Степаненко С.П.[1], Никифоров А.О.[2]
[1]Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва Національна академія аграрних наук України, смт. Глеваха Київської області
E-mail: stepanenko_s@ukr.net
[2]Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна
E-mail: toninikiforov89@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗНАКОЗМІННОГО ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ НА ЯКІСТЬ ВІБРОФРИКЦІЙНОГО РОЗДІЛЕННЯ ДРІБНОНАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ

https://doi.org/10.37700/ts.2024.24.52-68

УДК 631.3.06-752

Степаненко С.П., Никифоров А.О. ***Дослідження впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення дрібнонасіннєвих матеріалів.***

Анотація. *Досягти точного поділу за єдиним критерієм для дрібнонасіннєвих культур є складним завданням через подібність варіаційних рядів характеристик у різних фракціях. Для досягнення бажаного ефекту необхідно застосовувати складні методи сепарації, що збільшує вартість кінцевого продукту через низьку продуктивність сепараторів, підвищене використання ресурсів та пошкодження насіння від багаторазових циклів обробки. Ця проблема вирішується шляхом додавання симетричних робочих блоків так, щоб блоки розташовувалися над і під вібратором. При однаковому збільшенні кількості поверхонь у блоках центр маси вібростолу залишається незмінним. Ідентичність коливань зберігається, а продуктивність машини підвищується.*

Знакозмінний потік впливає на динаміку переміщення насіння, яке рухається відносно робочих поверхонь під впливом вібрації. Для насіння, що має округлу форму і відносно велику масу і щільність, вплив повітря на процес сепарації не позначається. Для насіння, що має виражені аеродинамічні властивості і відносно невелику масу, вплив повітряного потоку позначається більшою мірою. У деяких випадках цей вплив може бути таким, що практично повністю виключає спрямований вібраційний рух насіннєвого матеріалу.

Дослідження показали, що функція впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення насіння не має вираженого екстремуму. Тому вибір оптимальних конструкційно-режимних параметрів рекомендується здійснювати на межі області їх існування. Для зменшення впливу знакозмінного повітряного потоку на якість вібросепарації насіннєвого матеріалу рекомендується використовувати аеродинамічний екран з вертикальною стінкою висотою 100-110% та відстанню від

кромки 50-65% від величини наявного вертикального зазору між робочими поверхнями блоку. Враховуючи ці параметри, сформульовані практичні рекомендації дозволяють підвищити ефективність віброфрикційної сепарації насіннєвих матеріалів дрібнонасіннєвих культур.

Ключові слова: *насіння, віброфрикційне розділення, екстремум, ефективність сепарації, динаміка переміщення, знакозмінний повітряний потік, аеродинамічний екран.*

Stepanenko S.P., Nykyforov A.O. ***Research on impact of alternating air flow on quality of vibro-frictional separation of fine-seed materials.***

Abstract. *Achieving precise separation by a single criterion for fine-seed crops is challenging due to the similarity in the variation series of characteristics across different fractions. To attain the desired effect, complex separation methods must be applied, which increases the cost of the final product due to the low productivity of separators, increased resource usage, and seed damage from multiple processing cycles. This issue is addressed by adding symmetrical working blocks so that the blocks are positioned above and below the vibrator. When the number of surfaces in the blocks is equally increased, the center of mass of the vibrating table remains unchanged. The oscillation identity is preserved, and the machine's productivity increases.*

The alternating air flow affects the dynamics of seed movement relative to the working surfaces under vibration. For seeds that are rounded and relatively large and dense, the air flow impact on the separation process is negligible. However, for seeds with pronounced aerodynamic properties and relatively low mass, the air flow has a significant effect. In some cases, this impact can practically eliminate the directed vibrational movement of the seed material, resulting in low separation efficiency for such types of seed material.

Studies have shown that the function of the impact of alternating air flow on the quality of vibro-frictional seed separation does not exhibit a distinct extremum. Therefore, the selection of optimal design and operational parameters is recommended at the boundary of their existence. To reduce the impact of alternating air flow on the quality of vibro-separation of seed material, the use of an aerodynamic screen with a vertical wall height of 100-110% and a distance from the edge of 50-65% of the existing vertical gap between the working surfaces of the block is recommended. Considering these parameters, the formulated practical recommendations can enhance the efficiency of vibro-frictional separation of fine-seed crop materials

Key words: *seeds, vibro-frictional separation, extremum, separation efficiency, movement dynamics, alternating air flow, aerodynamic screen.*

Постановка проблеми

Подальше підвищення ефективності процесу віброфрикційного розділення при обробці сумішей насіння дрібних культур обмежується впливом кінематичних параметрів руху насіння та виділених домішок, а також аеродинамічних сил і моментів, які виникають через знакозмінний рух повітря між робочими площинами блоку ВФНС (Віброфрикційного насіннєвого сепаратора) [1-3]. Це означає, що ВФНС з блоками робочих поверхонь не можуть досягти достатніх показників сепарації для деяких типів насіннєвих матеріалів, таких як лікарські рослини та овочі. Вплив змінного повітряного потоку спостерігається у всіх режимах роботи ВФНС (як безперервних, так і з відскоком). Аеродинамічні сили та моменти впливають на процес, викликаючи віднесення насіння повітряним потоком (дія аеродинамічного опору) та зменшуючи

віброфрикційний імпульс через зависання насіння над робочою поверхнею і його обертання навколо центру маси (вплив бокових аеродинамічних сил і моментів) [4-7].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Основним методом збільшення продуктивності вібраційних машин і сепараторів з поздовжньо-поперечним нахилом робочого органу є установка сепаруючих поверхонь одна над іншою і скріплення їх в блоки [8]. Збільшення кількості робочих площин в блоці обмежена умовою проходження сили вібрації через центр ваги частини сепаратора, що коливається. При збільшенні кількості площин в блоці центр ваги зміщується вгору і умова порушується, що веде до порушення ідентичності коливань як по самій площині, так і різних площин в блоці.

Вибір технології сепарації визначається видом оброблюваного насіннєвого матеріалу, фізико-механічними властивостями насіння і співвідношенням характеристик варіаційних рядів. Для культур з відносно великим насінням зазвичай існує хоча б одна фізико-механічна властивість, яка чітко розділяє центри сепарації варіаційних рядів домішок і насіння культури [9]. В таких випадках більшість насіннєочисних машин, що здійснюють поділ за однією ознакою, підходять для сепарації.

Для дрібнонасіннєвих культур важко досягти чіткої сепарації за однією ознакою, оскільки варіаційні ряди характеристик різних фракцій схожі. Для досягнення потрібного ефекту доводиться застосовувати комплексні методи сепарації, що збільшує вартість кінцевого продукту через низьку продуктивність сепараторів, підвищене використання ресурсів і пошкодження насіння через збільшення циклів обробки.

Дослідження [10-16] показали, що віброфрикційні сепаратори досягають більш високого ефекту поділу сипучих матеріалів, враховуючи одночасно три ознаки сепарації насіннєвих матеріалів: форму, шорсткість і пружність, що значно покращує якість сепарації.

В останні роки віброфрикційні сепаратори стали широко використовуватися в гірничорудній промисловості для збагачення азбестових руд, сепарації шліфпорошків, алмазних зерен тощо [17, 18], забезпечуючи значні технічні та технологічні переваги.

Ця проблема вирішується шляхом додавання симметричних робочих блоків так, щоб блоки розташовувалися над і під віброзбудником. При рівному збільшенні кількості поверхонь в блоках центр мас вібростолу не змінює положення. Зберігається ідентичність коливань, збільшується продуктивність машини.

Формулювання мети досліджень

Дослідити вплив повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення дрібнонасіннєвих матеріалів та визначити математичні залежності, які пов'язують конструкційні параметри технічного засобу з фізико-механічними властивостями матеріалу, режимами роботи і якісними показниками сепаратора.

Методичний підхід в проведенні досліджень

Віброфрикційна машина (рис. 1), оснащена блоками сепаруючих поверхонь, усуває основний недолік такого роду машин – їх малу продуктивність. Однак пропоноване технічне нововведення привносить нові чинники, які обумовлюють, в деяких випадках, негативний вплив на якість сепарації (очищення).

Дві паралельно розташовані робочі площини утворюють плоский канал. При здійсненні цими паралельними площинами синхронних коливань, що відбуваються при

роботі віброфрикційної машини, виникає складний просторовий знакозмінний рух повітря в цьому каналі (рис. 2). Відносні швидкості елементів повітря складаються з тангенціальних і нормальних складових, які змінюються в часі за періодичним законом. Закон змінювання цих складових швидкості повітря обумовлений змінюванням відносних швидкостей елементів повітря на торці повітряної області та на границі її контакту з робочим поверхнями блоку. Коли робочі поверхні рухаються відносно інерційної системи координат, на торцях області повітря, що є між поверхнями, повітря набирає відносну швидкість, напрямок якої є протилежний напрямку коливань блоку. На самих робочих поверхнях виникають області підвищеного та зниженого тиску.

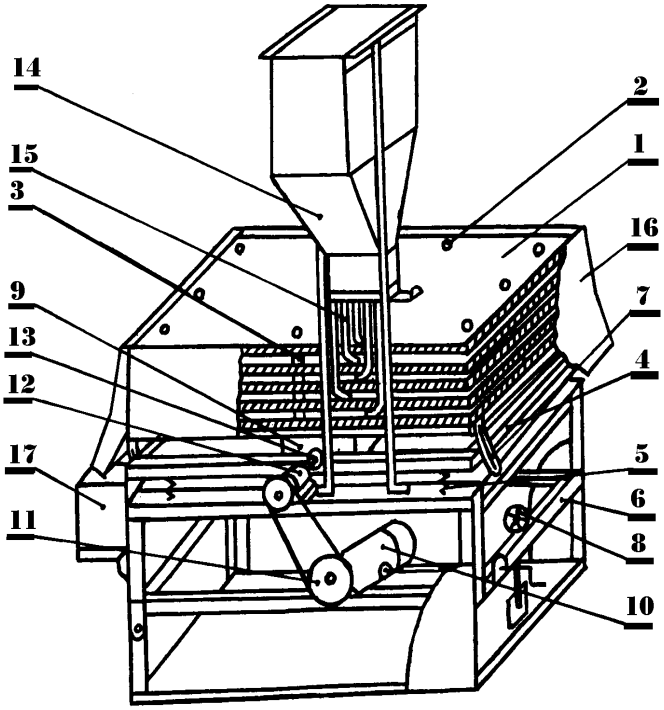
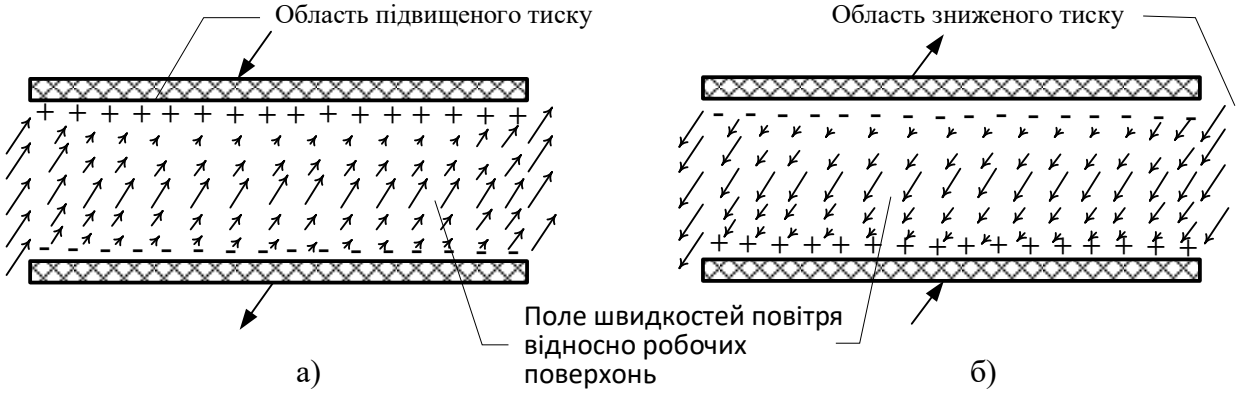


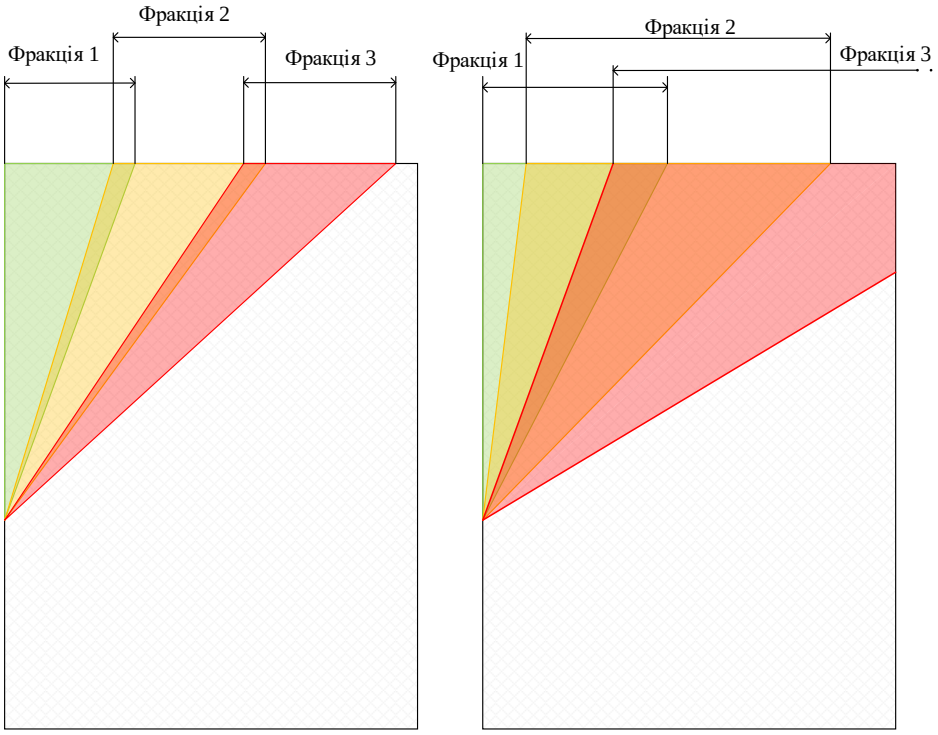
Рис. 1. Конструкційна схема ВФНС з одним блоком фрикційних поверхонь:
1 – фрикційна поверхня; 2 – стяжний болт; 3 – тарована втулка; 4 – вібростіл;
5 – пружина; 6 – проміжна рама; 7, 8 – механізми регулювання поперечного та поздовжнього кутів нахилу; 9 – віброзбудник; 10 – електродвигун; 11 – варіатор;
12 – проміжна опора; 13 – пружна муфта; 14 – бункер; 15 – гнучкі трубки;
16 – напрямні; 17 – приймачі продуктів поділу



а) робочі поверхні рухаються вниз; б) робочі поверхні рухаються вверх
Рис. 2. Знакозмінний повітряний потік між робочими поверхнями блоку ВФНС при здійсненні коливань

Суперпозиція дії областей підвищеного та зниженого тиску та областей з ненульовими швидкостями повітря по торцю робочих поверхонь породжує складну картину знакозмінного поля швидкостей всередині області, що між робочих поверхонь блоку ВФНС.

Знакозмінний потік впливає на динаміку переміщення насіння, яке рухається відносно робочих поверхонь під впливом вібрації. Для насіння, що має округлу форму і відносно велику масу і щільність, вплив повітря на процес сепарації не позначається. Для насіння, що має виражені аеродинамічні властивості і відносно невелику масу, вплив повітряного потоку позначається більшою мірою. У деяких випадках цей вплив може бути таким, що практично повністю виключає спрямований вібраційний рух насіннєвого матеріалу. Це відбувається через зависання насіння в повітрі над робочою поверхнею під впливом підйомної сили та зменшення коефіцієнта тертя, за рахунок якого, власне, і реалізується принцип роботи ВФНС. Ефективність сепарації насіння для такого роду насіннєвого матеріалу низька. Для таких матеріалів відбувається перемішування фракцій за рахунок впливу аеродинамічних сил та моментів на кінематичні параметри вібраційного руху насінин (рис. 3). Сектори можливих траєкторій насінин для відповідних фракцій матеріалу збільшуються, також збільшується ступінь перекриття цих секторів.



а) звичайних; б)чутливих до дії повітряного потоку

Рис. 3. Ефективність застосування ВФНС при розділенні насіннєвих матеріалів

Оскільки ВФНС з блоками робочих площин на сьогоднішній день залишається єдиним простим і дешевим засобом для сепарації важкороздільних насіннєвих матеріалів, в тому числі і дрібнонасіннєвих з вираженими аеродинамічними властивостями насіння, то задача подальшого удосконалення конструкції та налаштування режимів роботи таких машин з метою зменшення або зведення до мінімуму впливу знакозмінного повітряного потоку представляється актуальною.

Представляється доцільним оснастити блок робочих поверхонь ВФНС спеціальним аеродинамічним екраном (рис. 4). Принцип дії такого екрану полягає в усунені динаміки повітря по торцю робочих поверхонь. Це дозволить суттєво знизити або повністю усунити рух повітря відносно робочих поверхонь всередині робочої області.

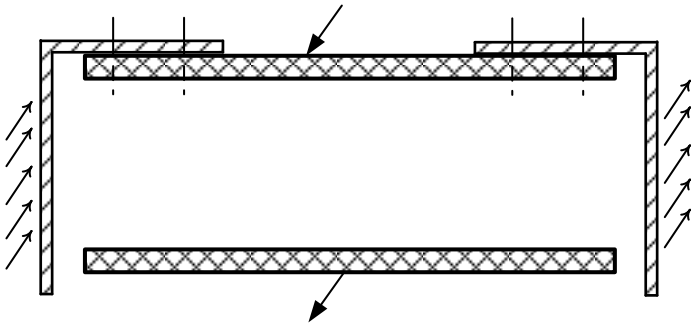


Рис. 4. Використання аеродинамічного екрану для блоку ВФНС з метою усунення знакозмінного повітряного потоку

Для обґрунтування конструкційно-режимних параметрів ВФНС з аеродинамічним екраном необхідно дослідити процес взаємодії робочих органів віброфрикційної машини з навколишнім повітрям, а також знакозмінного повітряного потоку на кінематичні параметри віброфрикційного руху насіння з вираженими аеродинамічними властивостями.

В якості конструкційно-режимних параметрів ВФНС з аеродинамічним екраном розуміється:

– конструкційні параметри аеродинамічного екрану: d/H – висота вертикальної стінки екрану у відношенні до вертикального зазору між двома робочими поверхнями блоку ВФНС; z/H – відстань аеродинамічного екрану від торця робочого блоку у відношенні до вертикального зазору (рис. 5);

– вертикальний зазор між двома робочими поверхнями робочого блоку, H;

– амплітуда коливань, A.

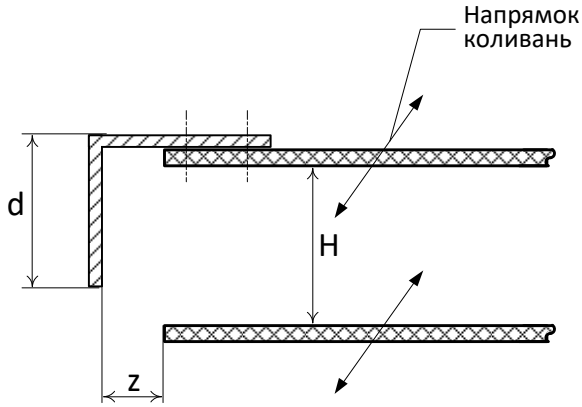


Рис. 5. Конструкційні характеристики аеродинамічного екрану

Обґрунтування раціональних конструкційно-режимних параметрів ВФНС здійснюється за критерієм мінімізації ступеня впливу знакозмінного повітряного потоку на якість вібросепарації насіннєвого матеріалу при урахуванні обмежень на припустимі діапазони змінювання конструкційно-режимних параметрів:

$$K(\boldsymbol{X}) = min, \quad \boldsymbol{X} \in \boldsymbol{X}^{\text{пр}}, \tag{1}$$

де $K(\boldsymbol{X})$ – показник вимірювання відносного змінення ступеня впливу знакозмінного повітряного потоку на якість вібросепарації насіннєвого матеріалу у відношені до встановленого еталону (процесу вібросепарації, де аеродинамічні сили та моменти відсутні); $\boldsymbol{X} = \{d/H\,; z/H\,; H; A\}$ – вектор конструкційно-режимних параметрів; $\boldsymbol{X}^{\text{пр.}}$ – область припустимих значень конструкційно-режимних параметрів.

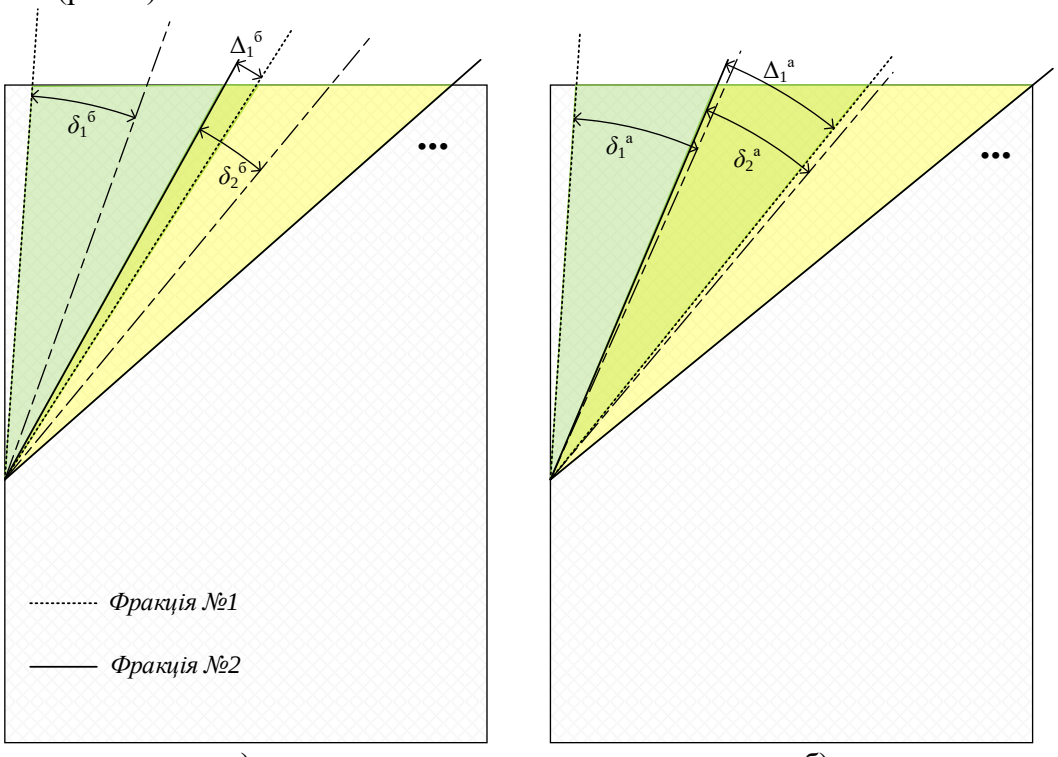
Показник вимірювання відносного змінення ступеню впливу аеродинамічного фактору обчислюється за допомогою наступного виразу:

$$K(\boldsymbol{X}) = \frac{\sum_{i=1}^{N^{\Phi}}(\delta_i^{\text{а}} + \Delta_i^{\text{а}})}{\sum_{i=1}^{N^{\Phi}}(\delta_i^{\text{б}} + \Delta_i^{\text{б}})}, \tag{2}$$

$$\Delta_i = \begin{cases} (\phi_i + \delta_i) - (\phi_{i+1} + \delta_{i+1}), \text{якщо } (\phi_i + \delta_i) - (\phi_{i+1} + \delta_{i+1}) \geq 0, \\ 0, \text{якщо } (\phi_i + \delta_i) - (\phi_{i+1} + \delta_{i+1}) < 0 \text{ або } i = N^{\Phi}, \end{cases} \tag{3}$$

де Δ_i – кут сектора перекриття секторів можливих траєкторій насіння i-ої та i+1-ої фракцій насіннєвої сіміші; φ_i – математичне очікування кута відхилення середньої осі віброфрикційного руху насіння i-ої фракції відносно осі Y; δ_i – половинний кут сектору можливих траєкторій насіння i-ої фракції; N^{Φ} – кількість фракцій насіннєвого матеріалу, що досліджується. Позначки «б» та «а», що є у виразі, визначають параметри, які отримано без урахування та з урахуванням аеродинамічних сил та моментів, відповідно.

Фізичний зміст показника (2) полягає в тому, що він показує в скільки зростає відносне перекриття секторів можливих траєкторій насіння різних фракцій для встановлених параметрів настроювання технологічного процесу вібросепарації у відношенні до перекриття секторів, що є у випадку відсутності аеродинамічних сил та моментів (рис. 6).



а) б)

а) дія аеродинамічних сил та моментів відсутня; б) діють аеродинамічні сили та моменти

Рис. 6. Суперпозиція секторів можливих траєкторій віброфрикційного руху насіння різних фракцій

З цього, коли показник (2) дорівнює одиниці, вплив знакозмінного повітряного потоку на кінематичні параметри віброфрикційного руху насіння – відсутній.

За критерієм (1) визначаються раціональні конструкційно-режимні параметри ВФНС з аеродинамічним екраном для визначеного насіннєвого матеріалу (задані геометричні та фізико-механічні властивості насінин для встановлених фракцій матеріалу).

Для виконання параметричного аналізу було створено математичну модель віброфрикційного руху насінини з урахуванням дії аеродинамічних сил та моментів.

В якості базової моделі використана модель безвідривного руху твердого тіла з перекочуванням і проковзуванням по шорсткій нахиленій поверхні, що здійснює вібраційні коливання. Тіло рухається під дією:

- сили тяжіння;
- реакції опори;
- аеродинамічних сил та моментів, що виникають при русі повітря.

Систему диференціальних рівнянь механіки, записано для зміни кількості руху і зміни моменту кількості руху в інерційній системі координат

$$\begin{cases} \frac{d\boldsymbol{L}_{\text{I}}}{dt} = \boldsymbol{F}, \\ \frac{d\boldsymbol{H}_{\text{I}}}{dt} = \boldsymbol{M}_{\text{I}}, \end{cases} \tag{4}$$

де $\boldsymbol{L}_{\text{I}}$ – кількість руху тіла в прийнятій інерційній системі координат; $\boldsymbol{H}_{\text{I}}$ – момент кількості руху тіла в інерційній системі координат; $\boldsymbol{F}$ – рівнодіюча зовнішніх сил, прикладених до даного тіла; $\boldsymbol{M}_{\text{I}}$ – рівнодіючий момент від зовнішніх сил, прикладених до тіла, який обчислюється відносно початку інерційної системи координат.

Рух насіння відносно робочої поверхні розглядається як суперпозиція рухів його обертання відносно точки контакту K і поступального переміщення миттєвого центру обертання (рис. 7). Обертання насіння характеризується величиною кутової швидкості ω, з якою відбувається зміна напряму радіус-вектора $\mathbf{R}_C$, у системі координат робочої поверхні. Поступальне переміщення характеризується величиною вектору швидкості $\mathbf{V}_K$ в інерціальній (нерухомій) системі координат. Поступальний рух насіння обумовлений періодичними коливаннями робочої поверхні, які передаються йому через точку контакту.

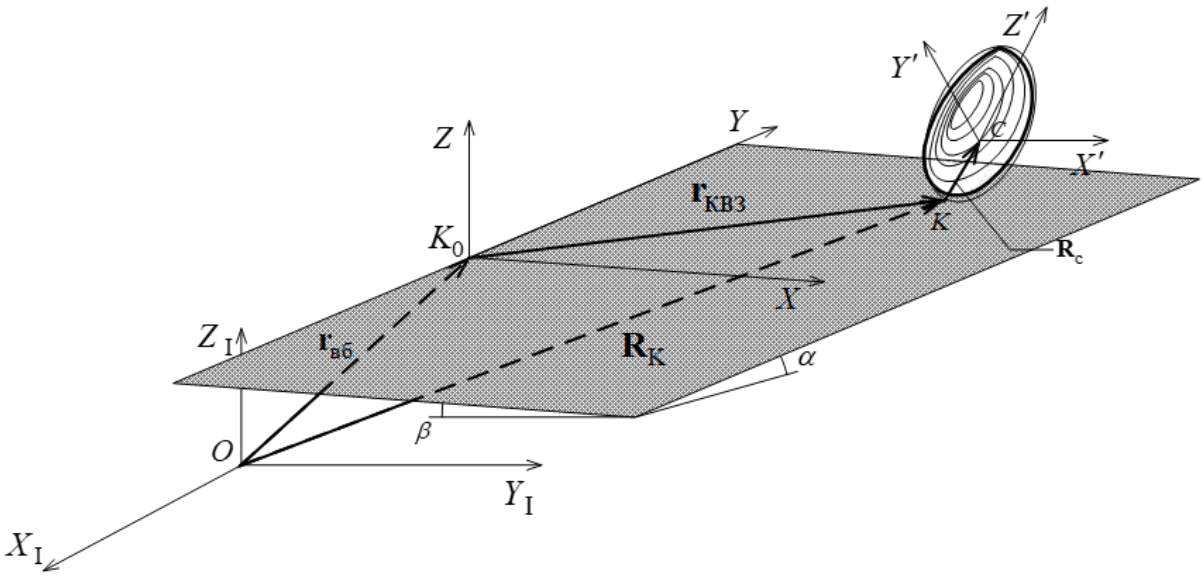


Рис. 7. Встановлені системи координат для розрахунку кінематичних параметрів руху насіння

Для обчислення кінематичних параметрів руху ізольованого насіння розглядаємо три системи координат (рис. 7):

– власна система координат $CX'Y'Z'$, пов'язана з насінням і така, що має початок в його центрі маси. Для зручності приймаємо, що осі, CY' і CZ' співпадають з головними осями інерції насіння, що розглядається;

– система координат K_0XYZ, пов'язана з робочою поверхнею і така, що має початок в т. K_0, яка є точкою подачі насіння на робочу поверхню;

– інерційна (нерухома) система координат $OX_{\text{I}}Y_{\text{I}}Z_{\text{I}}$.

Робоча поверхня нахилена по відношенню до інерційної системи координат в двох площинах. Нахил задаємо двома кутами α і β. Кут α характеризує нахил поздовжньої осі робочої поверхні до площини горизонту. Кут β характеризує нахил поперечної осі робочої поверхні до площини горизонту.

Положення робочої поверхні відносно інерціальної системи координат $OX_{\text{и}}Y_{\text{и}}Z_{\text{и}}$ задаємо радіус-вектором $\text{r}_{\text{вб}}$, який визначає місце розташування т. K_0. Похідна $\dot{\text{r}}_{\text{вб}}$ характеризує гармонійні коливання, які здійснює робоча поверхня під дією віброзбудника.

Радіус-вектор $r_{\text{вб}}$ задає місце розташування точки контакту насіння з робочою поверхнею відносно початку системи координат K_0XYZ робочої поверхні. Похідна $\dot{\text{r}}_{\text{квз}}$ характеризує рух проковзування насіння відносно робочої поверхні.

Місце розташування точки контакту відносно початку інерційної системи координат задає радіус-вектор R_K. Похідна радіус-вектора $\dot{\text{R}}_K$ характеризує рух насіння відносно інерціальної (нерухомої) системи координат.

Місце розташування центру маси насіння відносно точки його контакту з робочою поверхнею задає радіус-вектор R_C.

Система диференційних рівнянь (4) розв'язується як задача Коши при використанні методу Ейлера з покроковим просуванням по осі часу з постійним кроком інтегрування. На кожному кроці обчислюються миттєві значення кутових прискорень для кутів Ейлера та лінійних прискорень проковзування точки контакту твердого тіла.

Для обчислення миттєвих кутових і лінійних прискорень твердого тіла використовується алгебраїчна система рівнянь:

$$\begin{cases} \ddot{\theta}\cdot A_{11}+\ddot{\phi}\cdot A_{12}+\ddot{\psi}\cdot A_{13}+\ddot{x}_{\text{квз}}\cdot A_{14}+\ddot{y}_{\text{квз}}\cdot A_{15}=B_1, \\ \ddot{\theta}\cdot A_{21}+\ddot{\phi}\cdot A_{22}+\ddot{\psi}\cdot A_{23}+\ddot{x}_{\text{квз}}\cdot A_{24}+\ddot{y}_{\text{квз}}\cdot A_{25}=B_2, \\ \ddot{\theta}\cdot A_{31}+\ddot{\phi}\cdot A_{32}+\ddot{\psi}\cdot A_{33}+\ddot{x}_{\text{квз}}\cdot A_{34}+\ddot{y}_{\text{квз}}\cdot A_{35}=B_3, \\ \ddot{\theta}\cdot A_{41}+\ddot{\phi}\cdot A_{42}+\ddot{\psi}\cdot A_{43}+\ddot{x}_{\text{квз}}\cdot A_{44}+\ddot{y}_{\text{квз}}\cdot A_{45}=B_4, \\ \ddot{\theta}\cdot A_{51}+\ddot{\phi}\cdot A_{52}+\ddot{\psi}\cdot A_{53}+\ddot{x}_{\text{квз}}\cdot A_{54}+\ddot{y}_{\text{квз}}\cdot A_{55}=B_5, \end{cases} \quad (5)$$

де $A_{i,j}=f(\theta,\varphi,\psi,x_{\text{квз}},y_{\text{квз}},t)$, $B_i=f(\theta,\varphi,\psi,x_{\text{квз}},y_{\text{квз}},t)$, i,j=1,…,5 – постійні коефіцієнти, які обчислені для визначеного моменту часу.

Систему (5) отримано з системи (4) шляхом її лінеаризації відносно кутових та лінійних прискорень для заданого моменту часу. Коефіцієнти, що входять до складу рівнянь, залежать від динаміки повітря, просторового положення та кінематичних параметрів руху насіння, але для визначеного моменту часу вони є постійними. Ці коефіцієнти визначаються на попередньому кроці інтегрування.

Для розв'язання (5) використовується метод Крамера

$$p_i=\frac{D_i}{D},\ i=1,\dots,5, \quad (6)$$

де $p_i, i=1,\dots,5$ – корені (13) для визначених коефіцієнтів $A_{i,j}$ та B_i, $p_1=\ddot{\theta}(t)$, $p_2=\ddot{\phi}(t)$, $p_3=\ddot{\psi}(t)$, $p_4=\ddot{x}_{\text{квз}}(t)$, $p_5=\ddot{y}_{\text{квз}}(t)$; D_i – визначник матриці коефіцієнтів (5), де i-ий стовбець замінений стовпцем B; D – визначник матриці коефіцієнтів.

Для відомих миттєвих кутових та лінійних прискорень обчислюються кінематичних параметрів руху твердого тіла за допомогою наступних рекурентних співвідношень:

$$\begin{cases} \dot{\theta}(t) = \dot{\theta}(t-\Delta t) + \ddot{\theta}(t)\Delta t\,, \\ \theta(t) = \theta(t-\Delta t) + \dot{\theta}(t)\Delta t, \\ \vdots \\ \dot{y}_{\text{квз}}(t) = \dot{y}_{\text{квз}}(t-\Delta t) + \ddot{y}_{\text{квз}}(t)\Delta t, \\ y_{\text{квз}}(t) = y_{\text{квз}}(t-\Delta t) + \dot{y}_{\text{квз}}(t)(t)\Delta t, \end{cases} \quad (7)$$

де θ, ϕ, ψ – кути Ейлера для твердого тіла; $x_{\text{квз}}$, $y_{\text{квз}}$ – координати точки контакту K в системі координат робочої поверхні; Δt – постійний крок просування по осі часу.

Розроблена математична модель реалізована у вигляді комплексного алгоритму інтегрування вібраційного руху насінини визначеної форми з встановленими фізико-механічними характеристиками (рис. 8).

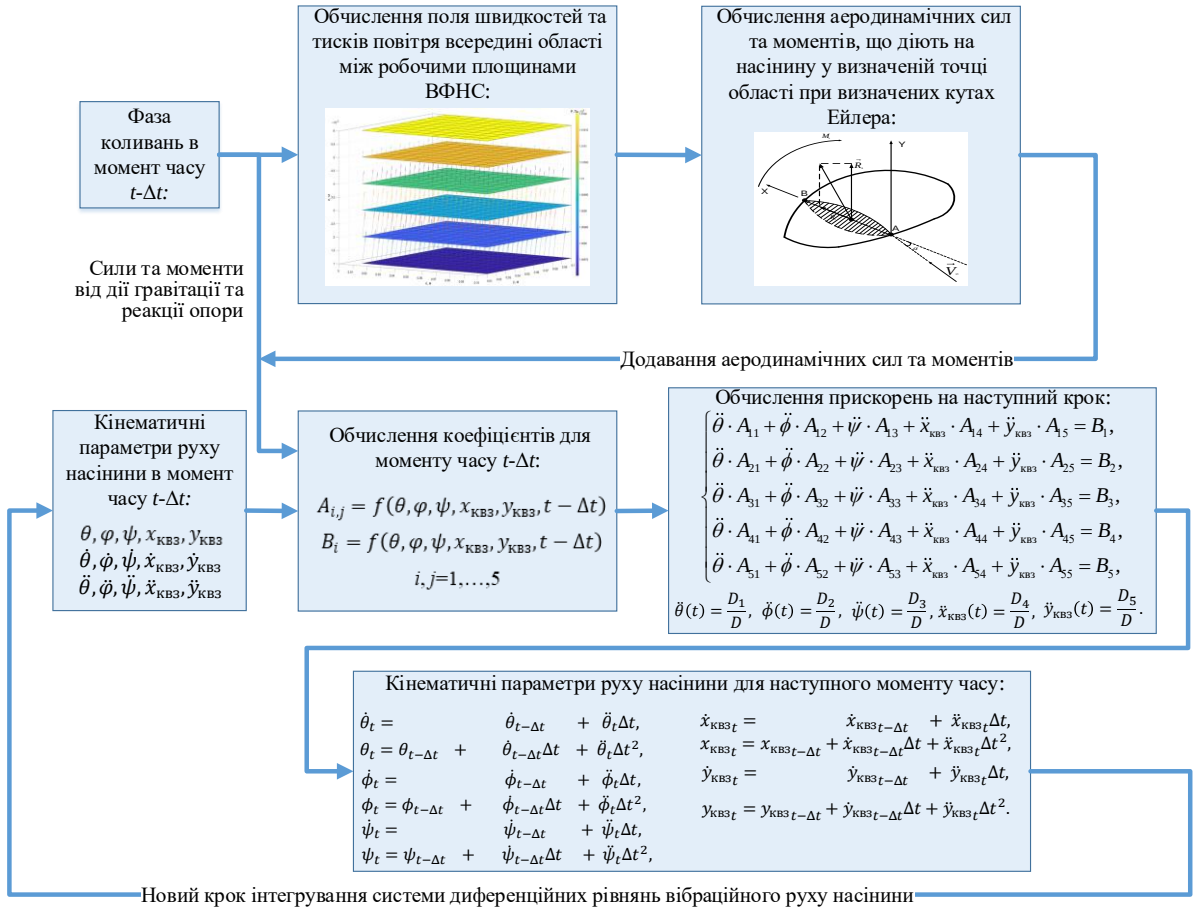


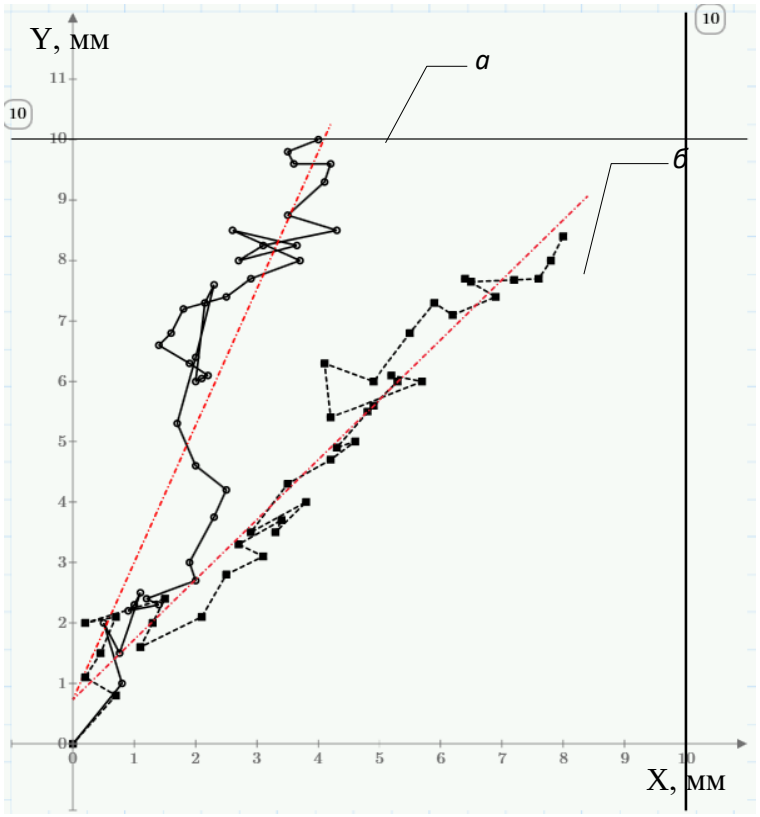
Рис. 8. Комплексний алгоритм інтегрування вібраційного руху насінини

При вході в алгоритм задаються початкові значення кінематичних параметрів насінини (у точці живильника робочої поверхні ВФНС). Далі, для поточної фази коливань робочої поверхні, обчислюється поле швидкостей та тисків повітря у середині області. Для вектору швидкості повітря, що відповідає точці місцезнаходження насінини, з урахуванням її просторового орієнтування, обчислюються аеродинамічні характеристики. Миттєві аеродинамічні сили та моменти, що діють на поверхню насінини, додаються до системи рівнянь вібраційного руху. Обчислюються коефіцієнти лінеаризованої системи рівнянь, які враховують дію аеродинамічних сил та моментів.

Далі визначаються кутові та лінійні прискорення насінини, які використовуються для покрокового інтегрування кінематичних параметрів руху.

Створена модель дозволяє враховувати вплив аеродинамічних сил та моментів на кінематичні параметрі вібраційного руху насінини залежно від фази коливань ВФНС та точки місцезнаходження насінини у області між двома робочими поверхнями. Вплив руху повітря проявляється як відхилення апроксимуючої осі вібраційного руху насінини та збільшення сектору можливих траєкторій, що будується відносно цієї осі (рис. 9).

Оскільки поле швидкостей та тисків повітря обчислюється з урахуванням таких параметрів, як: амплітуда коливань, конструкційні параметри аеродинамічного екрану, вертикальний зазор між робочими площинами, запропонована модель дозволяє досліджувати вплив цих параметрів на ефективність різних варіантів реалізації конструкційно-режимних параметрів ВФНС з аеродинамічним екраном на підставі проведення чисельного експерименту. Вплив знакозмінного повітряного потоку проявляється як збільшення кутів розкриття секторів можливих траєкторій насінин з однієї фракції та збільшення кутів перекриття секторів для різних фракцій насіннєвого матеріалу. На підставі цих даних можна побудувати показник вимірювання ступеня зниження ефективності ВФНС щодо розділення дрібнонасіннєвих матеріалів за рахунок впливу знакозмінного повітряного потоку.



а) без урахування та б) з урахуванням аеродинамічних сил та моментів

Рис. 9. Результати моделювання віброфрикційного руху насінини пастернаку

Параметричний та регресійний аналіз за результатами чисельного моделювання проводився для наступних діапазонів варіювання конструкційно-режимних параметрів:

– відносна висота вертикальної стінки екрану для одиничного робочого блоку (робочого блоку, що складається з двох робочих поверхонь):

$$\frac{d}{H} \in [0; 1{,}5], \tag{8}$$

– відносна відстань вертикальної стінки екрану від кромки робочої поверхні:

$$\frac{z}{H} \in [0{,}3; 1], \quad (9)$$

– вертикальний зазор між двома робочими поверхнями робочого блоку ВФНС:

$$H \in [6; 15], [\text{мм}], \quad (10)$$

– амплітуда коливань:

$$A \in [0{,}5; 3], [\text{мм}]. \quad (11)$$

Для зручності проведення регресійного аналізу, визначені конструкційно-режимні параметри приводилися до єдиного інтервалу варіювання – нормувалися. Нормування показників здійснювалось за наступними формулами

$$\bar{z} = \frac{z/H - 0{,}3}{1 - 0{,}3} = \frac{z/H - 0{,}3}{0{,}7}, \quad (12)$$

$$\bar{d} = \frac{d/H - 0}{1{,}5 - 0} = \frac{d/H}{1{,}5}, \quad (13)$$

$$\bar{H} = \frac{H - 6}{15 - 6} = \frac{H - 6}{9}, \quad (14)$$

$$\bar{A} = \frac{A - 0{,}5}{3 - 0{,}5} = \frac{A - 0{,}5}{2{,}5}, \quad (15)$$

де $\bar{z}$, $\bar{d}$, $\bar{H}$, $\bar{A}$ – нормовані значення конструкційно-режимних параметрів. Всі нормовані параметри змінюються на інтервалі [0; 1] та є безрозмірними.

Чисельний експеримент проводився для насіння: пастернаку, салату листкового; кропу запашного.

В якості параметрів відклику при проведенні чисельного експерименту брались кути відхилення апроксимуючих осей траєкторій віброфрикційного руху насіння встановлених фракцій, φ_i, i=1, …, $N_ф$, де $N_ф$ – кількість фракцій насіннєвого матеріалу, та половинні кути секторів можливих траєкторій цих фракцій, δ_i, i=1, …, $N_ф$.

Результати досліджень

Чисельний експеримент проводився за чотирьохфакторним трирівневим планом [19]. Згідно плану експериментальних досліджень за допомогою чисельного моделювання визначалися математичні очікування кутів нахилу траєкторій та половинних кутів секторів можливих траєкторій насіння пастернаку, кропу і салату листкового, за фракціями цих насіннєвих матеріалів.

По кожному пункту плану експерименту, для кожної фракції насіннєвого матеріалу, проводилось двадцять прогонів математичної моделі віброфрикційного руху насінини з початковими значеннями кутів орієнтації насіння, які визначалися випадковим чином. Математичні очікування кутів нахилу траєкторій для різних фракцій насіннєвих матеріалів обчислювалось, як:

$$[\phi_{i,f}] = \frac{\sum_{n=1}^{20} \phi_{i,f,n}}{20}, \quad (16)$$

де

$$\phi_{i,f,n} = arctg\left(\frac{S\sum_{s=1}^{S} X_{i,f,n,s} Y_{i,f,n,s} - \sum_{s=1}^{S} X_{i,f,n,s} \sum_{s=1}^{S} Y_{i,f,n,s}}{S\sum_{s=1}^{S} X_{i,f,n,s}^2 - \left(\sum_{s=1}^{S} X_{i,f,n,s}\right)^2}\right) \cdot 57, [\text{град.}], \quad (17)$$

де $[\phi_{i,f}]$ – математичне очікування куту нахилення траєкторії віброфрикційного руху насіння f-ої фракції насіннєвого матеріалу i-го виду; $\phi_{i,f,n}$ – кут нахилу траєкторії насінини, реалізований для n-го варіанту випадково визначених початкових кутів його орієнтації; $X_{i,f,n,s}$, $Y_{i,f,n,s}$ – координати місцезнаходження центра маси насінини i-го виду f-ої фракції на s-му кроці обчислень для n-го варіанту реалізації початкових кутів орієнтування насінини; S – задана кількість кроків при інтегруванні системи диференційних рівнянь віброфрикційного руху насінини.

Половинні кути секторів можливих траєкторій насінин обчислювались, як:

$$\delta_{i,f} = 3\sqrt{\sigma^2_{\phi_{i,f}}} = 3\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{20}([\phi_{i,f}]-\phi_{i,f,n})^2}{20-1}}, \quad (18)$$

де $\delta_{i,f}$ – половинний кут сектору можливих траєкторій насіння *f*-ої фракції насіннєвого матеріалу *i*-го виду. Значення цього куту визначається як потрійне середньоквадратичне відхилення від математичного очікування куту нахилення траєкторії $[\phi_{i,f}]$. Оскільки вірогідна величина куту нахилення траєкторії має нормальний закон розподілення вірогідності, тоді всі можливі випадкові значення цього куту мають знаходитися в межах інтервалу, який дорівнює потрійному середньоквадратичному відхиленню (СКВ) цієї величини у кожен бік; $\sigma_{\phi_{i,f}}$ – СКВ куту відхилення траєкторії віброфрикціного руху насіння *f*-ої фракції насіннєвого матеріалу *i*-го виду.

За результатами чисельного експерименту сформовано регресійні моделі з оцінки значень показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість розділення фракцій насіння:

- пастернака:

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

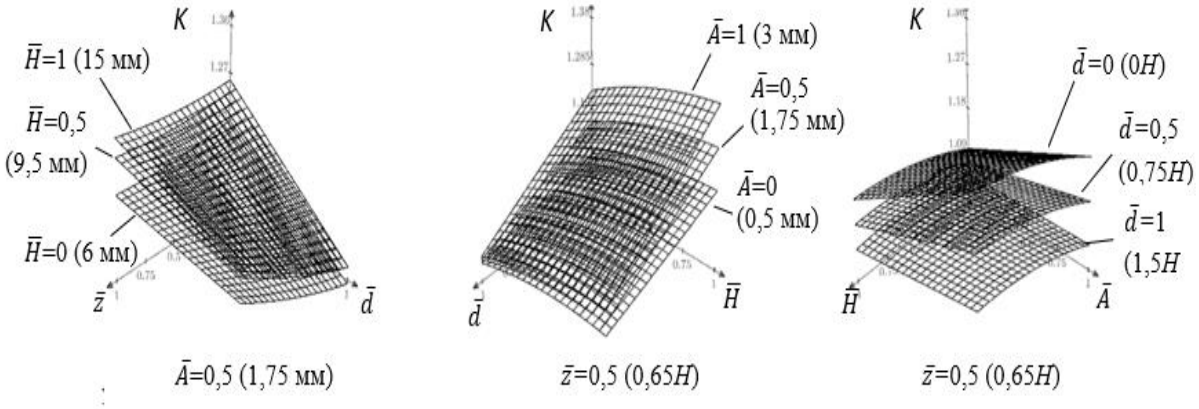
- салату листкового:

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

- кропу запашного:

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

За допомогою отриманих рівнянь був проведений параметричний аналіз з оцінки ефективності заходів щодо усунення впливу динаміки повітря (рис. 10). Найбільш впливовими виявилися такі фактори: амплітуда коливань, геометричні характеристики екрану та вертикальний зазор між робочими поверхнями.



а) б) в)

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 амплітуди коливань при встановлених конструкційних параметрах екрану

Рис. 10. Показник ступеня впливу знакозмінного повітряного потоку на ефективність вібросепарації насіння пастернаку

Оскільки функція показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення не має вираженого екстремуму, а монотонно змінюється у межах встановленої області варіювання конструкційно-режимних параметрів, то їх раціональні значення слід шукати на границі області варіювання цих параметрів. На підставі параметричного аналізу обґрунтовано раціональні значення конструкційно-режимних параметрів ФВНС з екраном. Для практично повного виключення впливу динаміки повітря доцільно мати аеродинамічний екран з: висотою вертикальної стінки 100÷110% від величини наявного вертикального зазору між робочими поверхнями блоку ВФНС (6÷15 мм); відстанню стінки від кромки блоку – 50÷65% від наявного вертикального зазору. Блок ВФНС з вертикальним зазором між робочими поверхнями – 6 мм. Амплітуда коливань – 0,5 мм.

Аналіз існуючих методів і моделей підвищення продуктивності і якості вібросепарації насіннєвих матеріалів овочевих та лікарських рослин, насіння яких чутливі до дії знакозмінного повітряного потоку, показав, що ступінь цього впливу залежить від конструкції робочих блоків, аеродинамічного екрану та амплітуди коливань ВФНС. Це створює умови для удосконалення технологічного процесу вібросепарації насіннєвих матеріалів, чутливих до руху повітря.

В якості показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення насіннєвих матеріалів доцільно брати відношення суми фактичних і нормативних половинних кутів розкриття та кутів перекриття секторів можливих траєкторій руху насіння різних фракцій. Під нормативними кутами розуміються такі кути, коли вплив знакозмінного повітряного потоку відсутній. Цей показник є відносною чисельною мірою змінення якості віброфрикційного розділення насіннєвого матеріалу внаслідок дії знакозмінного повітряного потоку. Він приймає значення більші або рівні одиниці. Якщо показник дорівнює одиниці вплив знакозмінного повітряного потоку відсутній.

За результатами регресійного аналізу залежність показника впливу знакозмінного повітряного потоку на якість розділення насіннєвих матеріалів має нелінійний характер та описується регресійним рівнянням другого порядку. Найбільш впливовими виявилися: конструкційні характеристики екрану та вертикальний зазор між робочими поверхнями. При цьому, оскільки змінення вертикального зазору між робочими поверхнями, а також амплітуди коливань обмежене вимогами налагодження процеса вібросепарації конкретної культури, то єдиним дієвим засобом зменшення впливу знакозмінного потоку повітря на якість розділення насіння є екран.

Висновки

1. За допомогою розробленої математичної моделі були отримані регресійні рівняння другого порядку, які описують вплив знакозмінного повітряного потоку на якість сепарації насіннєвих матеріалів у залежності від конструкційно-режимних параметрів ВФНС з аеродинамічним екраном для певних рослинних культур. Ці рівняння дозволяють проводити параметричний аналіз та кількісне порівняння варіантів удосконалення і налаштування ВФНС без необхідності у складному чисельному моделюванні.

2. Дослідження показали, що функція впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення насіння не має вираженого екстремуму. Тому вибір оптимальних конструкційно-режимних параметрів рекомендується здійснювати на межі області їх існування.

3. Для зменшення впливу знакозмінного повітряного потоку на якість вібросепарації насіннєвого матеріалу рекомендується використовувати аеродинамічний

екран з вертикальною стінкою висотою 100-110% та відстанню від кромки 50-65% від величини наявного вертикального зазору між робочими поверхнями блоку. Враховуючи ці параметри, сформульовані практичні рекомендації дозволяють підвищити ефективність віброфрикційної сепарації насіннєвих матеріалів дрібнонасіннєвих культур.

Список використаних джерел

1. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Очистка і Сепарація насіння. Харків, 2006. Око. 407 с.
2. Тищенко Л.Н. Интенсификация сепарирования зерна, 2004. Харьков: Основа. 368 с.
3. Тищенко Л.Н., Мазоренко Д.И., Пивень М.В., Харченко С.А. Моделирование процессов зерновых сепараторов: монографія. Харків. 2010. Міськдрук. 360 с.
4. Котов Б.І. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилювання, охолодження): монографія. Ніжин. ПП Лисенко. 2017. 487 с.
5. Алієв Е.Б. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя. СТАТУС. 2019. 196 с.
6. Богомолов О.В. Кісь В.М., Лук'янов І.М., Акіншин В.В. До розробки алгоритму аналізу та сепарації зернових сумішей. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. Харків. 2019. С. 60–66.
7. Завгородний А.И., Синяева О.В. Движения шара в воздушном потоке между вибрирующими плоскостями. Вібрації в техніці та технологіях. 2012. № 3(67). С. 20–27.
8. Лук'яненко В.М., Галич І.В., Никифоров А.О. Мехатронна вібраційна насіннєочисна машина. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2015. № 156. С. 413–419.
9. Манчинський Ю.О. Обґрунтування параметрів розділення насіннєвих сумішей на вібруючій поверхні: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук. Київ. 2000. 35 с.
10. Козаченко О.В., Алієв Е.Б., Бакум М.В., Михайлов А.Д., Крекот М.М. Обґрунтування ефективності використання віброфрикційного сепаратора при підготовці насіннєвого матеріалу гірчиці. Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН. 2021. Вип. 31. С. 142–151. https://doi.org/10.36710/ioc-2021-31-13.
11. Aliiev E., Gavrilchenko A., Tesliuk H., Tolstenko A., Koshul'ko V. Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on thevibrating surface. Acta Periodica Technologica. 2019. APTEFF. Vol. 50. P. 12–22. https://doi.org/10.2298/APT1950012A.
12. Михайлов А.Д., Бакум М.В., Челапко Д.О. Розділення компонентів насіннєвої суміші коріандру за граничним кутом підйому. Матеріали XIX міжнародного форуму молоді "Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті". 06-07. 04. Харків. 2023. 22 с.
13. Заїка П.М., Бакум М.В., Михайлов А.Д. Вібраційна насіннєочисна машина для доочищення насіння сільськогосподарських культур. Пропозиція. 2005. № 6. С. 102.
14. Михайлов А.Д., Пастухов В.І., Бакум М.В. Машини, агрегати та комплекси для післязбиральної обробки зерна і насіння. Харків. 2012. 95 с.
15. Лук'яненко В.М. Обґрунтування параметрів процесу сепарації насіння ріпака і суріпиці на вібраційній машині: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук. Харків. 2001. 20 с.
16. Котов Б.І., Степаненко С.П. Основи теорії та технології повітряної сепарації зернових матеріалів: монографія. Київ. ЦП Компринт. 2023. 427 с.

17. Громадський А.С., Горбачов Ю.Г., Ліфенцов О.С. Проектування, формування та використання комплексів гірничорудного механізованого обладнання: навчальний посібник. Кривий Ріг. КНУ. 2017. 229 с.

18. Білецький В.С., Олійник Т.А., Смирнов В.О., Скляр Л.В. Техніка та технологія збагачення корисних копалин. Кривий Ріг. КНУ. 2019. 87 с.

19. Нечаєв В.П., Берідзе Т.М., Кононенко В.В. Теорія планування експерименту: навчальний посібник. Київ. 2005. 232 с.

References

1. Zaika P.M. (2006). Theory of agricultural machines. Cleaning and Separation of seeds. Kharkiv. Oko. 407 p. [in Ukrainian].

2. Tyshchenko L.N. (2004). Intensification of grain separation. Kharkiv: Osnova. 368 p. [in Ukrainian].

3. Tyshchenko L.N., Mazorenko D.I., Pyven M.V., Kharchenko S.A. (2010). Modeling of grain separator processes: monograph. Kharkiv: Miskdruk. 360 p. [in Ukrainian].

4. Kotov B. I. (2017). Modeling of technological processes in typical objects of post-harvest processing and grain storage (separation, drying, active ventilation, cooling) monograph. Nizhin. PP Lysenko. 487 p. ISBN 978-617-640-351-7 [in Ukrainian].

5. Aliyev E.B. (2019). Physico-mathematical models of processes of precision separation of sunflower seed material: monograph. Zaporizhzhia: STATUS. 196 p. ISBN 978-617-7759-32-3. [in Ukrainian].

6. Bogomolov O.V., Kis V.M., Lukyanov I.M., Akinshin V.V. (2019). To the development of an algorithm for the analysis and separation of grain mixtures. Herald of KhNTUSG. Kharkiv. P. 60–66. [in Ukrainian].

7. Zavgorodny A. I., Sinyaeva O. V. (2012). Ball motions in air flow between vibrating planes. Vibrations in engineering and technology. No. 3(67). P. 20–27. [in Ukrainian].

8. Lukyanenko V. M., Halych I. V., Nikiforov A. O. (2015). Mechatronic vibrating seed cleaning machine. Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasylenko. No. 156. P. 413–419. [in Ukrainian].

9. Manchynskyi Yu.O. (2000). Justification of the parameters of the separation of seed mixtures on a vibrating surface: autoref. thesis for obtaining sciences. degree of Dr. Tech. of Science. Kyiv. 35 p. [in Ukrainian].

10. Kozachenko O.V., Aliev E.B., Bakum M.V., Mykhaylov A.D., Krekot M.M. (2021). Justification of the effectiveness of using a vibro-friction separator in the preparation of mustard seed material. Scientific and technical bulletin of the Institute of Oil Crops of the National Academy of Sciences. Vol. 31. P. 142–151. https://doi.org/10.36710/ioc-2021-31-13 [in Ukrainian].

11. Aliiev E., Gavrilchenko A., Tesliuk H., Tolstenko A., Koshul'ko V. (2019). Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on thevibrating surface. Acta Periodica Technologica. APTEFF. Vol. 50. P. 12–22. https://doi.org/10.2298/APT1950012A [in Czech Republic].

12. Mykhaylov A. D., Bakum M. V., Chelapko D. O. (2023). Separation of the components of the coriander seed mixture by the limiting angle of elevation. Materials of the XIX International Youth Forum "Youth and Industry 4.0 in the XXI Century". 06-07.04.2023. Kharkiv. 22 p. [in Ukrainian].

13. Zayka P. M., Bakum M. V., Mykhaylov A. D. (2005). Vibrating seed cleaning machine for additional cleaning of agricultural crop seeds. Magazine Proposal. No. 6. p. 102. [in Ukrainian].

14. Mykhailov A.D., Pastukhov V.I., Bakum M.V. (2012). Machines, aggregates and complexes for post-harvest processing of grain and seeds. Kharkiv. Educational edition. 95 p. [in Ukrainian].

15. Lukyanenko V.M. (2001). Justification of the parameters of the process of separation of rape and sorghum seeds on a vibrating machine: autoref. thesis for obtaining the degree of candidate. technical of sciences. Kharkiv. 20 p. [in Ukrainian].

16. Kotov B.I., Stepanenko S.P. (2023). Fundamentals of the theory and technology of air separation of grain materials. monograph. Kyiv. CP Comprint. 427 p. ISBN 978-617-8269-64-7 [in Ukrainian].

17. Hromadsky A.S., Gorbachev Yu.G., Lifentsov O.S. (2017). Design, formation and use of mechanized mining equipment complexes: Training. manual. Kryvyi Rih. KNU. 229 p. [in Ukrainian].

18. Biletsky V.S., Oliynyk T.A., Smirnov V.O., Sklyar L.V. (2019). Technique and technology of mineral enrichment. Kryvyi Rih. KNU. 87 p. [in Ukrainian].

19. Nechaev V.P., Beridze T.M., Kononenko V.V. (2005). Theory of experiment planning. Education manual. Kyiv. 232 p. [in Ukrainian].