та моментів

У **третьому розділі** «Обґрунтування конструкції, раціональних параметрів та режиму роботи ВФНС» наведено результати чисельного експерименту щодо оцінки ефективності конструкційних заходів зі зниження впливу динаміки

повітря на сепарації насінневих матеріалів. Отримано дані стосовно змінювання кутів нахилу траєкторій та половинних кутів секторів можливих траєкторій віброфрикційного руху насіння різних фракцій в залежності від геометричних характеристик аеродинамічного екрану, вертикального зазору між робочими поверхнями та амплітуди коливань.

Ступінь впливу динаміки повітря на якість розділення насіння вимірювалась як відношення сумарних перетинань секторів розхилу можливих траєкторій насіння різних фракцій з урахуванням та без урахування аеродинамічних сил та моментів:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{N^{\phi}} (\delta_i^a + \Delta_i^a)}{\sum_{i=1}^{N^{\phi}} (\delta_i^b + \Delta_i^b)}, \text{ якщо } i = N^{\phi}, \text{ то } \Delta_i^a = \Delta_i^b = 0, \quad (18)$$

де Δ_i – кут сектора перекриття секторів (розхилів) можливих траєкторій насіння i -ої та $(i+1)$ -ої фракцій насінневого матеріалу; δ_i – половинний кут сектору можливих траєкторій насіння i -ої фракції; N^{ϕ} – кількість фракцій насінневого матеріалу, що досліджується. Позначки «б» та «а» відповідні параметрам, які отримано без урахування та з урахуванням аеродинамічних сил та моментів.

За результатами моделювання віброфрикційного руху насіння (пастернаку, кропу запашного та салату листового) побудовано регресійні рівняння другого порядку, що визначають показник впливу динаміки повітря в залежності від: відносної висоти вертикальної стінки аеродинамічного екрану, \bar{d} ; її відстані від торцю робочого блоку, \bar{z} ; вертикального зазору між двома робочими поверхнями робочого блоку, \bar{H} ; амплітуди коливань, \bar{A} :

$$K_1 = 1,109 - 0,046\bar{z} - 0,123\bar{d} + 0,127\bar{H} + 0,135\bar{A} + 0,134\bar{z}\bar{d} + 0,027\bar{z}\bar{H} - 0,046\bar{d}\bar{H} - 0,122\bar{d}\bar{A} + 0,04\bar{H}\bar{A} + 0,035\bar{z}^2 - 0,067\bar{H}^2, \quad (19)$$

$$K_2 = 1,066 - 0,034\bar{z} - 0,076\bar{d} + 0,094\bar{H} + 0,12\bar{A} + 0,101\bar{z}\bar{d} + 0,014\bar{z}\bar{H} - 0,055\bar{d}\bar{H} - 0,111\bar{d}\bar{A} + 0,04\bar{H}\bar{A} + 0,028\bar{z}^2 - 0,034\bar{H}^2, \quad (20)$$

$$K_3 = 1,028 - 0,004\bar{z} - 0,033\bar{d} + 0,076\bar{H} + 0,06\bar{A} + 0,064\bar{z}\bar{d} + 0,009\bar{z}\bar{H} + 0,009\bar{z}\bar{A} - 0,049\bar{d}\bar{H} - 0,094\bar{d}\bar{A} + 0,048\bar{H}\bar{A} - 0,024\bar{H}^2 + 0,038\bar{A}^2, \quad (21)$$

де $\bar{d}, \bar{z}, \bar{A}, \bar{H}$ – нормовані (приведені до одиничного інтервалу) конструктивно-режимні параметри (ступінь перекриття екраном вертикального зазору, відстань екрану від торцю блоку, амплітуда коливань, вертикальний зазор між робочими поверхнями блоку ВФНС, відповідно). Фізичні інтервали варіювання цих параметрів складають: $0 \div 15$ мм; $3 \div 10$ мм; $0,5 \div 3$ мм та $6 \div 15$ мм, відповідно; K_1, K_2, K_3 – показник впливу знакозмінного повітряного потоку на якість розділення насіння пастернаку, салату листового та кропу запашного, відповідно.

За допомогою отриманих рівнянь був проведений параметричний аналіз з оцінки ефективності заходів щодо усунення впливу динаміки повітря (рис. 7). Найбільш впливовими визначено такі фактори: амплітуда коливань, геометричні характеристики екрану та вертикальний зазор між робочими поверхнями. Оскільки функція показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення не має вираженого екстремуму, а монотонно змінюється у межах встановленої області варіювання конструктивно-режимних

параметрів, то їх раціональні значення слід шукати на границі області варіювання цих параметрів.

На підставі параметричного аналізу обґрунтовано раціональні значення конструктивно-режимних параметрів ВФНС з екраном. Необхідно мати: блок ВФНС з вертикальним зазором між робочими поверхнями – 6 мм; аеродинамічний екран з вертикальною стінкою, що повністю перекриває вертикальні зазори між робочими поверхнями блоку ВФНС та яка відстоїть від кромки блоку на 3÷4 мм; амплітуду коливань – 0,5 мм.

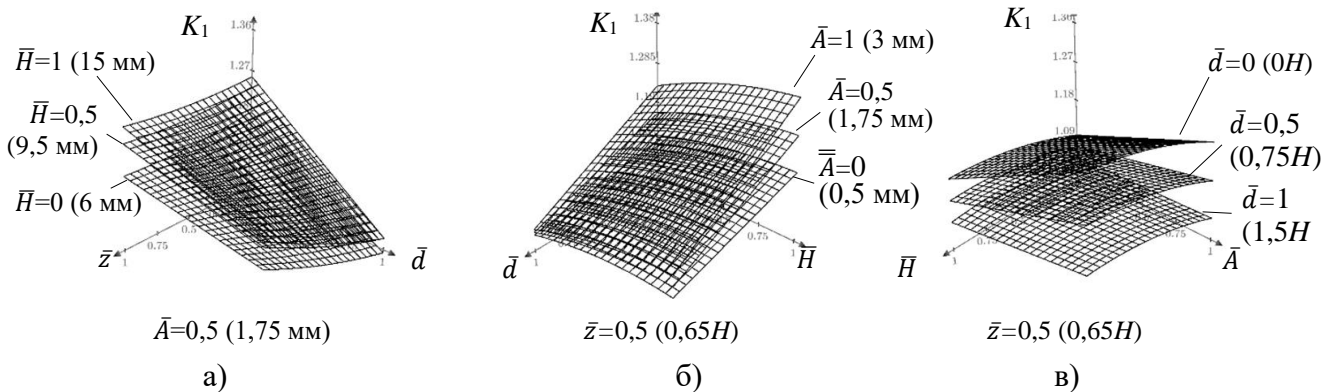


Рисунок 7 – Показник ступеня впливу знакозмінного повітряного потоку на ефективність вібророзділення насіння пастернаку залежно від: а) конструкційних параметрів аеродинамічного екрану при встановлених вертикальному зазорі та амплітуді коливань; б) вертикального зазору та висоти вертикальної стінки екрану при встановлених амплітуді коливань і відстані екрану від торцю блоку; в) вертикального зазору і амплітуді коливань при встановлених конструкційних параметрах екрану

У четвертому розділі «Експериментальні дослідження ВФНС з аеродинамічним екраном» наведено програму, методику та результати експериментальних досліджень; підтвердження адекватності розробленої математичної моделі; оцінку ефективності обладнання робочих блоків ВФНС аеродинамічним екраном. Експериментальні дослідження проведено на базі науково-дослідних лабораторій Державного біотехнологічного університету за допомогою ВФНС (рис. 8), з можливістю регулювання амплітуди коливань шляхом зміни дебалансів різної маси (рис. 9) та обладнаного регульованим аеродинамічним екраном (рис. 10).

При проведенні експериментальних досліджень спочатку підтверджувалась адекватність результатів чисельного експерименту, а потім оцінювалась ефективність застосування ВФНС з аеродинамічним екраном.

Підтвердження адекватності результатів чисельного експерименту здійснювалась шляхом порівняння точності регресійної моделі оцінки показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість розділення насіння пастернаку, що отримано на підставі чисельного експерименту, та точності аналогічної регресійної моделі, що побудована за результатами натурних випробувань.

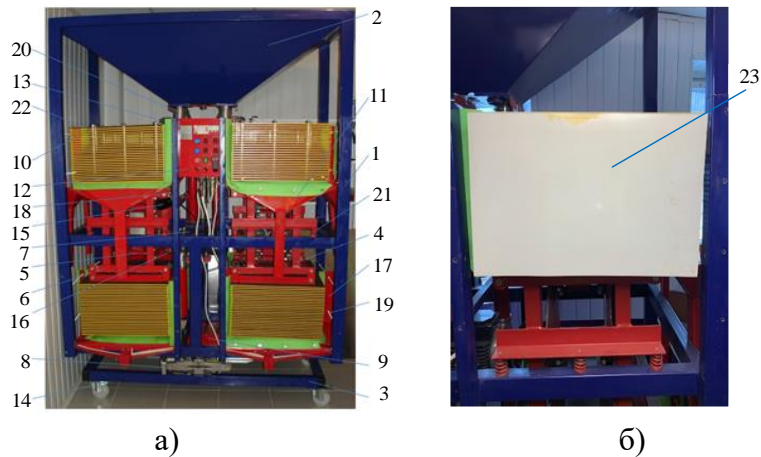


Рисунок 8. Загальний вигляд експериментальної установки:

а) без екрану: 1 – проміжна рама; 2 – бункер насіння; 3 – платформа; 4 – рама вібробуджувача; 5 – вібробуджувач; 6 – рама площин; 7 – електродвигун; 8 – електродомкрат; 9 – блок живлення; 10 – сепаруючі площини; 11 – напрямні; 12 – блок управління; 13 – живильник; 14 – колісний механізм; 15 – моторредуктор; 16 – муфта; 17 – ділильна планка; 18 – муфта приводу живильника; 19 – гвинтові напрямні; 20 – гнучкий патрубок; 21 – пружини; 22 – таровані шайби;

б) блок ВФНС обладнаний аеродинамічним екраном: 23 – аеродинамічний екран.

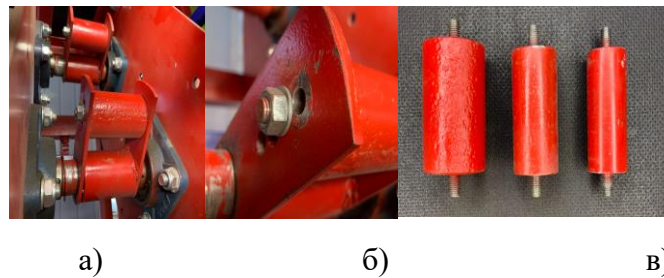


Рисунок 9 – Вібробудник ВФНС: а) – загальний вигляд конструкції вібробудника; б) – регулювання відстані дебаланси від осі обертання; в) – змінні дебаланси з різною вагою

При проведенні натурного експерименту здійснювалась сепарація насіння пастернаку при варіюванні: амплітуди коливань та конструкційних характеристик аеродинамічного екрану. Експеримент проводився для постійно заданого вертикального зазору між робочими поверхнями (10 мм). Кінематичні параметри руху насіння різних фракцій вимірювалися за допомогою 10 приймачів продуктів сепарації насіннєвого матеріалу (рис. 11).

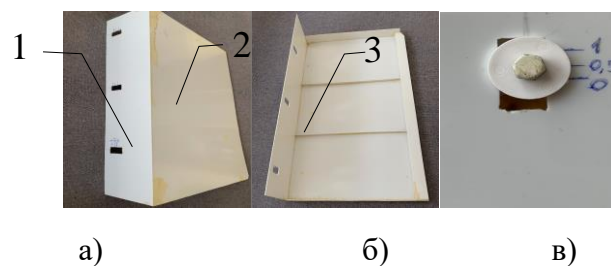


Рисунок 10 – Зовнішній вигляд аеродинамічного екрану: а) – вид ззовні (1 – горизонтальна полиця з регулюючими отворами; 2 – вертикальна стінка); б) – вид зсередини (3 – ребра жорсткості, що регулюють відстань екрану від торцю робочого блоку); в) – регулювання відстані вертикальної стінки екрану від торцю робочого блоку



Рисунок 11 – Приймачі фракцій насінневої суміші після вібросепарації

Рівняння регресії, що побудоване за результатами натурального експерименту з насінням пастернаку, має наступний вигляд:

$$K_1^* = 1,053 - 0,054 \bar{d} - 0,007 \bar{z} + 0,087 \bar{A} + 0,057 \bar{z} \bar{d} - 0,113 \bar{d} \bar{A} + 0,015 \bar{z} \bar{A} + 0,048 \bar{A}^2, \quad (22)$$

де $\bar{d}, \bar{z}, \bar{A}$ – нормовані конструктивно-режимні параметри з фактичними інтервалами їх варіювання, які аналогічні інтервалам, встановленим для (19); K_1^* – оцінка показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість розділення насіння пастернаку, яка отримана за допомогою регресії, що побудована за результатами натурального експерименту.

На рис. 12 наведено графічні залежності показника оцінки впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення насіння від конструктивних характеристик екрану та амплітуди коливань, що побудовано за допомогою (19), якщо $\bar{H} = 0,44$ (10 мм) (рис. 12 а) та за допомогою (22) (рис. 12 б).

Показник впливу аеродинаміки згідно регресійної моделі (19) перебільшує аналогічну оцінку згідно моделі (22) до 11 %, коли екран відсутній. Зі збільшенням висоти вертикальної стінки екрану розбіжність зменшується та не перебільшує 5%.

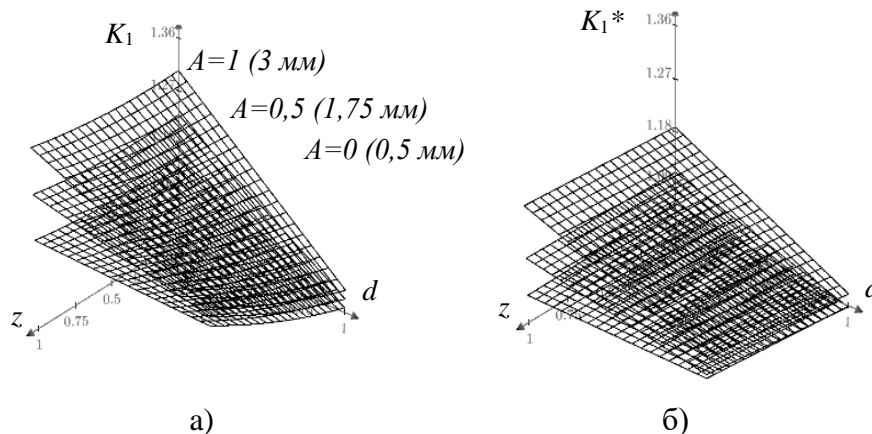


Рисунок 10 – Регресійна залежність показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість вібросепарації насіння пастернаку від геометричних характеристик аеродинамічного екрану та амплітуди коливань: а) за результатами чисельного експерименту; б) за результатами натурального експерименту

Для оцінки ефективності застосування ВФНС з аеродинамічним екраном проведений лабораторний експеримент з оцінки приросту сортової чистоти контрольної вибірки насінневого матеріалу пастернаку.

Вхідний насіннєвий матеріал містив: 460 шт/100 г насіння бур'янів та інших рослин, в тому числі насіння: підмаренника – 60 шт/100 г, гречишки – 240 шт/100 г, пікульника – 120 шт/100 г. Зміст кондиційного насіння – 85%. Для сепарації насіннєвого матеріалу пастернаку до посівних кондицій було використано ВФНС без аеродинамічного екрану та з екраном.

Установчі кінематичні параметри обох машин були наступними: поздовжній кут нахилу робочих поверхонь – 5,50°; поперечний – 2°; амплітуда коливань – 0,5 мм; кут спрямованості коливань – 30°; частота коливань – 190 рад/с. Робочі поверхні були облицьовані абразивним полотном. Продуктивність однієї поверхні складала 0,01 кг/хв.

Для ВФНС з аеродинамічним екраном було отримано наступні фракції насіннєвого матеріалу у відсотках від вхідного матеріалу: 65% оригінальне та елітне насіння (показник сортової чистоти більше 97 %); 28 % репродуктивне насіння (показник чистоти 95÷97 %); 7 % відходи. При застосуванні ВФНС без екрану оброблений матеріал мав сортову чистоту не вище 95 % (насіння репродуктивної групи). Частка цієї фракції складала 56 %, решта (44%) – відходи. Застосування ВФНС з екраном забезпечило збільшення показнику сортової чистоти кондиційного насіння, що відбирається, на 13,5% (з 85 %, для вхідного матеріалу, до 98,5 %). Це на 3% більше, ніж показник чистоти, який отриманий на ВФНС без екрана (95,5 %). Також на ВФНС з екраном збільшено частку кондиційного насіннєвого матеріалу, що відбирається, на 37 % (93 % проти 56 % для звичайного ВФНС).

У п'ятому розділі «Оцінка економічного ефекту від застосування удосконаленого ВФНС» наведено метод оцінки економічної ефективності застосування ВФНС з аеродинамічним екраном та виконано оцінку показника відносного збільшення товарної ціни обробленого насіннєвого матеріалу. Для ВФНС з екраном, при обробці насіння пастернаку, відносно збільшення товарної ціни кілограму насіннєвого матеріалу складає 89%, тобто на 2 675 грн. більше базової вартості одного кілограму насіння пастернаку. Це на 64%, тобто на 1 937 грн./кг, перевершує ВФНС без екранів.

Фактичний економічний ефект від застосування ВФНС на очистці і сортуванні насіння пастернаку у господарстві зі середньостатистичним обсягом річного врожаю насіння у 500 кг складає 1,335 мільйона грн. на рік (в цінах 2024 року).

ВИСНОВКИ

У дисертації представлено теоретичне узагальнення і нове вирішення науково-прикладної задачі, яка направлена на підвищенні ефективності вібросепарації насіння дрібнонасінневих овочевих та лікарських культур шляхом вдосконалення конструкції робочого блоку та обґрунтування раціональних параметрів ВФНС. На основі проведеного дослідження зроблені наступні висновки:

1. Аналіз існуючих методів і моделей підвищення продуктивності і якості віброфрикційної сепарації дрібнонасінневих матеріалів овочевих та лікарських

рослин, показав, що має місце недостатньо повне теоретичне вивчення процесів сепарації цих матеріалів з урахуванням дії знакозмінного повітряного потоку всередині блоків робочих поверхонь ВФНС. Є актуальним завдання щодо дослідження: процесів взаємодії робочих поверхонь ВФНС з повітрям, насіння з робочою поверхнею в умовах виникнення знакозмінного повітряного потоку; механізмів зменшення інтенсивності знакозмінного повітряного потоку залежно від конструктивно-режимних параметрів ВФНС з екраном.

2. Розроблена комплексна математична модель дозволяє обчислювати точки траєкторії віброфрикційного безвідривного руху окремої насінини по робочій поверхні ВФНС в умовах дії знакозмінного поля швидкостей повітря. Модель встановлює функціональний зв'язок між конструктивно-режимними параметрами ВФНС з аеродинамічним екраном та відносним показником ступеня впливу знакозмінного повітряного потоку на якість розділення дрібнонасінневих матеріалів деяких рослинних культур.

3. Здійснено чисельне моделювання вібраційного руху насінин пастернаку, кропу запашного та салату листового. На підставі отриманих результатів побудовано регресійні рівняння другого порядку залежності показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість сепарації даних насінневих матеріалів від конструктивно-режимних параметрів ВФНС з аеродинамічним екраном (19) – (21). Регресійні рівняння побудовані для наступних діапазонів варіювання конструктивно-режимних параметрів: відносного перекриття вертикального зазору між робочими поверхнями – [0; 1,5]; відстані екрану від торцю блоку – [3; 10] мм; амплітуди коливань – [0,5; 3] мм; вертикального зазору між робочими поверхнями – [6; 15] мм. Інтервал змінювання показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість розділення насінневого матеріалу складав – [1; 1,23]. Оцінки коефіцієнтів детермінації побудованих регресійних рівнянь складала, відповідно: 0,96, 0,967 і 0,956.

4. Для мінімізації показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість вібросепарації насінневого матеріалу необхідно мати: блок ВФНС з відстанями між робочими поверхнями 6 мм; аеродинамічний екран з висотою вертикальної стінки, що повністю перекриває вертикальні зазори між поверхнями блоку та яка відстоїть від торцю блоку на 3÷4 мм; амплітуду коливань – 0,5 мм.

5. Для підтвердження адекватності створеної математичної моделі здійснено порівняння регресійного рівняння для насіння пастернаку, що побудоване на підставі чисельного експерименту (19), з регресійним рівнянням для цієї культури, що отримане за результатами натурного експерименту (22). Регресія (22) побудована на інтервалах варіювання конструктивно-режимних параметрів, які є аналогічними інтервалам параметрів для (19), крім вертикального зазору між робочими поверхнями блоку, який був постійним та дорівнював 10 мм. Відхилення значень показника впливу знакозмінного потоку повітря на якість сепарації насіння, що визначався на підставі регресії (19) та регресії (22), складала величину від 5 до 11 % (залежно від значень конструктивно-режимних параметрів). Така точність математичної моделі є задовільною для інженерних задач.

6. За результатами експериментальних досліджень виконано оцінку ефективності застосування ВФНС з аеродинамічним екраном у порівнянні з ВФНС без екрану. При обробці насінневого матеріалу пастернаку на ВФНС з екраном отримано: фракцію оригінального та елітного насіння з часткою 65% від загального обсягу матеріалу; фракцію репродуктивного насіння з часткою 28 %; фракцію відходів – 7 %. При застосуванні ВФНС без екрану отримано: фракцію репродуктивного насіння – 56 %; фракцію відходів – 44%. Застосування ВФНС з екраном забезпечило збільшення показнику сортової чистоти кондиційного насіння, що відбирається, на 13,5% (з 85 %, для вхідного матеріалу, до 98,5 %). Це на 3% більше, ніж показник чистоти, який отриманий на ВФНС без екрана (95,5 %). Також на ВФНС з екраном збільшено частку кондиційного насінневого матеріалу, що відбирається, на 37 % (93 % проти 56 % для звичайного ВФНС).

7. Економічний ефект від впровадження результатів дисертаційного дослідження полягає у збільшенні товарної ціни вхідного насінневого матеріалу пастернаку на 89%, (що орієнтовно складає 2 675 грн./кг) за рахунок зменшення відходів та збільшення чистоти товарних фракцій. Це, для господарства з річним обсягом врожаю насіння пастернаку у 500 кг, дає додатковий прибуток понад 1,335 мільйона гривень на рік, у цінах 2024 року.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

1. **Anton Nykyforov**, Roman Antoshchenkov, Ivan Halych, Liliia Kis-Korkishchenko, Victor Kis, Alla Dombrovska, Inna Kilimnik (2023). Regression models for assessing the efficiency of vibratory separation of parsnip seeds taking into account air dynamics based on numerical simulation and field experiment. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies [this link is disabled](#), 2 (1-122). P. 40–51. *(Здобувачу належить порівняння регресійних рівнянь за результатами чисельного і натурного експериментів).*

2. **Anton Nykyforov**, Roman Antoshchenkov, Ivan Halych, Victor Kis, Pavlo Polyansky, Vitalii Koshulko, Dmytro Tymchak, Alla Dombrovska, Inna Kilimnik (2022). Construction of a regression model for assessing the efficiency of separation of lightweight seeds on vibratory machines involving measures to reduce the harmful influence of the aerodynamic factor. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. ISSN 1729-3774. P. 24-34. *(Здобувачу належить планування чисельного експерименту та результати моделювання за сформованим планом)*

3. **Nykyforov A.**, Nykyforova A., Antoshchenkov, R., Antoshchenkova, V., Diundik, S., & Mazanov, V. (2021). Development of a mathematical model of vibratory non-lift movement of light seeds taking into account the aerodynamic forces and moments. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. No 3 (111). P. 70–78. *(Здобувачу належить удосконалення математичної моделі вібраційного руху насінини з урахуванням дії аеродинамічних сил та моментів).*

4. Roman Antoshchenkov, **Anton Nykyforov**, Ivan Halych, Victor Tolstolutskyi, Vitalina Antoshchenkova, Sergey Diundik (2020). Solution of the system of gas-

dynamic equations for the processes of interaction of vibrators with the air. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol 2, No 7 (104). P. 67–73. *(Здобувачу належить постановка та подання у кінцево-різницевому вигляді крайової задачі обчислення поля швидкостей та тиску повітря у робочій області ВФНС).*

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України та у інших наукових виданнях:

5. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Галич І. В. (2013). Підвищення продуктивності вібраційної насіннеочисної машини з неперфорованими робочими площинами. *Motrol. Commision of motorization and energetics in agriculture. – Lublin-Rzeszow. Vol. 15, No 7. С. 185–190. (Здобувачу належить аналіз характеристик вібраційних насіннеочисних машин).*

6. Галич І. В., **Никифоров А. О.** (2015). Мехатронна вібраційна насіннеочисна машина. Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. Харків,. Вип. 156. С. 413–419. *(Здобувачу належить опис конструкції мехатронної вібраційної насіннеочисної машини).*

7. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Галич І. В. (2015). Метод розрахунку аеродинамічних характеристик об'ємних фігур неправильної форми. Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. Харків,. Вип. 156. С. 459–464. *(Здобувачу належить аналітична методика розрахунку аеродинамічних характеристик плоского перерізу об'ємного тіла).*

8. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.** (2017). Постановка задачі розрахунку поля швидкостей повітряного середовища між двома еквідістантними площинами при здійсненні ними синхронних гармонійних коливань. Науковий журнал «Інженерія природокористування», No 2 (8). С. 33–38. *(Здобувачу належить математична постановка задачі обчислення поля швидкостей повітря у вигляді крайової задачі).*

9. Лук'яненко В. М., Петрик А. П., **Никифоров А. О.** (2017). Метод розрахунку поля швидкостей повітряного середовища між двома еквідістантними площинами при здійсненні ними синхронних гармонійних коливань. Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Харків,. Вип 180. С. 100–105. *(Здобувачу належить обґрунтування системи рівнянь газодинаміки та метод розв'язання системи диференціальних рівнянь).*

10. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Кісь В. М. (2018). Розрахунок поля швидкостей повітряного середовища між двома еквідістантними площинами під час здійснення ними синхронних гармонійних коливань методом прогонки. Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. Харків. Вип. 190. С. 337–345. *(Здобувачу належить система диференціальних рівнянь та крайові умови у кінцево-різницевій формі).*

11. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Лук'яненко О. В., Никифорова А. П. (2019). Конструктивні заходи, щодо інтенсифікації процесу сепарування насінневих сумішей на вібраційних насіннеочисних машинах. Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. Харків, Вип. 198 С. 277–283. *(Здобувачу належить аналіз способів та конструкційних заходів щодо інтенсифікації процесу сепарування насінневих сумішей на вібраційних насіннеочисних машинах).*

12. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Никифорова А. П. (2019). Використання метода прогонки при розрахунку тривимірного поля швидкостей повітряного середовища, що знаходяться між двох синхронно коливальних робочих площин вібромашини. Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. Харків,. Вип. 198 С. 214–226. *(Здобувачу належить результати чисельного розв'язання системи рівнянь газодинаміки при визначених крайових умовах).*

13. **Никифоров А. О.** (2020). Дослідження ефективності застосування аеродинамічних екранів при обробці на вібраційних машинах насіння з вираженими аеродинамічними властивостями. The 7 th International scientific and practical conference “Science, society, education: topical issues and development prospects” (June 7-9) SPC “Sci-conf.com.ua”, Kharkiv, Ukraine. С. 31–38.

14. Степаненко С. П., **Никифоров А. О.** (2024). Дослідження впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення дрібнонасінневих матеріалів. Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів». Харків. № 24. С. 52-68. *(Здобувачу належить результати моделювання віброфрикційного руху насіння з урахуванням дії аеродинамічних сил та моментів).*

Тези і матеріали конференцій:

15. **Никифоров А. О.** (2016). Постановка задачі розрахунку поля швидкостей повітряного середовища між двома еквідистантними площинами при здійсненні ними синхронних гармонійних коливань. Міжнародна науково – практична конференція молодих вчених «Технічний прогрес в АПК». *(Здобувачу належить результати аналізу процесу взаємодії робочих органів ВФНС з повітряним середовищем).*

16. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Галич І. В. (2017). Універсальний вібробуджувач коливань. Міжнародна науково – практична конференція молодих вчених «Технічний прогрес в АПК». *(Здобувачу належить результати аналізу та узагальнення способів вібробуджування коливань ВФНС).*

17. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.** (2017). Метод розрахунку поля швидкостей повітряного середовища між двома еквідистантними площинами при здійсненні ними синхронних гармонійних коливань. Міжнародна науково – практична конференція молодих вчених «Технічний прогрес в АПК». *(Здобувачу належить результати аналізу методів розрахунку поля швидкостей повітря при взаємодії робочих органів машин з повітряним середовищем).*

18. **Никифоров А. О.** (2017). Основні фактори впливу на показники ефективності віброочищення. Міжнародна науково – практична конференція молодих вчених «Технічний прогрес в АПК».

19. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Петрик А. П. (2018). Расчёт поля скоростей воздушной среды между двумя эквидистантными плоскостями при совершении ими синхронных гармонических колебаний методом прогонки. Міжнародна науково – практична конференція молодих вчених «Технічний прогрес в АПК». *(Здобувачу належить результати розрахунку поля швидкостей).*

20 Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Никифорова А. П. (2019).

Використання метода прогонки при розрахунку тривимірного поля швидкостей повітряного середовища, що знаходяться між двох синхронно коливальних робочих площин вібротривої. Міжнародна науково – практична конференція молодих вчених «Технічний прогрес в АПК». *(Здобувачу належить опис метода прогонки щодо розв'язання крайової задачі обчислення поля швидкостей повітря у робочій області).*

21. Лук'яненко В. М., Галич І. В., **Никифоров А. О.** (2020). Регулювання технологічного процесу сепарації вібраційних насінноочисних машин. Інноваційні розробки в аграрній сфері: матеріали Міжнар. наук. - практ. конф., м. Харків, 3-4 груд. 2020 р. ХНТУСГ, 2020. Т. 1. *(Здобувачу належить результати аналізу та узагальнення методів регулювання процесів сепарації).*

22. V. Lukjanenko, **A. Nykyforov**, A. Nykyforova. (2020). Numerical solution of the system of equations of gas dynamics using the sweep method for the three-dimensional. Сучасні проблеми землеробської механіки: матеріали XXI Міжнар. наук. конф., присвяч. 90-річчю ХНТУСГ, м. Харків, 17-18 жовтня 2020 р. *(Здобувачу належить результати чисельного розв'язання системи диференціальних рівнянь газодинаміки).*

23. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Никифорова А. П. (2020). Методи оцінки ефективності використання аеродинамічних екранів. Science and education: problems, prospects and innovations: the 1 st International scientific and practical conference, Kyoto, October 7-9, 2020. *(Здобувачу належить обґрунтування методів оцінки ефективності аеродинамічних екранів для ВФНС).*

24. **Никифоров А. О.** (2022). Порівняльний аналіз регресійних моделей оцінки шкідливого впливу аеродинамічного фактора на ефективність віброфрикційного розділення насіння пастернаку, що отримано на підставі чисельного та натурального експериментів. Сучасна інженерія агропромислових харчових виробництв. Харків, 24–25 листопада 2022 року.

25. **Никифоров А. О.** (2023). Математична модель віброфрикційного безвідривного руху насіння з урахуванням дії аеродинамічних сил і моментів. Матеріали XIX міжнародного форуму молоді "Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті". Харків, 06-07 квітня 2023 року.

26. **Никифоров А. О.** (2023). Критерій вдосконалення технологічного процесу віброфрикційного розділення насінневих матеріалів чутливих до руху повітря. Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «ТЕХНІЧНИЙ ПРОГРЕС В АПВ». Харків 9-10 травня 2023 року.

27. Степаненко С. П., **Никифоров А. О.** (2024). Комплексна модель віброфрикційного руху насіння по нахиленій шорсткій поверхні з урахуванням впливу знакозмінного повітряного потоку повітря у блоці віброфрикційного сепаратора. Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «ТЕХНІЧНИЙ ПРОГРЕС В АПВ». Харків 21-22 травня 2024 року. *(Здобувачу належить опис математичної моделі віброфрикційного руху насіння в умовах дії знакозмінного повітряного потоку).*

28. Степаненко С. П., **Никифоров А. О.** (2024). Обґрунтування параметрів віброфрикційного сепаратора дрібнонасінневих матеріалів. Матеріали IV

Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Новітні технології в АПК: проблеми та перспективи впровадження». Полтава 27-28 червня 2024 року. *(Здобувачу належить результати кількісного порівняння альтернативних варіантів ВФНС з аеродинамічним екраном).*

29. Степаненко С. П., **Никифоров А. О.** (2024). Дослідження моделі віброфрикційного безвідривного руху насіння по нахиленій шорсткій поверхні з урахуванням дії аеродинамічних сил. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання сільськогосподарської продукції». Кропивницький, 21 квітня 2024 року. *(Здобувачу належить результати моделювання траєкторій насіння визначеної форми з урахуванням дії аеродинамічних сил).*

Патенти України:

30. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Галич І. В. (2014) Патент на корисну модель №88048 Україна, В03С1/10. Універсальний віброзбудник. заявник Лук'яненко В. М. u201312141; заяв. 17.10.2013; надрук. 25.02.2014, Бюл. № 25. Опубл. 25.02.2014 р. Бюл. № 4. *(Здобувачу належить результати патентного пошуку).*

31. Козаченко О. В., **Никифоров А. О.**, Бакум М. В., Крекот М. М., Піх Е. О. (2021). Патент на корисну модель №149837 Україна. В07В13/00. Вібраційна насіннеочисна машина. заявник Козаченко О.В. u202103892; заяв. 05.07.2021 надрук. 08.12.2021 р. Бюл. № 49. *(Здобувачу належить ідея встановити перфоровані пластини - регулятори на робочих торцевих поверхнях кожного пакета площин).*

32. Лук'яненко В. М., **Никифоров А. О.**, Галич І. В. (2022) Патент на корисну модель 151223 Україна, МПК (2022.01) В07В 13/00. Спосіб підвищення продуктивності вібраційних насіннеочисних машин з блоками неперфарованих віброуючих поверхонь. Заявник Лук'яненко В. М. u 2021 05954; заяв. 23.10.2021; надрук. 22.06.2022, Бюл. № 25. *(Здобувачу належить ідея щодо зменшення втрат якісного насіння у нехарактерну фракцію).*

АНОТАЦІЯ

Никифоров А. О. Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів віброфрикційного сепаратора дрібнонасінневих матеріалів – кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва» (Технічні науки) – Центральноукраїнський національний технічний університет Міністерства освіти і науки України, Кропивницький, 2024.

Дисертацію присвячено вирішенню актуального науково-практичного завдання підвищення ефективності процесу вібросепарації насінневих матеріалів дрібнонасінневих культур шляхом обґрунтування раціональних параметрів та режимів роботи вібронасінневих сепараторів (ВФНС) з аеродинамічним екраном.

Подальше підвищення ефективності ВФНС щодо обробки насінневих

сумішів дрібнонасіньних культур стримане впливом на кінематичні параметри руху насіння, домішок, що виділяються, аеродинамічних сил та моментів внаслідок виникаючого знакозмінного руху повітря між робочими площинами блоку ВФНС. З цього, ВФНС з блоками робочих поверхонь, не дозволяють досягти задовільних показників сепарації для насінньних матеріалів такого типу (деякі лікарські рослини та овочеві культури). Вплив знакозмінного повітряного потоку спостерігається на всіх режимах роботи ВФНС (безвідривних та з відскоком). Механізм дії аеродинамічних сил та моментів проявляється через віднесення насінин повітряним потоком (дія сили аеродинамічного опору) та через зменшення віброфрикційного імпульсу, що діє на насіння, внаслідок його зависання над робочою поверхнею та обертання навколо центру маси (дія бокових аеродинамічних сил та їх моментів).

Для теоретичного дослідження механізмів впливу знакозмінного повітряного потоку розроблено модель віброфрикційного безвідривного руху насіння з урахуванням дії аеродинамічних сил та моментів. Безвідривний режим (рух з ковзанням та перекочуванням) є більш розповсюдженим для сепарації дрібнонасіньних культур. Аеродинамічні сили та моменти для цього режиму враховуються через зменшення віброфрикційного імпульсу внаслідок дії бокових аеродинамічних сил та їх моментів.

Моделювання віброфрикційного руху насіння з урахуванням дії аеродинамічних сил та моментів ґрунтується на основних положеннях механіки руху твердого тіла з визначеними механіко-геометричними характеристиками, аеродинаміки об'ємних тіл та газодинаміки ідеального газу при малих перепадах тиску, що мають місце при розповсюдженні акустичних хвиль.

Створена модель складається з трьох частин. Це:

- модель обтікання насіння потоком повітря. На відміну від існуючих підходів створена модель дозволяє обчислювати не тільки силу аеродинамічного опору, а також й бокові аеродинамічні сили та їх моменти для насіння будь-якої форми залежно від параметрів повітряного потоку та просторового положення насінини в потоці;

- тривимірна газодинамічна модель руху повітря під впливом робочих органів ВФНС. Модель дозволяє обчислювати значення швидкостей та тиску повітря в елементах повітряного простору, що знаходиться між двох робочих поверхонь блоку ВФНС. Тривимірна модель, на відміну від методик, де розглядається плоский випадок, дозволяє більш детально враховувати крайові умови (конструкцію аеродинамічного екрану) стосовно параметрів знакозмінного повітряного потоку в досліджуваній області;

- удосконалена модель віброфрикційного безвідривного руху насіння по нахиленій шорсткій поверхні, де враховується дія повного набору аеродинамічних сил та моментів, які викликані знакозмінним повітряним потоком.

На підставі математичного моделювання досліджений вплив знакозмінного потоку повітря на якість сепарації насіння овочевих та лікарських рослин. Отримано кількісну оцінку впливу знакозмінного повітряного потоку шляхом порівняння параметрів віброфрикційного руху насіння з урахуванням та без

урахування впливу аеродинамічних сил та моментів. Результати з оцінки параметрів руху фракцій досліджуваних насінневих матеріалів, які отримані за допомогою розробленої математичної моделі, зрівнювалися з результатами натурального експерименту. Як показав натурний експеримент, результати чисельного моделювання збігаються з результатами натурального експерименту з точністю до 11% (залежно від діапазону конструктивно-режимних параметрів ВФНС). Математична модель дає перебільшену оцінку впливу знакозмінного потоку повітря. Величина помилки збільшується при зростанні амплітуди коливань та змінні конструкційних параметрів екрану у бік зменшення його ефективності.

На підставі чисельного моделювання, шляхом варіювання крайових умов для досліджуваної області повітря та амплітуди коливань блоку ВФНС встановлено аналітичну (регресійну) нелінійну залежність ступеня впливу знакозмінного потоку повітря на якість вібросепарації від конструкційних параметрів аеродинамічного екрану, амплітуди коливань та вертикального зазору між робочими поверхнями блоку ВФНС. Регресійні моделі отримано для насіння пастернаку, кропу запашного та салату листового. За критерієм мінімізації впливу знакозмінного повітряного потоку визначено раціональні конструктивно-режимні параметри ВФНС. Для безвідривних діапазонів вібросепарації раціональними є: відносний зазор між вертикальною стінкою екрану та кромкою робочої поверхні блоку ВФНС 50÷65% від вертикального зазору між робочими поверхнями блоку ВФНС; ступінь перекриття екраном зазору між робочими поверхнями блоку – 100÷110%; амплітуда коливань – 0,5 мм; вертикальний зазор між робочими поверхнями блоку – 6 мм.

Отримані рекомендації стосовно доцільних конструктивно-режимних параметрів ВФНС з екраном впроваджено в освітній процес Державного біотехнологічного університету (місто Харків) та ПАТ «КМЗ» (м.Карлівка). Це дозволило, при сепарації насінневого матеріалу пастернаку, забезпечити підвищення показнику сортової чистоти вхідного насінневого матеріалу з 85 % до 98,5 % (на 13,5 % проти 10,5 % для ВФНС без екрана) та знизити частку некондиційного насінневого матеріалу з 44 % до 7 % (на 37 %).

Економічний ефект від впровадження результатів дисертаційного дослідження полягає у збільшенні товарної ціни вхідного насінневого матеріалу пастернаку на 89%, (що орієнтовно складає 2 675 грн./кг) за рахунок зменшення відходів та збільшення чистоти товарних фракцій. Це, для господарства з річним обсягом врожаю насіння пастернаку у 500 кг, дає додатковий прибуток понад 1,335 мільйона гривень на рік, у цінах 2024 року.

Ключові слова: сепарація, аеродинамічні властивості, віброфрикційний насінневий сепаратор, повітряний потік, продуктивність, коефіцієнт очищення.

ABSTRACT

A. Nykyforov. Substantiating the design and mode parameters of the vibro-friction separator of small-seeded materials.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty

05.05.11 - "Machines and means of mechanization of agricultural production" (Technical Sciences) - Central Ukrainian National Technical University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kropyvnytskyi, 2024.

The dissertation is devoted to solving the urgent scientific and practical task of increasing the efficiency of the process of separating seed mixtures sensitive to airflow using vibration friction seed separators (VFNS) with an aerodynamic screen.

Further improvement of the efficiency of VFNS for processing seed mixtures with distinct aerodynamic properties is constrained by the negative impact on the kinematic parameters of the movement of seeds, impurities, aerodynamic forces and moments due to the periodic air movement between the working surfaces of the VFNS unit. For this reason, VFNS with blocks of working surfaces do not allow achieving satisfactory separation (cleaning) performance for seed mixtures of this type (some medicinal plants and vegetable crops). The influence of the sign-changing air flow is observed in all modes of operation of the VFS (non-detachable and with rebound). The mechanism of action of aerodynamic forces and moments is manifested through the removal of seeds by the air flow (the action of aerodynamic drag force) and through the reduction of the vibration impulse acting on the seeds due to their "floating" and rotation around the centre of mass (the action of lateral aerodynamic forces and their moments).

For a theoretical study of the mechanisms of the influence of sign-changing air flow, a model of vibrofrictional continuous movement of seeds was developed, taking into account the action of aerodynamic forces and moments. The non-detachable mode (movement with sliding and rolling) is more common for vibratory processing of small-seeded crops. Aerodynamic forces and moments for this mode are taken into account due to the reduction of the vibration impulse due to the action of lateral aerodynamic forces and their moments.

Modeling of the vibrofrictional movement of seeds, taking into account the action of aerodynamic forces and moments, is based on the basic principles of the mechanics of the motion of a solid body with defined mechanical and geometric characteristics, the aerodynamics of volumetric bodies, and the gas dynamics of an ideal gas with small pressure drops that occur during the propagation of acoustic waves.

The created model consists of three parts. These are:

- a model of the airflow around the seeds in the acoustic velocity range. Unlike existing approaches, the model allows calculating not only the aerodynamic drag force, but also lateral aerodynamic forces and their moments for seeds of any shape, depending on the airflow parameters and the spatial position of the seeds in the flow;

- a three-dimensional gas-dynamic model of air movement under the influence of the working bodies of the VFNS. The model allows to calculate the values of air velocity and pressure in the elements of the air space located between two equidistant synchronously oscillating surfaces. The three-dimensional model, in contrast to methods that consider a flat case, allows you to take into account in more detail the boundary conditions (design of the aerodynamic screen) in relation to the parameters of the sign-changing air flow in the studied area;

- an improved model of vibrofrictional continuous movement of seeds on an inclined rough surface, which takes into account the action of a full set of aerodynamic forces and moments caused by a sign-changing air flow.

On the basis of mathematical modeling, the effect of the sign-changing air flow on the quality of seed separation of vegetable and medicinal plants was investigated. A quantitative assessment of the influence of the sign-changing air flow was obtained by comparing the parameters of the vibro-frictional movement of seeds with and without taking into account the influence of aerodynamic forces and moments. The results of the estimation of the movement parameters of the fractions of the studied seed materials, which were obtained using the developed mathematical model, were compared with the results of the natural experiment. As the full-scale experiment showed, the results of the numerical simulation coincide with the results of the full-scale experiment with an accuracy of up to 11% (depending on the range of structural and operational parameters of the VFNS). The mathematical model gives an exaggerated estimate of the influence of the sign-changing air flow. The magnitude of the error increases when the amplitude of oscillations increases and the design parameters of the screen change in the direction of decreasing its efficiency.

On the basis of numerical modeling, by varying the boundary conditions for the studied area of air and the amplitude of oscillations of the VFNS unit, an analytical (regression) nonlinear dependence of the degree of influence of the sign-changing air flow on the quality of vibration separation on the design parameters of the aerodynamic screen, the amplitude of oscillations and the vertical gap between the working surfaces of the VFNS unit was established. Regression models were obtained for lettuce, dill, and parsnip seeds. According to the criterion of minimization of the influence of the sign-changing air flow, the rational design and mode parameters of the VFS have been determined. For continuous ranges of vibration separation, the following are rational: the relative gap between the vertical wall of the screen and the edge of the working surface of the VFS unit is 50÷65% of the vertical gap between the working surfaces of the VFS unit; the degree of screen overlaps of the gap between the working surfaces of the block - 100÷110%; oscillation amplitude - 0.5 mm; the vertical gap between the working surfaces of the block is 6 mm.

The received recommendations regarding the appropriate design and mode parameters of the VFNS with a screen were implemented in the educational process of the State Biotechnology University (Kharkiv) and PJSC "KMZ" (Karlivka). This made it possible, during the separation of parsnip seed material, to increase the varietal purity of the input seed material from 85% to 98.5% (by 13.5% versus 10.5% for VFSN without a screen) and reduce the share of substandard seed material from 44% to 7% (by 37%).

The economic effect of the implementation of the results of the dissertation research consists in an increase in the market price of the input parsnip seed material by 89%, (which is approximately UAH 2,675/kg) due to a reduction in waste and an increase in the purity of marketable fractions. This, for a farm with an annual harvest of parsnip seeds of 500 kg, gives an additional profit of more than 1.335 million hryvnias per year, in 2024 prices.

Keywords: cleaning processes, aerodynamic properties, vibro-friction seed separator, air flow, performance, cleaning coefficient.

Підписано до друку 23.10.2024 р.

Формат 60x90 1/16. Тираж 100 прим.

Друк цифровий. Папір офсетний.

Видавництво та друк типографія Scan + ФОП Ковальчук Н.П.
61000, Україна, м. Харків, проспект Героїв Харкова, 10/12

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції