

УДК 631.365

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.88-96>**Р.А. Калініченко**, доц., канд. техн. наук*ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут», м. Ніжин, Україна***С.П. Степаненко**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.*Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства», смт Глеваха, Україна**e-mail: stepanenko_s@ukr.net***Б.І. Котов**, проф., д-р техн. наук*Подільський державний аграрно-технічний університет, м. Кам'янець-Подільський, Україна*

Формування швидкісного режиму вібропереміщення зерна в процесах термообробки

У статті складено і розв'язано систему диференціальних рівнянь руху матеріальної точки вздовж пористої (повітропроникної) поверхні, що нахилена під кутом до горизонту. На основі аналізу рішень даної системи диференціальних рівнянь запропоновано змінювати швидкість переміщення зерна частотою коливань опорної поверхні, кутом нахилу опорної поверхні до горизонту та коефіцієнтом тертя. Також одержано графічні залежності швидкості переміщення зерна від кута нахилу опорної поверхні до горизонту, коефіцієнта тертя та частоти коливань.

Теоретично обґрунтована можливість уповільнення вібропереміщення зерна повітряним потоком, що подається знизу пористої опорної поверхні проти (під кутом) напрямку переміщення зерна, а також використанням асиметрично рифленої опорної поверхні з вертикальними перфораціями.

Експериментально визначена лінійна регресійна залежність зміни швидкості вібропереміщення, яка дає можливість формування необхідного швидкісного режиму вібропереміщення зерна зміною параметрів: нахилу віброуючої площини $5^\circ \div 9^\circ$, частоти коливань $45 \div 55 \text{ с}^{-1}$, швидкості повітряного потоку $0,1 \div 2 \text{ м/с}$; в оптимальних режимах роботи установки для високоінтенсивної термообробки зерна з вібротранспортером.

зерновий матеріал, інфрачервона обробка, опорна пориста поверхня, вібропереміщення, опорна поверхня з рифленнями, вертикальна перфорація, швидкість переміщення зерна, термообробка

Р.А. Калініченко, доц., канд. техн. наук*ВП НУБіП України «Нежинський агротехнічний інститут», г. Нежин, Україна***С.П. Степаненко**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.*Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства», пгт Глеваха, Україна***Б.І. Котов**, проф., д-р техн. наук*Подольський державний аграрно-технічний університет, г. Кам'янець-Подільський, Україна*

Формирование скоростного режима виброперемещения зерна в процессе термообработки

В статье составлена и решена система дифференциальных уравнений движения материальной точки вдоль пористой (воздухопроницаемой) поверхности, которая наклонена под углом к горизонту. На основе анализа решений данной системы дифференциальных уравнений предложено изменять скорость перемещения зерна частотой колебаний опорной поверхности, углом наклона опорной поверхности к горизонту и коэффициентом трения. Также получены графические зависимости скорости перемещения зерна от угла наклона опорной поверхности к горизонту, коэффициента трения и частоты колебаний.

Теоретически обоснована возможность замедления виброперемещения зерна воздушным потоком, что подается снизу пористой опорной поверхности против (под углом) направления перемещения зерна, а также использованием асимметрично рифленной опорной поверхности с вертикальными перфорациями.

© Р.А. Калініченко, С.П. Степаненко, Б.І. Котов, 2020

Экспериментально определена линейная регрессионная зависимость изменения скорости виброперемещения, которая дает возможность формирования необходимого скоростного режима виброперемещения зерна изменением параметров: наклона вибрирующей плоскости $5^\circ \div 9^\circ$, частоты колебаний $45 \div 55 \text{ с}^{-1}$, скорости воздушного потока $0,1 \div 2 \text{ м/с}$ в оптимальных режимах работы установки для высокоинтенсивной термообработки зерна с вибротранспортером.

зерновой материал, инфракрасная обработка, опорная пористая поверхность, виброперемещение, опорная поверхность с рифлением, вертикальная перфорация, скорость перемещения зерна, термообработка

Постановка проблеми. Застосування інфрачервоного (ІЧ) опромінення зернових матеріалів реалізується для сушіння, попереднього нагріву, дезинсекції і підвищення якості посівного матеріалу. Одним із перспективних напрямків використання ІЧ випромінювання як способу підведення енергії є мікронізація – інтенсивний нагрів фуражного зерна або круп високоінтенсивним ІЧ-опроміненням, що дозволяє досягнути суттєвих змін в хімічних, мікробіологічних, фізико-механічних комплексах продукту для підвищення його споживчих властивостей [1,2]. Інфрачервона обробка (ІЧО) зерна, зернопродуктів і насіння застосовується як самостійний вид обробки, так і в якості окремої операції в різноманітних технологічних процесах. Кожний вид ІЧО зернового матеріалу потребує певної тривалості – експозиції обробки. В безперервних установках, які в якості транспортних засобів для переміщення матеріалу (під час опромінювання) використовують стрічкові транспортери, потрібна експозиція реалізовується зміною швидкості стрічки, що легко технічно реалізується. Але при використанні стрічкових транспортерів зерновий матеріал розміщують на поверхні стрічки моношаром (в одне зерно), що вимагає збільшення довжини транспортного засобу. Застосування вібраційних транспортерів значно підвищує ефективність обробки, оскільки, дозволяє перемішувати шар зернового матеріалу, змінювати орієнтацію зернівок неперервно і збільшувати висоту шару [3]. Тому для ІЧО зернового матеріалу в умовах господарств можна використовувати, як транспортний засіб «решітний стан» віброрешітних зерноочисних машин, які працюють на очищенні обмежений проміжок часу. Але при цьому виникає проблема забезпечення необхідного, керованого режиму переміщення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основи теорії вібраційного переміщення сипких матеріалів закладено в роботах І.І. Блехмана [4] і розвинуто (для переміщення зернового матеріалу) в роботах [5, 6]. В подальшому задачі дослідження процесів вібраційного переміщення матеріалів виконані для окремих технологічних процесів, відповідно до завдань проектування відповідних машин: переміщення [7], сушіння [3], нагріву [8], мікрохвильової обробки зернових [9], інфрачервоного опромінення [10]. У перелічених роботах розглядаються випадки розрахунку швидкості переміщення частинки на коливній поверхні при незмінних за координатою і в часі характеристик матеріалу і кінематичних параметрах опорної коливної поверхні. Але в процесі термообробки параметри транспортуючого матеріалу є змінними [3, 11], що вимагає корегування розрахунків кінематичних параметрів. Крім того, при використанні елементної бази існуючих віброрешітних машин виникають задачі гальмування і зміни швидкості переміщення продукту в напрямку руху, які в існуючих публікаціях висвітлені недостатньо.

Постановка завдання. Метою досліджень є удосконалення математичного опису і розрахунку процесу вібраційного переміщення зерна із змінними в часі властивостями і виявлення можливостей керування швидкістю.

Виклад основного матеріалу. Для проведення досліджень використаний метод Даламбера для динамічних систем та теорія зерноочисних вібраційних машин. Також

була застосована теорія багатофакторного експерименту та регресійний аналіз. Побудова графічних залежностей виконана за допомогою комп'ютерних програм.

Розглядається, рух частинки (матеріальної точки) масою m вздовж пористої (повітропроникної) поверхні, що нахилена під кутом α до горизонту, яка здійснює коливання з амплітудою A і частотою ω по закону $S = A \sin \omega t$. Кут нахилу траєкторії коливань опорної поверхні β . На рис.1 показано розподіл сил, що діють на частинку: сила тяжіння G , сила тертя F_m , нормальна реакція N , сила гідравлічного тиску повітряного потоку, яка дорівнює силі опору повітряного потоку R_n , що діє на частинку під кутом γ до опорної поверхні.

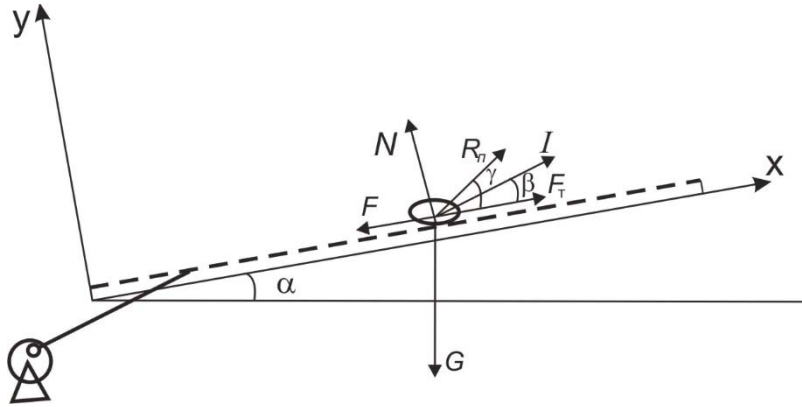


Рисунок 1 – Схема сил, що діють на частинку при переміщенні по поверхні, яка здійснює гармонічні коливання.

Джерело: розроблено авторами

При сумісній дії на частинку коливної площини і повітряного потоку відомі рівняння руху частинки [6, 7, 10] матимуть вигляд:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mA\omega^2 \cdot \cos\beta \cdot \sin\omega t - mg \cdot \sin\alpha - Nf + R_n \cdot \cos\gamma, \\ m\ddot{y} = mA\omega^2 \cdot \sin\omega t \cdot \sin\beta - mg \cdot \cos\alpha + N + R_n \cdot \sin\gamma, \end{cases} \quad (1)$$

де f – коефіцієнт тертя,

$Nf = F_m$ – сила тертя, Н;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

Діюча на частинку сила аеродинамічного опору (тиску), яка в межах режиму обтікання частинки повітрям (за умови $10^2 \leq Re \leq 10^5$) може бути визначена за формулою [13]:

$$R_n = mk_B(V_n - V)^2, \quad (3)$$

де $k_B = \frac{g}{V_{шт}^2}$ – коефіцієнт вітривності;

$V_{шт}^2$ – швидкість витання частинки, м/с.

Оскільки у робочих режимах руху частинки швидкості повітря $V_n \gg V$ (V – швидкість частинки) то:

$$R_n = mk_B V_n^2. \quad (4)$$

При переміщенні частинки по вібруючій площині у безвідривному режимі (умовою якого є: $N > 0$, або $\frac{g \cos\alpha}{A\omega^2 \sin\beta} > 1$ [6]) координата y дорівнює нулю, а сила тертя визначається співвідношенням:

$$F = \begin{cases} -fN, & \dot{x} > 0; \\ fN, & \dot{x} < 0. \end{cases} \quad (5)$$

Нормальна реакція знаходиться із рівняння (2):

$$N = mg \cdot \cos \alpha - mA\omega^2 \sin \omega t \cdot \sin \beta - R_n \cdot \sin \gamma. \quad (6)$$

Підставляючи значення N з (6) в рівняння (1) і замінюючи $f = \operatorname{tg} \rho$ та $P = \frac{R_n}{mg}$ після перетворень отримаємо:

$$\ddot{x} = A\omega^2 \frac{\cos(\beta \mp \rho)}{\cos \rho} \left[\sin \omega t - \frac{g \sin(\alpha \pm \rho) \mp P \cdot \sin(\gamma \pm \rho)}{A\omega^2 \cos(\beta \mp \rho)} \right]. \quad (7)$$

Верхні знаки, відповідно до [6], відповідають до позитивного напрямку відносно швидкості переміщення ($x > 0$), а нижні негативному напрямку ($x < 0$).

Подальші розрахунки і перетворення для визначення швидкості переміщення виконано за методикою [6].

Рівняння (6) представлено в загальному вигляді:

$$\ddot{x} = a_{\pm} (\sin \delta - Z_{\pm}), \quad (8)$$

де $a_{\pm} = A\omega^2 \frac{\cos(\beta \mp \rho)}{\cos \rho}$; $\delta = \omega t$.

$$Z_{\pm} = \frac{g \sin(\alpha \pm \rho) \mp P \cdot \sin(\gamma \pm \rho)}{A\omega^2 \cos(\beta \mp \rho)}. \quad (9)$$

Верхні знаки – рух вгору, нижні – рух донизу.

Упускаючи відомі перетворення наведені в [6], запишемо кінцеві результати.

$$V = \frac{A\omega}{\pi \cdot \cos \rho} \sqrt{\sin^2 \varepsilon - (\varepsilon Z_+)^2} \left[\left(1 - \frac{\varepsilon}{\operatorname{tg} \rho}\right) \cos(\beta - \rho) - \left(1 + \frac{\pi - \varepsilon}{k-1}\right) \cos(\beta + \rho) \right], \quad (10)$$

де $\varepsilon = \pi \frac{k}{k-1}$; $k = \frac{Z_-}{Z_+} = \frac{\sin(\alpha - \rho) \cos(\beta - \rho)}{\cos(\beta + \rho) \sin(\alpha + \beta)}$, або:

$$V = A\omega \cos \beta \cos \varepsilon \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon Z_+}{\sin \varepsilon}\right)^2} \left[\frac{2f}{\pi} \operatorname{tg} \beta \left(\operatorname{tg} \varepsilon - \varepsilon + \frac{\pi}{2} \right) - 1 \right].$$

Розглядаючи можливість зміни швидкості переміщення частинки, звернемо увагу на такі обставини:

- 1) оскільки, величина амплітуди коливань A є величиною сталою, то швидкість переміщення є функцією частоти коливань $V(\omega)$;
- 2) величина ε визначатиме вплив кутів α , ρ на швидкість переміщення так, як величина β є нерегульованою;
- 3) на швидкість переміщення зерна впливає величина швидкості повітря V_n і кут вектора його спрямування γ .

Таким чином змінювати швидкість переміщення зерна окрім частотою коливань, можна зміною кута нахилу опорної поверхні до горизонту та зміною коефіцієнта тертя.

В роботах [12,13] для зменшення швидкості вібраційного переміщення використано опорну поверхню із різним коефіцієнтом тертя при русі в різних напрямках або пружні елементи, що гальмують шар зерна в одному з напрямів руху опорної поверхні. В нашому випадку розглядається рух частинки вздовж опорної поверхні виконаної з металевого полотна з лускатими рифлями, що розміщені на

поверхні в шаховому порядку (рис. 2), які утворюють асиметрично рифлену поверхню з вертикальними перфораціями.

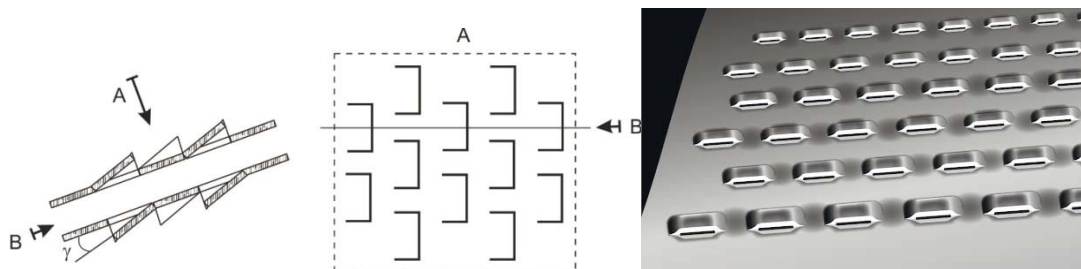


Рисунок 2 – Схема розміщення жалюзійних рифлів на опорній поверхні зовнішній вигляд полотна

Джерело: розроблено авторами

Результати розрахунків за формулами (4-10) представлено у вигляді графічних залежностей швидкості переміщення частинки від швидкості повітря (рис. 3 а) та кута нахилу опорної поверхні (рис. 3 б).

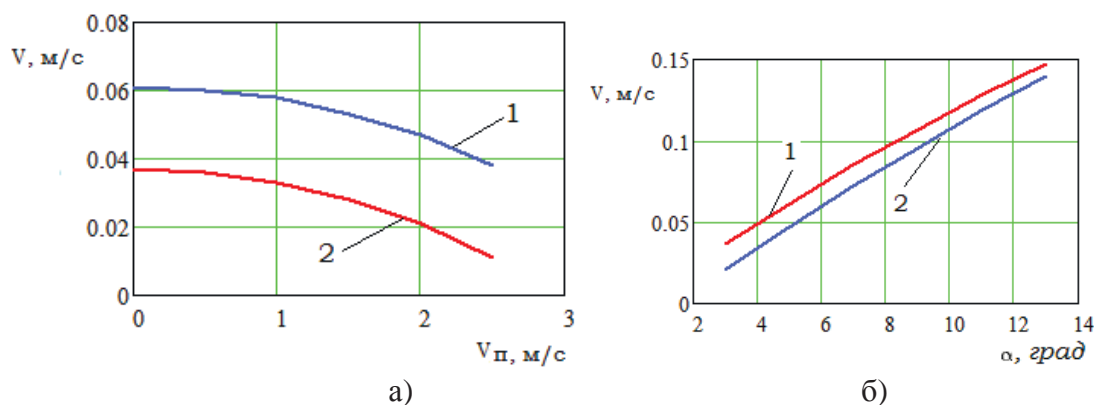


Рисунок 3 – Залежності швидкості переміщення частинки від швидкості повітря:

а) – 1 – кут нахилу $\alpha=5^\circ$; 2 – кут нахилу $\alpha=3^\circ$; та б) – 1 – без повітряного потоку; 2 – $V_{п}=2$ м/с

Джерело: розроблено авторами

Для виявлення впливу швидкості повітряного потоку і кута його нахилу до поверхні зроблено розрахунки швидкості переміщення частинки по поверхням з круглими отворами діаметром 2 мм ($\rho=24^\circ 20' \dots 28^\circ 30'$) і листу з лускатими рифлями ($\rho=30 \dots 36^\circ$ – рух назад, $\rho=36 \dots 43^\circ$ – рух вперед).

При розрахунках швидкості переміщення частинки вздовж асиметрично рифленої поверхні (при безвідривному двосторонньому русі з двома миттєвими зупинками) в розрахункові формули (9) і (10) внесені корективи: оскільки кут тертя має різні значення в напрямках руху «вперед» – S_+ і «назад» – S_- , то величини ковзання Z_+ і Z_- та їх співвідношення визначатиметься за формулою [12, 13]:

$$Z_{\pm} = \frac{g \sin(\alpha \pm \rho_{\pm}) \mp \rho \sin(\gamma \pm \rho_{\pm})}{A \omega^2 \cos(\beta \mp \rho_{\mp})} \quad (11)$$

де ρ_+ – кут тертя при переміщенні «вперед», град;

ρ_- – кут тертя при переміщенні «назад», град;

$$k = \frac{\Sigma_-}{\Sigma_+} = \frac{\sin(\alpha - \rho_-) \cos(\beta - \rho_-)}{\cos(\beta + \rho_+) \sin(\alpha + \beta)}$$

Коефіцієнт асиметрії коефіцієнту тертя:

$$k_f = \frac{\rho_-}{\rho_+} \tag{12}$$

Результати розрахунків у вигляді графічних залежностей швидкості переміщення від швидкості подачі повітря і кутів тертя наведені на рис. 4 і рис. 5.

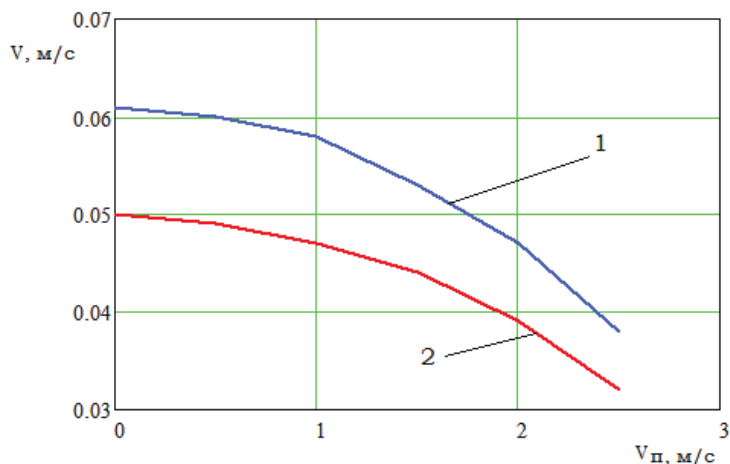


Рисунок 4 – Залежності швидкості переміщення зерна за умов $\gamma=15^\circ$, $\omega=52 \text{ c}^{-1}$, $\alpha=5^\circ$:
 1 – перфорована поверхня $\rho=27^\circ$; 2 –асиметрична перфорована поверхня $\rho_+=36^\circ$, $\rho_-=30^\circ$
 Джерело: розроблено авторами

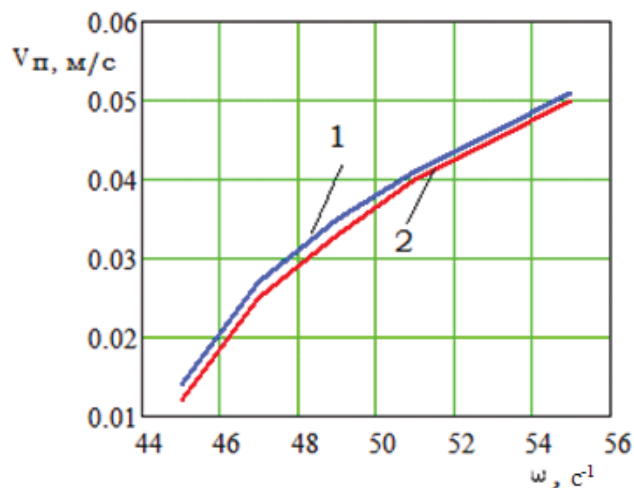


Рисунок 5 – Залежності швидкості переміщення зерна на асиметричній перфорованій поверхні $\rho_+=36^\circ$, $\rho_-=30^\circ$, $\alpha=5^\circ$, $V_n=1.5 \text{ м/с}$: 1– $\gamma=20^\circ$; 2– $\gamma=10^\circ$

Джерело: розроблено авторами

Для уточнення результатів розрахункових досліджень шляхом їх співставлення з даними експериментів проведено багатофакторний експеримент на установці розробленій в ННЦ «ІМЕСГ». Змінними факторами прийнято: частота коливань поверхні ω , кут її нахилу α , швидкості повітря V_n та коефіцієнта асиметрії коефіцієнта тертя – k_f .

За результатами експериментів отримано рівняння лінійної регресії (13), яке описує залежність швидкості переміщення шару зернового матеріалу вздовж опорної коливної поверхні від кута нахилу поверхні, швидкості повітряного потоку (крізь перфорації), коефіцієнту асиметрії тертя, частоти коливань:

$$V = 0.023 + 0.0037\alpha + 0.004V_n + 0.23k_f + 0.0047\omega; \quad (13)$$

де α – кут нахилу вібраційної поверхні, 3÷9 град;

V_n – швидкість повітряного потоку, 0,1÷2 м/с;

k_f – коефіцієнт асиметрії коефіцієнта тертя, 0,7÷0,85;

ω – частота коливань, 45÷55 с⁻¹.

Графічна інтерпретація отриманих результатів подана у вигляді поверхонь швидкості переміщення зернового матеріалу від змінних факторів на рис. 6, рис. 7.

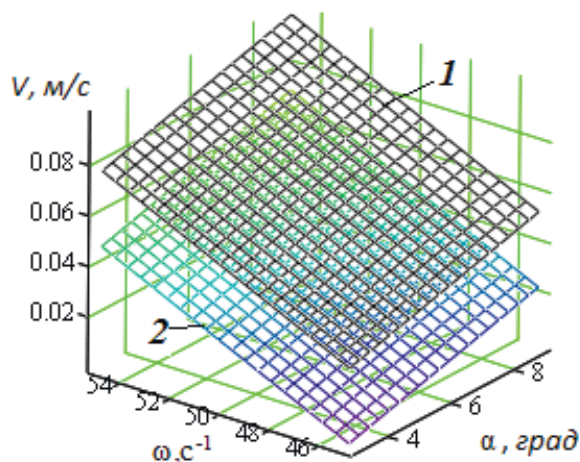


Рисунок 6 – Залежності швидкостей переміщення зерна від кута нахилу опорної поверхні і частоти за умов $V_n = 2 \frac{m}{c}$: 1 – $k_f = 0,7$; 2 – $k_f = 0,85$

Джерело: розроблено авторами

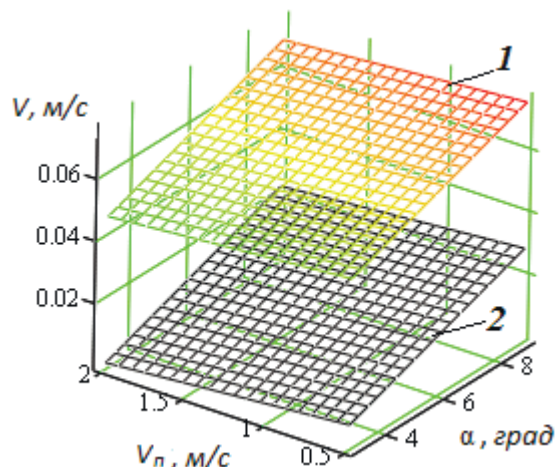


Рисунок 7 – Залежності швидкостей переміщення зерна від кута нахилу опорної поверхні і швидкості повітряного потоку за умов $k_f = 0,85$:
1 – $\omega = 55 \text{ c}^{-1}$; 2 – $\omega = 45 \text{ c}^{-1}$.

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Теоретично обґрунтована можливість уповільнення вібропереміщення зерна повітряним потоком, що подається знизу пористої опорної поверхні проти (під кутом) напрямку переміщення зерна, а також використанням асиметрично рифленої опорної поверхню з вертикальними перфораціями.

Експериментально визначена лінійна регресійна залежність зміни швидкості вібропереміщення, яка дає можливість формування необхідного швидкісного режиму вібропереміщення зерна зміною параметрів: нахилу віброуючої площини $5^\circ \div 9^\circ$, частоти коливань $45 \div 55 \text{ с}^{-1}$, швидкості повітряного потоку $0,1 \div 2 \text{ м/с}$; в оптимальних режимах роботи установки для високоінтенсивної термообробки зерна з вібротранспортером.

Список літератури

1. Елькин Н. В. Высокотемпературные инфракрасные технологии нового тысячелетия. *Хранение и переработка зерна*. 2020, № 9. С. 47-50.
2. Елькин Н. В. Теория и практика инфракрасной обработки зерна и крупы. *Хранение и переработка зерна*. 2006, № 4. С. 26-30.
3. Беляев М. И., Пахомов П. Л. Теоретические основы комбинированных способов тепловой обработки пищевых продуктов, Х., ХИОП. 1991. 260 с.
4. Блехман И.И., Джанелидзе Г.Ю. Вибрационное перемещение. М.: Наука, 1964. 410 с.
5. Заика П. М. Вибрационное перемещение твердых и сыпучих тел в сельскохозяйственных машинах. К. : Изд-во УСХА, 1998. 625 с.
6. Гортинский В. В., Демский А.Б., Борискин М.А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Колос, 1980. 304 с.
7. Потураев В. Н. Вибрационно-пневматическое транспортирование сыпучих материалов. К.: Наукова думка, 1989. 248 с.
8. Калиниченко Р. А., Степаненко С.П Математическое моделирование виброперемещения зерна при термообработке. *Инновации в сельском хозяйстве*. 2017. Вып.4(25). С.51-55.
9. Орлова С. С. Определение параметров вибротранспортирования при микроволновой обработке зерновых . *Наукові праці ОНАХТ*. 2006.-Вип. 29, т. 2. С. 205-207.
10. Калініченко Р. А. Дослідження впливу низхідного повітряного потоку на поєднані процеси ІЧ-термообробки і переміщення зернових матеріалів на вібротранспортері. *Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2017. № 262. С. 56–66.
11. Губанов А.А., Калинин В.И., Ромалийский В.С., Абдрахманов А.С. О результатах экспериментального изучения коэффициента динамического трения семян зерновых культур. *НТБ ВИМ*. 1976. Вып. 30. С. 48-51.
12. Степаненко С. П. Підвищення ефективності вібропневматичних сепараторів зерна: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.05.11; УААН, ННЦ "Інститут механізації та електрифікації сільського господарства". Глеваха, 2008. 20 с.
13. Моделирование технологических процессов в типовых объектах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентильовання, охолодження) / Б. І. Котов та ін. Ніжин: Видавець ПП Лисенко М.М., 2017. 552 с.

References

1. Elkin, N. V. (2020). High-temperature infrared technologies of the new millennium. *Grain storage and processing*, № 9, 47-50 [in Russian].
2. Elkin, N. V. (2006). Theory and practice of infrared processing of grain and cereals. *Grain storage and processin.*, № 4, 26-30 [in Russian].
3. Belyaev, M. I. & Pakhomov, P. L. (1991). Theoretical foundations of combined methods of heat treatment of food products. Kharkiv [in Russian].
4. Blekhan, I. I. & Dzhanelidze, G. Yu. (1964). Vibration displacement. Moscow [in Russian].
5. Zaika, P.M. (1998). Vibrational movement of solid and loose bodies in agricultural machines. Kiev [in Russian].
6. Gortinsky, V. V., Demsky, A. B. & Boriskin M. A. (1980). Separation processes at grain processing plants. Kiev [in Russian].
7. Krausp, R. V. (1975). Automation of post-harvest grain processing. Moscow [in Russian].

8. Kalinichenko, R. A. & Stepanenko, S. P. (2017). Mathematical modeling of vibration displacement of grain during heat treatment. *Innovations in agriculture, Issue 4 (25)*, 51-55 [in Russian].
9. Orlova, S. S. (2006) Determination of the parameters of vibratory transportation during microwave processing of grain. *Science works ONAHT, Vol. 29, 2*, 205-207 [in Russian].
10. Kalinichenko, R. A. (2017). Investigation of downward air flow on combined processes of infrared heat treatment and movement of grain materials to vibratory conveyor. *Scientific Herald NUBiP Ukraine. Series: Engineering and energy of agro-industrial complex, № 262*, 56–66 [in Ukrainian].
11. Gubanov, A. A., Kalinin, V. I. & Romalisky, V. S. (1976) On the results of experimental study of the coefficient of dynamic friction of seeds of grain crops. *NTB VIM, № 30*, 48-51 [in Russian].
12. Stepanenko, S. P. (2008). Advanced efficiency of vibropneumatic grain separators. *Extended abstract of candidate's thesis*. Glevakha. [in Ukrainian].
13. Kotov, B. , Kalinichenko, R., Stepanenko S. et al. (2017). Modeling of technological processes in typical samples of selective sampling and grain harvesting (separation, drying, actively venting, cooling). Nizhin : Publisher PP Lisenko M. [in Ukrainian].

Roman Kalinichenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Nizhyn, Ukraine

Serhii Stepanenko, PhD tech. sci., Senior Researcher

National Scientific Center "Institute of Agricultural Mechanization and Electrification", Glevakha, Ukraine

Boris Kotov, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Podilsky State Agrarian Technical University, Kamyanets-Podilsky , Ukraine

Formation of a High-speed Mode of Vibration Displacement of Grain During Heat Treatment

The article compiled and solved a system of differential equations of motion of a material point along a porous (air-permeable) surface, which is inclined at an angle to the horizon. Based on the analysis of solutions to this system of differential equations, it is proposed to change the speed of grain movement by the frequency of oscillations of the support surface, the angle of inclination of the support surface to the horizon and the coefficient of friction. Also, the graphical dependences of the speed of grain movement on the angle of inclination of the support surface to the horizon, the coefficient of friction and the frequency of oscillations were obtained.

The possibility of decelerating the vibration movement of grain by an air flow, which is fed from the bottom of the porous support surface against (at an angle) the direction of grain movement, as well as using an asymmetrically corrugated support surface with vertical perforations, is theoretically substantiated.

A linear regression dependence of the change in the vibration displacement speed has been experimentally determined, which makes it possible to form the required speed mode of vibration displacement of grain by changing the parameters: the inclination of the vibrating plane is $5^0 \div 9^0$, the vibration frequency is $45 \div 55 \text{ s}^{-1}$, the air flow speed is $0.1 \div 2 \text{ m/s}$ in optimal operating modes. installations for high-intensity heat treatment of grain with a vibratory conveyor.

grain material, infrared processing, porous support surface, vibration displacement, corrugated support surface, vertical perforation, grain speed, heat treatment

Одержано (Received) 29.10.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020

Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020