

DOI: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2020-12-8>
УДК 631.365

Експериментальні дослідження вібропереміщення зерна за високоінтенсивної термообробки

Калініченко Р. А.,

к.т.н., доцент, ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут»;
ORCID iD 0000-0001-9325-1551

Степаненко С. П.,

к.т.н., с.н.с., Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства»; ORCID iD 0000-0002-8331-4632

Котов Б. І.,

д.т.н., проф., Подільський державний аграрно-технічний університет (ПДАТУ);
ORCID iD 0000-0001-6369-3025

Анотація

Мета. Уточнення математичного опису та розрахунку процесів мікронізації та вібраційного переміщення зерна під час перехресного повітряного потоку на основі експериментальних досліджень.

Методи. Експериментальні дослідження проводили на виготовленому зразку машини для високоінтенсивної термообробки зерна з використанням методів планування експериментів та статистичної обробки дослідних даних.

Результати. Наведений математичний опис руху частинок зернової суміші на вібротранспортері з високоінтенсивною термообробкою зерна під час дії на суміш потоку повітря. Отримано траєкторії руху частинок із різним розміром залежно від високоінтенсивної термообробки. З певними припущеннями отримані закономірності зміни швидкості переміщення та експозиції мікронізації матеріальної частинки (зернівки) від координат і вологості.

Висновки. У результаті проведених досліджень:

1) отримано регресійну залежність для визначення експозиції мікронізації та встановлено, що експозиція мікронізації за заданих енергетичних параметрів установки повинна тривати від 60 до 180 секунд;

2) теоретично обґрунтовано зміну швидкості вібропереміщення зерна залежно від його вологості й доведено, що висхідний повітряний потік збільшує швидкість переміщення зерна, а низхідний – зменшує;

3) експериментально визначено емпіричну залежність зміни швидкості вібропереміщення, яка дає можливість формування необхідного швидкісного режиму вібропереміщення зерна зміною параметрів: нахилу вібрувальної поверхні $5\div 8^\circ$, частоти коливань $33\div 52\text{ с}^{-1}$, вологості зерна $10\div 20\%$ і швидкості низхідного повітряного потоку $0,1\div 2\text{ м/с}$ у раціональних режимах установки для мікронізації зерна на вібротранспортері.

Ключові слова: траєкторія, вібропереміщення, вібротранспортер, повітряний потік, мікронізація, вологість, коефіцієнт тертя.

UDC 631.365

Experimental study of grain vibration during high-intensity heat treatment

Kalinichenko R. A.,

PhD, associate professor, Separated Subdivision of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine "Nizhyn Agrotechnical Institute"; ORCID iD 0000-0001-9325-1551

Stepanenko S. P.,

Ph.D., National Scientific Center "Institute of Agriculture Engineering and Electrification";
ORCID iD 0000-0002-8331-4632

Kotov B. I.,

Dr.Tech. Sc., Prof., State Agrarian and Engineering University in Podilya;
ORCID iD 0000-0001-6369-3025

Annotation

Purpose. Clarification of the mathematical description and calculation of the processes of

micronization and vibrational movement of grain in cross-air flow on the basis of experimental studies.

Methods. Experimental studies were performed on a manufactured sample of a machine for high-intensity heat treatment of grain using experimental planning methods and statistical processing of experimental data.

Results. A mathematical description of the motion of grain mixture particles on a vibroconveyor with high-intensity heat treatment of grain during action on the mixture of air flow is given. The trajectories of particles with different sizes depending on high-intensity heat treatment are obtained. With certain assumptions, the regularities of the change in the speed of movement and exposure of the micronization of the material particle (grain) from the coordinates and humidity are obtained.

Conclusions. As a result of research:

1) a regression dependence was obtained to determine the micronization exposure and it was established that the micronization exposure for

the given energy parameters of the installation should last from 60 to 180 seconds;

2) the change of the speed of vibratory movement of grain depending on its humidity is theoretically substantiated and it is proved that the ascending air flow increases the speed of grain movement, and the descending one – decreases;

3) experimentally determined the empirical dependence of changes in the speed of vibration, which allows the formation of the required speed of vibration of grain by changing the parameters: the slope of the vibrating surface $5\div 8^\circ$, oscillation frequency $33\div 52\text{ s}^{-1}$, grain moisture $10\div 20\%$ and downward air flow rate $0.1\div 2\text{ m/s}$ in rational modes of installation for grain micronization on a vibrating conveyor.

Keywords: trajectory, vibration displacement, vibration conveyor, air flow, micronization, humidity, coefficient of friction.

УДК 631.365

Экспериментальные исследования виброперемещения зерна при высокоинтенсивной термообработке

Калиниченко Р. А.,

к.т.н., доцент, ОП Национального университета биоресурсов и природопользования Украины «Нежинский агротехнический институт»; ORCID iD 0000-0001-9325-1551

Степаненко С. П.,

к.т.н., с.н.с., Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства»; ORCID iD 0000-0002-8331-4632

Котов Б. И.,

д-р.т.н., проф., Подольский государственный аграрно-технический университет; ORCID iD 0000-0001-6369-3025

Аннотация

Цель. Уточнение математического описания и расчета процессов микронизации и вибрационного перемещения зерна при перекрестном воздушном потоке на основе экспериментальных исследований.

Методы. Экспериментальные исследования проводили на изготовленном образце машины для высокоинтенсивной термообработки зерна с использованием методов планирования экспериментов и статистической обработки опытных данных.

Результаты. Приведено математическое описание движения частиц зерновой смеси на вибротранспортере с высокоинтенсивной термообработкой зерна при действии на смесь потока воздуха. Получены траектории движения частиц с различным размером в зависимости от высокоинтенсивной термообработки. С определенными допущениями получены закономерности изменения скорости перемещения и экспозиции микронизации материальной частицы (зерновки) от координат и влажности.

Выводы. В результате проведенных исследований:

1) получена регрессионная зависимость для определения экспозиции микронизации и установлено, что экспозиция микронизации при заданных энергетических параметрах установки должна длиться от 60 до 180 секунд

2) теоретически обосновано изменение скорости виброперемещения зерна в зависимости от влажности и доказано, что восходящий воздушный поток увеличивает скорость перемещения зерна, а нисходящий – уменьшает;

3) экспериментально определена эмпирическая зависимость изменения скорости виброперемещения, которая дает возможность формирования необходимого скоростного режима виброперемещения зерна изменением параметров: наклона вибрирующей поверхности $5\div 8^\circ$, частоты колебаний $33\div 52\text{ c}^{-1}$, влажности зерна $10\div 20\%$ и скорости нисходящего воздушного потока $0,1\div 2\text{ м/с}$ в рациональных режимах установки для микронизации зерна на вибротранспортере.

Ключевые слова: траектория, виброперемещение, вибротранспортер, воздушный поток, микронизация, влажность, коэффициент трения.

Постановка проблеми. У сучасній комбікормовій, харчовій та переробній промисловості велике значення приділяється вивченню й впровадженню різних методів теплової обробки зерна як одному зі способів підвищення ефективності його використання [1]. Серед різних способів термічної обробки зернових матеріалів процес інфрачервоної (ІЧ) термообробки належить до числа найбільш ефективних [2]. За ІЧ-термообробки підвищуються поживність і смакові властивості зерна, скорочуються в подальшому витрати організму на перетравність кормів, відбувається дезінсекція зерна та інактивація грибної й бактеріальної мікрофлори поверхні зерна [3]. Відновлення хлібопекарських властивостей дефектного зерна також рекомендується здійснювати в спосіб інтенсивної термообробки зернової маси для інактивації амілолітичних і протеолітичних ферментів [4].

Найбільш поширений спосіб ІЧ-термообробки зерна – мікронізація (високоінтенсивна ІЧ-термічна обробка) на вибротранспортері. Стимувальним фактором застосування методу високоінтенсивної мікронізації є висока енергоємність процесу (150 кВт·ч/т і більше [5]), особливо в разі перевищення експозиції термообробки зерна, яка має відповідати часу переміщення на вибротранспортері. Експозиція мікронізації залежить від початкової вологості зерна та щільності радіаційного потоку. Час перебування зерна на вибротранспортері залежить одночасно від декількох параметрів [6–8]. Тому дослідження раціональних взаємопов'язаних параметрів вібропереміщення зерна під час високоінтенсивної термообробки – актуальне завдання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основи теорії вібраційного переміщення сипких матеріалів закладено в роботах І. І. Блехмана [6] і розвинуто (для переміщення зернового матеріалу) в роботах [7, 8]. У подальшому задачі дослідження процесів вібраційного переміщення матеріалів виконані для окремих технологічних процесів, відповідно до завдань проекту-

вання відповідних машин: переміщення [9], сушіння [10], нагріву [2, 11], мікрохвильової обробки зернових [12], інфрачервоного опромінення [13]. У перелічених роботах розглядаються випадки розрахунку швидкості переміщення частинки на коливній поверхні з незмінними за координатою та в часі характеристиками матеріалу і кінематичними параметрами опорної коливної поверхні. Але в процесі термообробки параметри транспортувального матеріалу є змінними [14, 15], що вимагає корегування розрахунків кінематичних параметрів. Крім того, за використання елементної бази сучасних віброрешітних машин для установок мікронізації виникають задачі гальмування та зміни швидкості переміщення продукту в напрямку руху, які в наявних публікаціях висвітлені недостатньо.

Мета досліджень. Уточнення математичного опису та розрахунку процесів мікронізації та вібраційного переміщення зерна під час перехресного повітряного потоку на основі експериментальних досліджень.

Методи досліджень. Експериментальні дослідження проводили на виготовленому зразку машини для високоінтенсивної термообробки зерна з використанням методів планування експериментів та статистичної обробки дослідних даних.

Результати досліджень. Для визначення експозиції мікронізації зерна пшениці від його початкової вологості та щільності радіаційного потоку був проведений багатфакторний експеримент на лабораторному стенді (рис. 1). Режим термообробки встановлювали методом накладок [16]. Щільність радіаційного потоку задавалася значеннями q : 25, 27, 29, 31, 35 кВт/м². Як генератор ІЧ-випромінювання використовували керамічні електричні ІЧ-нагрівачі типу ECS потужністю 500, 600 Вт і ЕСР потужністю 700, 850, 1000 Вт компанії Інтмакс (м. Одеса). Щільність радіаційного потоку регулювали також висотою розміщення ІЧ-нагрівача над шаром зерна.

Для аналізу були взяті усереднені зразки зерна пшениці сорту «Аналог», відібрані за ГОСТом 12036-85, вихідним вологовмістом U_0 0,17, 0,25, 0,35 кг/кг.



Рис. 1. Загальний вид лабораторного мікронізатора з ECS нагрівачем
Fig. 1. General view of a laboratory micronizer with an ECS heater

Для отримання рівняння регресії використано планування повнофакторного експерименту другого порядку [17, 21, 23]. Обробка експериментальних даних і визначення адекватності проводилися в пакеті Statistica.

За результатами проведеного багатофакторного експерименту було отримано рівняння регресії експозиції мікронізації:

$$T_{\text{мікр}} = 882,9 - 52q + 538,2U_0 - 11,3qU_0 + 0,79q^2 - 10,9U_0^2, \quad (1)$$

де $T_{\text{мікр}}$ – експозиція мікронізації, с;

U_0 – початкове значення вологовмісту, кг/кг;

q – густина радіаційного потоку, кВт/м².

Графічна інтерпретація рівняння (1) представлена на рисунку 2.

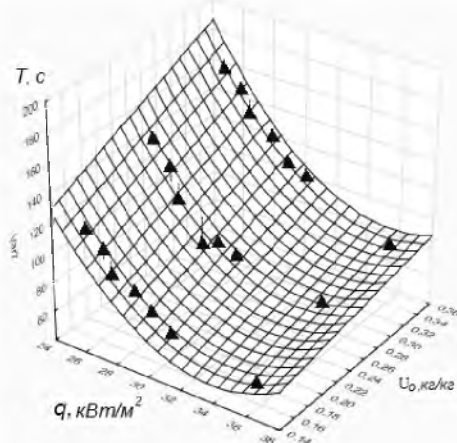


Рис. 2. Поверхня відгуку експозиції мікронізації (за залежністю (1)) та експериментальні точки – ▲, рівень множинної кореляції $R = 0,98$
Fig. 2. The response surface of micronization exposure (depending on (1)) and experimental points – ▲, the level of multiple correlation $R = 0,98$

Як можна побачити з рисунка 2, експозиція мікронізації за заданих енергетичних параметрів установки повинна тривати від 60 до 180 секунд. Для забезпечення якісної мікронізації експозиція, яку можна визначити за залежністю (1), і час переміщення на вібротранспортері (під ІЧ-нагрівачами) повинні бути тотожними.

Час переміщення зернівки на вібротранспортері $T_{\text{вібр}}$ знаходимо з очевидної залежності:

$$T_{\text{вібр}} = \frac{L}{V}, \quad (2)$$

де L – довжина вібротранспортера, м;

V – середня швидкість вібропереміщення зернівки, м/с.

Відповідно до досліджень [14], зі зменшенням вологості зерна зменшується коефіцієнт тертя, а зі зменшенням коефіцієнта тертя збільшується швидкість вібропереміщення зернового матеріалу [7]. Це, зі свого боку, може призводити до збільшення потрібної довжини вібротранспортера установки для мікронізації, зменшення товщини шару зерна, що негативно відображається на якості та енергоефективності процесу мікронізації.

Вплив повітряного потоку на швидкість вібропереміщення зернадосліджувався в роботах [18, 19].

Відповідно до [7] (рис. 3) за сумісної дії на частинку коливної поверхні й повітряного потоку відомі рівняння руху частинки матимуть вигляд:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mA\omega^2 \cdot \cos \beta \cdot \sin \omega t - mg \cdot \sin \alpha - Nf, \\ m\ddot{y} = mA\omega^2 \cdot \sin \omega t \cdot \sin \beta - mg \cdot \cos \alpha + N + P_{\Pi}, \end{cases} \quad (3)$$

де f – коефіцієнт тертя,

N – сила тертя, Н,

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

P_{Π} – сила аеродинамічного тиску повітряного потоку.

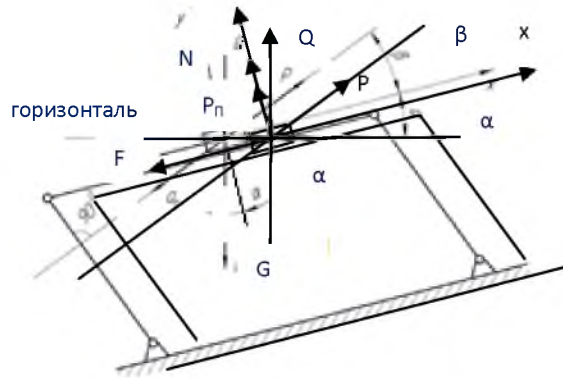


Рис. 3. Схема сил під час вібраційного переміщення зернівки
Fig. 3. The scheme of forces at vibrational movement of a grain

Сила аеродинамічного опору (тиску), що діє на частинку, в межах режиму обтікання частинки повітрям (за умови $10^2 \leq Re \leq 10^5$) може бути визначена за формулою [20–23]:

$$P_{\Pi} = mk_B(V_{\Pi} - V)^2, \quad (5)$$

де $k_B = \frac{g}{V_{\text{віт}}^2}$ – коефіцієнт вітрильності; $V_{\text{віт}}$ – швидкість витання зернівки;

V_{Π} – швидкість повітряного потоку.

Оскільки в робочих режимах руху частинки швидкості повітря $V_{\Pi} \gg V$, то:

$$P_{\Pi} = mk_B V_{\Pi}^2. \quad (6)$$

Під час переміщення частинки по вібрувальній поверхні в безвідривному режимі (умовою якого є: $N > 0$, або $\frac{g \cos \alpha}{A\omega^2 \sin \beta}$) координата y дорівнює нулю, а сила тертя визначається співвідношенням:

$$F = \begin{cases} -fN, & \dot{x} > 0; \\ fN, & \dot{x} < 0. \end{cases} \quad (7)$$

Нормальна реакція N знаходиться з рівняння:

$$N = mg \cdot \cos \alpha - mA\omega^2 \sin \omega t \cdot \sin \beta - P_{\pi}. \quad (8)$$

Підставляючи значення N з (8) в рівняння (3) і замінюючи $f = tg\rho$ та $P = \frac{P_n}{mg}$, після перетворень отримаємо:

$$\ddot{x} = A\omega^2 \frac{\cos(\beta \mp \rho)}{\cos \rho} \left[\sin \omega t - \frac{g}{A\omega^2} \frac{\sin(\alpha \pm \rho) \mp P \cdot \sin(\rho)}{\cos(\beta \mp \rho)} \right]. \quad (9)$$

Верхні знаки, відповідно до [8], відповідають позитивному напрямку відносно швидкості переміщення ($x > 0$), а нижні – негативному напрямку ($x < 0$).

Подальші розрахунки та перетворення для визначення швидкості переміщення виконано за методикою [7].

Рівняння (6) представлено в загальному вигляді:

$$\ddot{x} = a_{\pm}(\sin \delta - Z_{\pm}), \quad (10)$$

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

$$\delta = \omega t;$$

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

Верхні знаки – рух вгору, нижні – рух донизу.

Упускаючи відомі перетворення, наведені в [7], запишемо кінцеві результати:

$$V = \frac{A\omega}{\pi \cdot \cos \rho} \sqrt{\sin^2 \varepsilon - (\varepsilon Z_{+})^2} \left[\left(1 - \frac{\varepsilon}{tg \varepsilon}\right) \cos(\beta - \rho) - \left(1 + \frac{\pi - \varepsilon}{k - 1}\right) \cos(\beta + \rho) \right], \quad (12)$$

$$\text{де } \varepsilon = \pi \frac{k}{k-1};$$

$$k = \frac{Z_{-}}{Z_{+}}.$$

На рисунку 4 представлено графіки зміни швидкості переміщення зерна, отримані за формулою (12), залежно від коефіцієнта тертя.

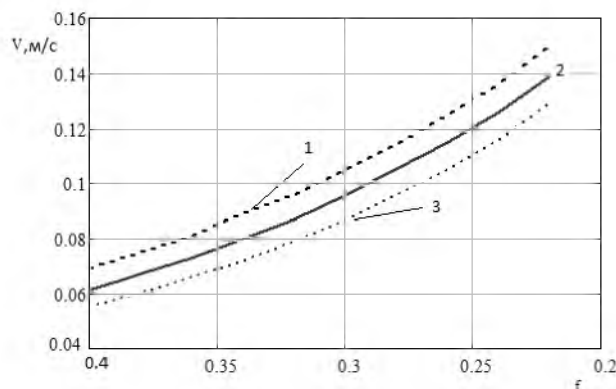


Рис. 4. Залежність зміни швидкості вібропереміщення зерна від коефіцієнта тертя за параметрів:

$$\alpha = \beta = 5^\circ, A = 0,005 \text{ м}, \omega = 52,36;$$

1 – з висхідним повітряним потоком, $V_p = 2 \text{ м/с}$; 2 – без повітряного потоку;

3 – з нисхідним повітряним потоком, $V_p = 2 \text{ м/с}$

Fig. 4. Dependence of change of speed of vibratory movement of grain on coefficient of friction, on parameters:

$$\alpha = \beta = 5^\circ, A = 0.005 \text{ m}, \omega = 52.36;$$

1 – with ascending air flow, $V_p = 2 \text{ m/s}$; 2 – without air flow, 3 – with descending air flow, $V_p = 2 \text{ m/s}$

За результатами теоретичних розрахунків, за наведеними формулами, можна зробити висновок, що висхідний повітряний потік збільшує швидкість переміщення зерна, низхідний – зменшує.

Враховуючи те, що вібропереміщення зерна залежить від декількох параметрів, які, зі свого боку, взаємопов'язано впливають на швидкість переміщення зерна, то для уточнення й перевірки теоретичних обчислень проведені експериментальні дослідження на лабораторній установці ННЦ «ІМЕСГ» (рис. 5).

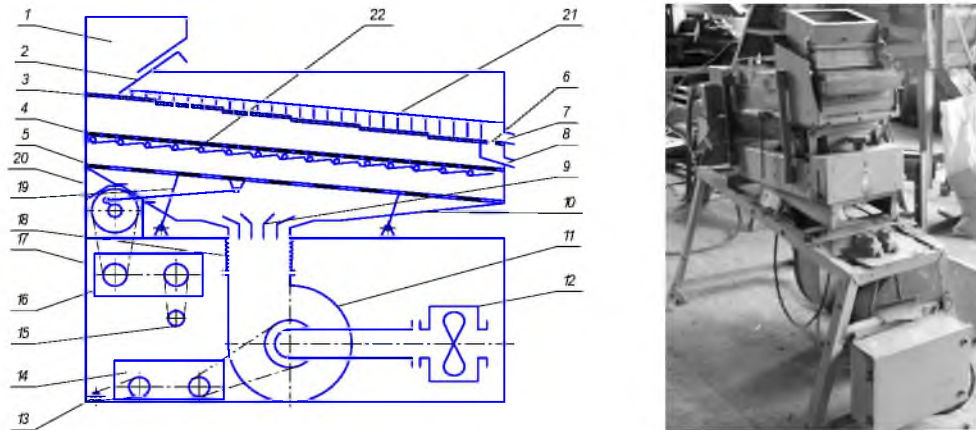


Рис. 5. Конструкційна схема і зовнішній вид лабораторної вібраційно-пневматичної установки
Fig. 5. Structural scheme and appearance of the laboratory vibrating-pneumatic installation

Лабораторна вібраційно-пневматична установка для генерації направлених коливань складається з таких вузлів: засипний бункер 1 із заслінкою 2, якою регулюється завантаження вібраційної поверхні 3. Засипний бункер прикріплений на кронштейнах до спеціальної опорної рами 20. На опорній рамі 20 кріпляться вібраційна поверхня 3, два решета 4 і 5, нагнітальна пневматична камера 10 із жалюзіями 9. Нагнітальна пневматична камера 10, решета 4 і 5 призначаються для вирівнювання швидкості та тиску повітряного потоку, що створюються нагнітальним вентилятором 1. Жалюзі 9 призначені для рівномірного розподілу повітря по довжині решета.

Нагнітальна камера 10 через гнучкий рукав 18 з'єднується з горловиною вентилятора 11. Опорна рама 20 разом із вібраційною поверхнею 3 і нагнітальною пневматичною камерою 10 шарнірно з'єднана з вібратором. Коливання передаються шатуном 19 від ексцентрикового вала, швидкість обертання якого може змінюватися варіатором 16 від приводу асинхронного електродвигуна 15 (4АС на 380 В, потужністю 1,7 кВт, із частотою обертання 950 хв⁻¹).

Частота обертання колеса вентилятора 11 також змінюється за допомогою варіатора 14, від приводу асинхронного електродвигуна 13 (потужністю 1,5 кВт, із частотою обертання 940 хв⁻¹), це давало змогу

змінювати витрату повітря, яка контролюється спеціальним лічильником 12.

Враховуючи, що вібропереміщення з низхідним повітряним потоком є складним механічним процесом, то для встановлення емпіричної залежності швидкості переміщення зерна від таких визначальних факторів: кут нахилу поверхні α – x_1 ; швидкість низхідного повітряного потоку $V_{\text{п}}$ – x_2 ; вологість зерна $U^{\text{р}}$ – x_3 ; частота коливань ω – x_4 вибрали план дослідів На – Ко₃₄ (Хартлі – Коно). Варіювання факторів здійснювали на трьох рівнях.

Експериментальні дані оброблялися в математичному пакеті Statistica, в якому й отримана емпірична залежність швидкості від визначених факторів:

$$V = 0,0005\alpha^{0,87}V_{\text{п}}^{-0,07}U^{-1,08}\omega^{2,24}, \quad (13)$$

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

$V_{\text{п}}$ – швидкість низхідного повітряного потоку, 0.1÷2 м/с;

U – вологість зерна 10÷20%;

ω – частота коливань 33÷52 с⁻¹.

Рівень множинної кореляції залежності (13) та експериментальних даних – $R=0,97$.

На рисунку 6 представлені поверхні відгуку швидкості переміщення зерна, отримані за емпіричною залежністю (13).

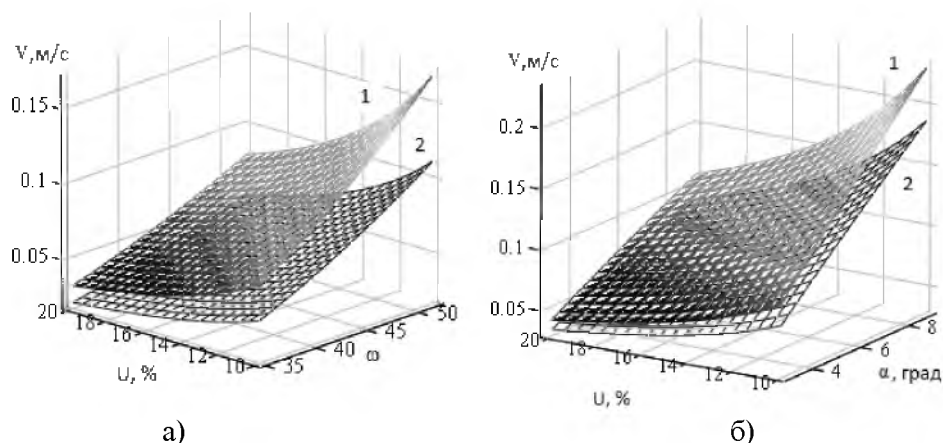


Рис. 6. Поверхні відгуку швидкості вібропереміщення зерна:

а) $\alpha = 5^\circ$; 1 – $V_{\pi} = 0,1$ м/с; 2 – $V_{\pi} = 2$ м/с,

б) $\omega = 52$; $V_{\pi} = 2$ м/с; 1 – $\alpha = 8^\circ$; 2 – $\alpha = 5^\circ$

Fig. 6. Grain vibration velocity response surfaces:

а) $\alpha = 5^\circ$; 1 – $V_{\pi} = 0.1$ м/с; 2 – $V_{\pi} = 2$ м/с,

б) $\omega = 52$; $V_{\pi} = 2$ м/с; 1 – $\alpha = 8^\circ$; 2 – $\alpha = 5^\circ$

Висновки. У результаті проведених досліджень:

1) отримано регресійну залежність для визначення експозиції мікронізації та встановлено, що експозиція мікронізації за заданих енергетичних параметрів установки повинна тривати від 60 до 180 секунд;

2) теоретично обґрунтовано зміну швидкості вібропереміщення зерна залежно від його вологості й доведено, що висхідний повітряний потік збільшує швидкість переміщення зерна, а низхідний – зменшує;

3) експериментально визначено емпіричну залежність зміни швидкості вібропереміщення, яка дає можливість формування необхідного швидкісного режиму вібропереміщення зерна зміною параметрів: нахилу вібрувальної поверхні $5 \div 8^\circ$, частоти коливань $33 \div 52$ с⁻¹, вологості зерна $10 \div 20\%$ і швидкості низхідного повітряного потоку $0,1 \div 2$ м/с у раціональних режимах установки для мікронізації зерна на вібротранспортері.

Бібліографія

1. Елькин Н. В. Теория и практика инфракрасной обработки зерна и крупы. *Хранение и переработка зерна*. 2006. № 4. С. 26–30.
2. Кочанов Д. С. Научное обеспечение процесса микронизации зерновых культур и разработка технологии производства комбикормов из микронизированного зерна: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2014. 24 с.
3. Дрынча В. М. Основные принципы предпосевного химического протравливания и физического обеззараживания семян. *Хранение и переработка зерна*. 2010. № 12. С. 18–22.

4. Губиев Ю. К., Эркинбаева Р. К. Термообработка зерна микроволновым полем. *Известия вузов. Пищевая технология*. 1995. № 1–2. С. 86–90.

5. Котов Б. И., Кифяк В. В., Калиниченко Р. А. Математическая модель динамических режимов электротермической установки для обработки зерноматериалов импульсными потоками инфракрасного излучения. *Вестник ХНТУСУТ имени Петра Василенко*. Харьков, 2014. Вып. 152. С. 181–191.

6. Блехман И. И., Джанелидзе Г. Ю. Вибрационное перемещение. Москва, 1964. 410 с.

7. Гортинский В. В., Демский А. Б., Борискин М. А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. Москва, 1980. 304 с.

8. Заика П. М. Вибрационное перемещение твердых и сыпучих тел в сельскохозяйственных машинах. Киев, 1998. 625 с.

9. Потураев В. Н. Вибрационно-пневматическое транспортирование сыпучих материалов. Киев, 1989. 248 с.

10. Калініченко Р. А. Дослідження впливу низхідного повітряного потоку на поєднанні процесів ІЧ-термообробки і переміщення зернових матеріалів на вібротранспортері. *Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2017. № 262. С. 56–66.

11. Беляев М. И., Пахомов П. Л. Теоретические основы комбинированных способов тепловой обработки пищевых продуктов. Харьков, 1991. 260 с.

12. Орлова С. С. Определение параметров вибротранспортирования при микроволновой обработке зерновых. *Наукові праці ОНАХТ*. Одеса, 2006. Вип. 29. Т. 2. С. 205–207.

13. Мишуров Н. П. Совершенствование инженерно-технического обеспечения молочных ферм на основе комплексной энергетической оценки: науч. изд. Москва, 2011. 120 с.

14. Губанов А. А., Калинин В. И., Ромалийский В. С., Абдрахманов А. С. О результатах

экспериментального изучения коэффициента динамического трения семян зерновых культур. *НТБ ВИМ*. Москва, 1976. Вып. 30. С. 48–51.

15. Калиниченко Р. А., Степаненко С. П. Математическое моделирование виброперемещения зерна при термообработке. *Инновации в сельском хозяйстве*. 2017. Вып. 4 (25). С. 51–55.

16. Павлов С. А. Влияние плотности инфракрасного излучения на обработку фуражного зерна. *Сборник научных трудов ВИМ*. Москва, 1984. Т. 100. С. 139–143.

17. Винарский М. С., Лурье М. В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. Москва, 1975. 168 с.

18. Степаненко С. П. Підвищення ефективності вібропневматичних сепараторів зерна : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Глеваха, 2008. 20 с.

19. Григорьев С. М., Лузанов Э. М. Влияние воздушного потока на движение частиц по колеблющейся поверхности. *Записки Ленинградского СХИ*. 1962. Т. 88. С. 110–114.

20. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентильовання, охолодження) / Б. І. Котов, Р. А. Калініченко, С. П. Степаненко [та ін.]. Ніжин : Видавець ПП Лисенко М. М., 2017. 552 с.

21. Rogovskii I. L., Stepanenko S. P., Novitskii A. V., Rebenko V. I. The mathematical modeling of changes in grain moisture and heat loss on adsorption drying from parameters of grain dryer. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 548 (2020) 082057. 2020. Vol. 13. Pp. 1–7. doi:<https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/8/082057>.

22. Швидя В. О., Анеляк М. М., Степаненко С. П. Обґрунтування використання всмоктуючого повітряного потоку при сушінні зерна. *Механізація та електрифікація сільського господарства* : загальнодержавний зб. Глеваха, 2017. Вип. № 6 (105). С. 81–86.

23. Калініченко Р. А., Степаненко С. П., Швидя В. О., Котов Б. І. Математична модель процесу сушіння з перехресним рухом зерна і сушильного агента при його секційному вводі. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка*. Харків, 2019. Вип. 199. С. 75–83.

Bibliohrafiia

1. Yel'kin, N. V. (2006). Teoriya i praktika infrakrasnoy obrabotki zerna i krupy. *Khraneniye i pererabotka zerna*, 4, 26–30.

2. Kochanov, D. S. (2014). Nauchnoye obespecheniye protsessa mikronizatsii zernovykh kul'tur i razrabotka tekhnologii proizvodstva kombikormov iz mikronizirovanogo zerna : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Voronezh. 24 s.

3. Dryncha, V. M. (2010). Osnovnyye printsipy predposevnogo khimicheskogo protravlivaniya i fizicheskogo obezzarazhivaniya semyan. *Khraneniye i pererabotka zerna*, 12, 18–22.

4. Gubiyev, YU. K., Erkinbayeva, R. K. (1995). Termooobrotka zerna mikrovolnovym polem. *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya*, 1–2. 86–90.

5. Kotov, B. I., Kifyak, V. V., Kalinichenko, R. A. (2014). Matematicheskaya model' dinamicheskikh rezhimov elektrotermicheskoy ustanovki dlya obrabotki zernomaterialov impul'snymi potokami infrakrasnogo izlucheniya. *Vestnik KHNTUSG imeni Petra Vasilenko*, 152, 181–191.

6. Blekhan, I. I., Dzhanlidze, G. YU. (1964). Vibratsionnoye peremeshcheniye. Moskva. 410 s.

7. Gortinskiy, V. V., Demskiy, A. B., Boriskin, M. A. (1980). Protsessy separirovaniya na zernoprerabatyvayushchikh predpriyatiyakh. Moskva. 304 s.

8. Zaika, P. M. (1998). Vibratsionnoye peremeshcheniye tverdykh i sypuchikh tel v sel'skokhozyaystvennykh mashinakh. Kiyev. 625 s.

9. Poturayev, V. N. (1989). Vibratsionno-pnevmaticheskoye transportirovaniye sypuchikh materialov. Kiyev. 248 s.

10. Kalinichenko, R. A. (2017) Doslidzhennya vplyvu nyzkidnoho povitryanoho potoku na poyednani protsesiv ICH-termoobrobky i peremishchennya zernovykh materialiv na vibrotransporteri. *Naukovyy visnyk NUBiP Ukrainy. Seriya: Tekhnika ta enerhetyka APK*, 262, 56–66.

11. Belyayev, M. I., Pakhomov, P. L. (1991). Teoreticheskiye osnovy kombinirovannykh sposobov teplovoy obrabotki pishchevykh produktov. Khar'kov. 260 s.

12. Orlova, S. S. (2006). Opredeleniye parametrov vibrotransportirovaniya pri mikrovolnovoy obrabotke zernovykh. *Naukovi pratsi ONAKHT*, vip. 29. t. 2. 205–207.

13. Mishurov, N. P. (2011). Sovershenstvovaniye inzhenerno-tekhnicheskogo obespecheniya molochnykh ferm na osnove kompleksnoy energeticheskoy otsenki: nauch. izd. Moskva. 120 s.

14. Gubanov, A. A., Kalinin, V. I., Romaliyskiy, V. S., Abdrakhmanov, A. S. (1976). O rezul'tatakh eksperimental'nogo izucheniya koeffitsiyenta dinamicheskogo treniya semyan zernovykh kul'tur. *NTBVIIM*, 30, 48–51.

15. Kalinichenko, R. A., Stepanenko, S. P. (2017). Matematicheskoye modelirovaniye vibroperemeshcheniy azernapritermo obrabotke. *Innovatsii vsel'skom khozyaystve*, 4 (25), 51–55.

16. Pavlov, S. A. (1984). Vliyaniye plotnosti infrakrasnogo izlucheniya na obrabotku furazhnogo zerna. *Sbornik nauchnykh trudov VIIM*, 100, 139–143.

17. Vinarskiy, M. S., Lur'ye, M. V. (1975). Planirovaniye eksperimenta v tekhnologicheskikh issledovaniyakh. Moskva. 168 s.

18. Stepanenko, S. P. (2008). Pidvyshchennya efektyvnosti vibropnevmatichnykh separatoriv zerna : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk. Hlevakha. 20 s.

19. Grigor'yev, S. M., Luzanov, E. M. (1962). Vliyaniye vozdušnogo potoka na dvizheniye chastits po koleblyushcheysya poverkhnosti. *Zapiski Leningradskogo SKHI*, 88, 110–114.

20. (2017). Modelyuvannya tekhnolohichnykh protsesiv v typovykh ob'yektakh pislyazbyral'noyi

obrobky i zberihannya zerna (separatsia, sushinnya, aktyvne ventylivannya, okholodzhennya) / B. I. Kotov, R. A. Kalinichenko, S. P. Stepanenko [ta in.]. Nyzhyn : Vydavets' PP Lysenko M. M. 552 s.

21. Rogovskii, I. L., Stepanenko, S. P., Novitskii, A. V., Rebenko, V. I. (2020). The mathematical modeling of changes in grain moisture and heat loss on adsorption drying from parameters of grain dryer. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 548 (2020) 082057. 13, 1–7. doi:https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/8/082057.

22. Shvydya, V. O., Anelyak, M. M., Stepanenko, S. P. (2017). Obgruntuvannya vykorystannya vsmok-tuyuchoho povitryanoho potoku pry sushinni zerna. *Mekhanizatsiya ta elektrifikatsiya sil's'koho hospo-darstva : zahal'noderzhavnyy zbirnyk*, 6 (105), 81–86.

23. Kalinichenko, R. A., Stepanenko, S. P., Shvydya, V. O., Kotov, B. I. (2019). Matematychna model' protsesu sushinnya z perekhresnym rukhom zerna i sushyl'noho ahenta pry yoho sektsynomu vvodi. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva im. Petra Vasilenka*, 199, 75–83.

References

1. Yel'kin, N. V. (2006). Theory and practice of infrared processing of grain and groats. Storage and processing of grain, 4, 26–30 [in Russian].

2. Kochanov, D. S. (2014). Scientific support of the process of micronization of grain crops and development of technology for the production of mixed feed from micronized grain : author. dis. ... cand. tech. science. Voronezh [in Russian].

3. Dryncha, V. M. (2010). Basic principles of pre-sowing chemical dressing and physical disinfection of seeds. Grain storage and processing, 12, 18–22 [in Russian].

4. Gubiyev, YU. K., & Erkinbayeva, R. K. (1995). Thermal treatment of grain by a microwave field. Proceedings of universities. Food technology, 1–2, 86–90 [in Russian].

5. Kotov, B. I., Kifyak, V. V., & Kalinichenko, R. A. (2014). Mathematical model of dynamic modes of electrothermal installation for processing grain materials by pulsed infrared radiation. Bulletin of the KhNTUSG named after Peter Vasilenko, 152, 181–191 [in Russian].

6. Blekhan, I. I., & Dzhanelidze, G. YU. (1964). Vibration displacement. Moscow [in Russian].

7. Gortinskiy, V. V., Demskiy, A. B., & Boriskin, M. A. (1980). Separation processes at grain processing enterprises. Moscow [in Russian].

8. Zaika, P. M. (1998). Vibration movement of solid and loose bodies in agricultural machines. Kiev [in Russian].

9. Poturayev, V. N. (1989). Vibration-pneumatic transportation of bulk materials. Kiev [in Russian].

10. Kalinichenko, R. A. (2017) Investigation of the influence of the downward air stream in combination IR-baking process and moving grain materials vibrotransportore. Scientific Bulletin of

NULES of Ukraine. Series: Engineering and energy of agro-industrial complex, 262, 56–66 [in Ukrainian].

11. Belyayev, M. I., & Pakhomov, P. L. (1991). Theoretical foundations of combined methods of heat treatment of food products. Kharkov [in Russian].

12. Orlova, S. S. (2006). Determination of vibration transport parameters in microwave processing of grain. Scientific works of ONAHT, vip. 29, vol. 2, 205–207 [in Russian].

13. Mishurov, N. P. (2011). Improvement of engineering and technical support of dairy farms on the basis of a comprehensive energy assessment : scientific. ed. Moscow [in Russian].

14. Gubanov, A. A., Kalinin, V. I., Romaliyskiy, V. S., & Abdrakhmanov, A. S. (1976). On the results of experimental study of the coefficient of dynamic friction of grain crops. NTB VIM, 30, 48–51 [in Russian].

15. Kalinichenko, R. A., & Stepanenko, S. P. (2017). Mathematical modeling of vibration displacement of grain during heat treatment. Agricultural innovations, 4 (25), 51–55 [in Russian].

16. Pavlov, S. A. (1984). Influence of the density of infrared radiation on the processing of fodder grain. Collection of scientific works of VIM, 100, 139–143 [in Russian].

17. Vinarskiy, M. S., & Lur'ye, M. V. (1975). Planning an experiment in technological research. Moscow [in Russian].

18. Stepanenko, S. P. (2008). Improving the efficiency of vibropneumatic grain separators : author's ref. dis. ... cand. tech. science. Glevakha [in Ukrainian].

19. Grigor'yev, S. M., & Luzanov, E. M. (1962). Influence of air flow on the movement of particles on an oscillating surface. Notes of the Leningrad Agricultural Institute, 88, 110–114 [in Russian].

20. Kotov, B., Kalinichenko, R., & Stepanenko, S. (2017). Modeling of technological processes in typical samples of selective sampling and grain harvesting (separation, drying, actively venting, cooling). Nyzhyn : Publisher PP Lysenko M. [in Ukrainian].

21. Rogovskii, I. L., Stepanenko, S. P., Novitskii, A. V., & Rebenko, V. I. (2020). The mathematical modeling of changes in grain moisture and heat loss on adsorption drying from parameters of grain dryer. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 548 (2020) 082057, 13, 1–7. doi: https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/8/082057 [in English].

22. Shvydya, V. O., Anelyak, M. M., & Stepanenko, S. P. (2017). Rationale for use of suction air flow during grain drying. Mechanization and electrification of agriculture : national collection, 6 (105), 81–86 [in Ukrainian].

23. Kalinichenko, R. A., Stepanenko, S. P., Shvydya, V. O., & Kotov, B. I. (2019). Mathematical model of the drying process with cross-movement of grain and drying agent at its sectional input. Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture. Petra Vasilenko, 199, 75–83 [in Ukrainian].