

**Цуркан О.В.**

Д.Т.Н., доцент

**Відокремлений
структурний підрозділ
«Ладизинський фаховий
коледж Вінницького
національного аграрного
університету»**

Tsurkan O.Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor

**Separate structural
subdivision «Ladyzhyn
vocational college of
Vinnytsia National Agrarian
University»**

УДК 631.365: 631.53.01 (043)**DOI: 10.37128/2306-8744-2022-1-2**

ПЕРЕДУМОВИ РОЗРОБКИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РУХУ НАСІННЯ ГАРБУЗА У ВІБРАЦІЙНІЙ СУШАРЦІ

Насіння гарбуза має особливі фізико-механічні та теплофізичні характеристики, які значно ускладнюють процес його післязбиральної обробки. Саме через налипання насіння на робочі органи, утворення конгломератів та інші особливості насіння гарбуза рекомендовано використовувати сушарки з вібраційним активуванням шару матеріалу. Цей процес являє собою складну систему з великою кількістю елементів (а, відповідно і великою кількістю зв'язків між ними), зовнішніми впливами на систему тощо. Для вдалого вирішення поставленої задачі по розробці математичної моделі потрібно провести критичний аналіз вже існуючих моделей, щоб з урахуванням проведених досліджень розробити власну модель, яка описує процес поведінки частинок матеріалу (насіння гарбуза) в межах віброуючої камери.

Аналіз останніх публікацій за цією проблемою показує, що в більшості випадків вирішувались питання для обробки певного матеріалу в конкретних технологічних умовах. В даному дослідженні зроблена спроба узагальнити попередній досвід для розробки власної математичної моделі процесу вібраційного сушіння насіння гарбуза.

Було розглянуто декілька типів моделей руху сипкого середовища під дією вібрації по поверхні робочих органів. Були розглянуті моделі одиночної частки з приєднаною масою, в тому числі, з врахуванням аеродинамічного опору, пружно-в'язко-пластичні моделі шару сипкого середовища, модель, яка розглядає зернистий матеріал як систему, розділену горизонтальними площинами на нескінченне число елементарних шарів з можливістю руху таких шарів один відносно одного та деякі інші.

З усіх розглянутих моделей шару зерна (насіння) найбільш перспективною на нашу думку є модель поведінки сипкого середовища під дією вібрації, яка представляється у вигляді в'язкого середовища з урахуванням початкового напруження зсуву. На основі цієї моделі можна моделювати усі стани сипкого середовища під дією вібрації: спокою, регулярного і нестійкого рухів, які досліджуються експериментально, а також використовувати рівняння динаміки руху суцільного середовища, рівняння нерозривності і рівняння зв'язку напружень з деформаціями для в'язкопластичного середовища, що означає застосування добре розробленого математичного апарата гідрогазодинаміки, що має велике значення для отримання практичних результатів.

Ключові слова: математична модель, насіння гарбуза, вібраційна дія, сипке середовище, приєднана маса.

Постановка проблеми. Для більшості сільськогосподарських культур післязбиральна



обробка є найбільш «вузьким» місцем при їх вирощуванні. Особливо це стосується насінневої продукції. Адже саме від післязбиральної обробки залежить якість насінневого матеріалу, вирощеного на полі. В повній мірі це стосується і насіння гарбуза. Адже його особливості (підвищені когезивно-адгезивні якості, схильність до створення конгломератів, налипання на робочі органи) змушують застосовувати складні процеси та засоби для їх реалізації. В роботі [1] докладно проаналізовані можливі варіанти використання різних типів сушарок для післязбиральної обробки насіння гарбуза. Відзначено, що «традиційні» типи сушарок не забезпечують потрібну якість виконання технологічного процесу. Під «традиційними» мається на увазі найбільш розповсюджені в сільському господарстві сушарки – шахтні, барабанні, лоткові тощо. Саме через налипання насіння на робочі органи, утворення конгломератів та інші особливості насіння гарбуза рекомендовано використовувати сушарки з вібраційним активуванням шару матеріалу.

Ще однією особливістю насіння гарбуза на стадії післязбиральної обробки є його висока початкова вологість (близько 50%). Для зменшення енергозатрат запропоновано на першій стадії (50-33% вологості) застосовувати фільтраційне сушіння [2]. Процес фільтраційного зневоложення різних дисперсних матеріалів вивчався досить досконало, тут можна відмітити роботи львівських вчених на цю тему [3].

Завершальним етапом післязбирального зневоложення є процес конвективного сушіння з інтенсивним розпушуванням шару матеріалу за допомогою вібраційного впливу. Цей етап сушіння є найменш вивчений, особливо в теоретичному плані. Адже матеріал знаходиться в постійному русі в закритій камері, виникають певні труднощі з визначенням поточних параметрів матеріалу, теплоносія, самої віброуючої камери. Звісно, дослідження по вивченню цього складного процесу і визначенню його раціональних параметрів повинно починатись з розробки математичної моделі. Ще раз відзначимо, що цей процес являє собою складну систему з великою кількістю елементів (а, відповідно, і великою кількістю зв'язків між ними), зовнішніми впливами на систему тощо. Для вдалого вирішення поставленої задачі по розробці математичної моделі потрібно провести критичний аналіз вже існуючих моделей, щоб з урахуванням проведених досліджень розробити власну модель, яка описує процес поведінки частинок матеріалу (насіння гарбуза) в межах віброуючої камери. Саме це і є основним завданням даної роботи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. При аналізі попередніх досліджень перш за все ще раз підтверджуємо той факт, що одним з шляхів інтенсифікації процесу зневоложення насіння овочевих культур є

конвективне сушіння в квазірідкому стані [4]. Звичайно, більшість попередніх робіт носять прикладний характер, тобто описують рух різноманітного матеріалу під дією вібраційного впливу. Саме в роботах [5, 6] розглядаються конструктивні схеми деяких вібраційних машин та спроби розрахунку їх елементів. На жаль, розгляд поведінки самого матеріалу в машині під час дії на нього віброзбудження не входила в задачу досліджень.

В роботі [7] автором зроблена одна з його перших спроб поєднати вібраційні технології та сушіння «нетрадиційної» сільськогосподарської продукції. На той час ці культури дійсно мали репутацію нетрадиційних або специфічних, зараз вони відносяться до групи так званих нішевих культур.

Ще один приклад вирішення окремої задачі для конкретного випадку наведений в роботі [8]. В ній приведений математичний опис руху частинок вороху у вібраційно-повітряному сепараторі при дії пульсуючого потоку повітря змінної швидкості.

Звичайно, роботи по створенню математичних моделей поведінки матеріалу на віброуючих поверхнях, а також всередині віброуючих контейнерів велись вже досить тривалий час. Можна відмітити одну з перших робіт в цій галузі Г. Ліндера [9] про поведінку частки на похилій поверхні, а також роботи фундаторів науки про вібрацію в СРСР І.І. Блехмана та Г.Ю. Джанелідзе [10]. Ми приводимо тільки одну роботу цих авторів, хоча вони в свій час досить плідно попрацювали в даній галузі.

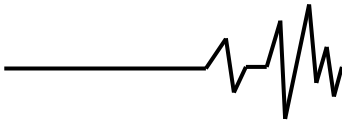
Одна із моделей розглядає сипке середовище як сукупність однорідних абсолютно твердих і абсолютно гладких сферичних часток однакового діаметру, які рухаються і стикаються між собою, причому ці зіткнення не є зовсім пружними [11].

У відносно недавній роботі [12] представлена модель суцільного середовища, яка розглядає сипкий матеріал як єдине ціле і неперервне середовище, що рухається особливим способом під впливом коливань.

Також і автором в недавній роботі [13] наведені умови статичного стану сипкого середовища у робочій камері, що є доповненням граничних умов при розв'язанні задач коливань сипкого дискретного середовища, яке формалізоване як суцільне з суттєвим проявом сухого тертя.

В цих та інших роботах розглядаються окремі випадки для конкретних умов. В даному дослідженні зроблена спроба узагальнити попередній досвід для розробки власної математичної моделі процесу вібраційного сушіння насіння гарбуза.

Мета дослідження. Мета роботи – підвищення ефективності реалізації процесу сушіння насіння гарбуза шляхом вивчення та



аналізу передумов створення математичної моделі руху матеріалу в процесі вібраційного сушіння та реалізації її в конкретних установках при раціональних конструктивно-технологічних параметрах.

Виклад основного матеріалу дослідження. Уперше теоретичне дослідження поведінки матеріальної частки, що рухається по похилій шорсткій площині з кутом α до горизонту і здійснює гармонійні прямолинійні коливання під певним кутом β до опорної поверхні було проведено Лінднером Г. [9] (рис. 1).

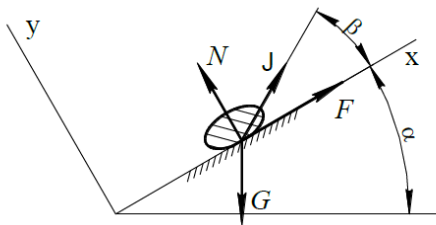


Рис. 1. Матеріальна частка на похилій віброуючій площині

Описана модель є найбільш простою моделлю поведінки зернистого матеріалу на віброуючій поверхні. Рівняння відносного руху частки по похилій шорсткій площині, яка здійснює гармонійні прямолинійні коливання в напрямку, що утворює кут β з віброуючою площиною в проєкціях на рухомі вісі координат, записуються наступним чином :

$$m\ddot{x} = ma\omega^2 \cos \beta \sin \omega t - mg \sin \alpha + F, (1)$$

$$m\ddot{y} = ma\omega^2 \sin \beta \sin \omega t - mg \cos \alpha + N,$$

де m – маса частки, кг;

a, ω – відповідно амплітуда і частота коливань віброуючої площини, м, Гц;

β – кут нахилу траєкторії коливань відносно площини (кут вібрації), град;

α – кут нахилу площини до горизонту, град;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

F – сила опору руху часток, Н;

N – нормальна реакція поверхні, Н.

Блехман І.І. наводить наступну картину розподілу часток в шарі, що відрізняються за розміром і густиною (рис. 2).

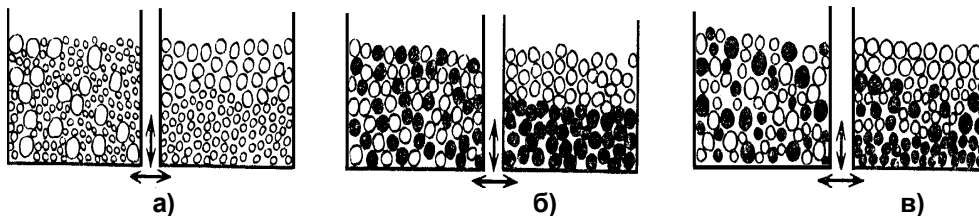


Рис. 2. Розподіл часток в шарі, які відрізняються за розміром і густиною, під дією вібрації а – суміш крупних і дрібних часток однієї густини; б – суміш часток однакового розміру, але з різною щільністю; в – суміш крупних і дрібних часток різної густини

Якщо піддати вібрації суміш крупних і дрібних часток однієї густини, то в результаті крупні частки розташуються над дрібними (рис. 2, а). У випадку часток однакового розміру, але з різною густиною, легкі частки розташуються над важкими (рис. 2, б). У разі крупних і дрібних часток різної густини нижнє положення займуть дрібні важкі, потім розташуються дрібні легкі, крупні важкі, а у верхньому шарі виявляться крупні легкі частки (рис. 2, в).

Цим же автором дано пояснення руху частки в середовищі, що коливається. Приймаючи сили опору відносному руху частки в сипкому середовищі подібними до сухого тертя, пояснено ефект зрідження сипкої суміші під дією коливань, визначені умови такого зрідження і ефективний коефіцієнт в'язкості. Встановлено три взаємодіючі чинники, які обумовлюють занурення (спливання) частки в середовищі: відмінність густини частки від густини середовища, несиметрія сил опору при зануренні (спливанні), несиметрія закону коливань середовища. Найбільша ефективність розділення часток під дією вібрації відбувається в досить вузькому

діапазоні зміни частот коливань.

Раціональним значенням прискорення вібрації є:

$$a = g \cdot f, (2)$$

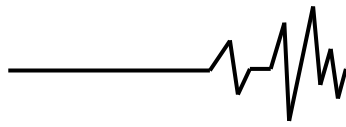
де f – коефіцієнт тертя ковзання середовища по робочій поверхні.

Швидкість розділення при однаковому прискоренні буде тим більше, чим менша частота і, відповідно, чим більша амплітуда коливань.

В роботі [14] Заїка П.М. виділив три основні кінематичні режими дії робочих органів на зернову сировину:

1) Ущільнюючий режим. При цьому найменш інтенсивному режимі, в результаті відносного руху часток відбувається переформування сипкого середовища. Порівняно дрібні частки укладаються в проміжки між великими і середовище ущільнюється;

2) Режим віброзрідження. При цьому більш інтенсивному режимі відбувається «зрідження» зернової суміші під дією вібрацій. У сипкому середовищі відбувається взаємно спрямоване відносне переміщення часток з різною густиною або різними розмірами;



3) Режим віброкипіння. Цей режим характерний тим, що окрім відносного ковзання відбувається відрив часток одна від одної та їх хаотичне переміщення.

Автором отримані аналітичні вирази, що визначають кінематичні умови існування вказаних режимів.

Ще одна модель – це модуль одиничної частки з приєднаною масою. Вона базується на припущенні, що нижня частина шару матеріалу, яка безпосередньо контактує з віброуючою поверхнею, являє собою плоске тверде тіло, а частини шару, що розміщені вище, статично діють на це тіло за рахунок власної маси. Тобто, маса m_1 контактує з віброуючою поверхнею, а маса m_0 зв'язана з m_1 через пружні елементи малої жорсткості (рис. 3).

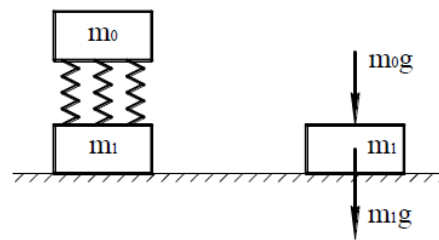


Рис. 3. Модель одиничної частки з приєднаною масою

Представлені моделі передбачають постійний у часі контакт матеріалу з віброуючою поверхнею. На практиці частки матеріалу під дією вібрації можуть відриватися від віброуючої поверхні і знаходитися у стані вільного руху. Тому модель з приєднаною масою не відображає сутності явищ, які відбуваються, навіть при спільному русі оброблюваного матеріалу та віброуючої поверхні, тому що при цьому не відбувається збільшення маси поверхні. Саме на цьому припущенні базується дана модель.

Наступна модель – це матеріальна частка з приєднаною масою і з врахуванням сили аеродинамічного опору. В цьому випадку диференціальне рівняння руху частки виглядає наступним чином:

$$m_1 \ddot{x} = m_0 (\Delta - 1) (g + \alpha \omega^2 \sin \omega t) \mp C(Re) \frac{\pi d^2 \rho_v \dot{x}}{4 \cdot 2}, \quad (3)$$

де $m_1 = m + m'$ – ефективна маса частки (де m' приєднана маса), кг;

m_0 – маса середовища в об'ємі, рівному об'єму частки, кг;

Δ – відношення середньої густини частки і середовища;

$C(Re)$ – коефіцієнт тиску повітря на частку;

Re – число Рейнольдса ;

ρ_v – густина частки, кг/м³.

У рівнянні (3) останній доданок характеризує аеродинамічну силу опору. Для цієї моделі притаманні всі недоліки, які відносяться до моделі одиничної частки з приєднаною масою, але в ній зроблена спроба врахування додаткових факторів впливу на частки матеріалу, що безпосередньо не пов'язані з віброуючою поверхнею. В даному випадку це сила аеродинамічного опору.

Для того, щоб не враховувати характер процесів підкидання і зіткнення оброблюваного матеріалу з віброуючої поверхнею були розроблені пружно-в'язко-пластичні моделі шару сипкого середовища [18]. Подібні моделі базуються на тому, що шар матеріалу представляє собою зосереджену масу m , забезпечену системою демпферів з коефіцієнтами в'язкості c_x та c_y і системою

пружних елементів з коефіцієнтами жорсткості k_x та k_y , (рис. 4).

Указані системи демпферів та пружних елементів моделюють внутрішні сили, які діють у шарі матеріалу під впливом вібрацій. Крім того, на шар сипкого матеріалу діють зовнішні сили, обумовлені наявністю середовища, в якому відбувається рух. Ці сили моделюються за допомогою ще двох демпферів з коефіцієнтами в'язкості c_x' та c_y' які пов'язані з нерухоною системою координат $x'y'$.

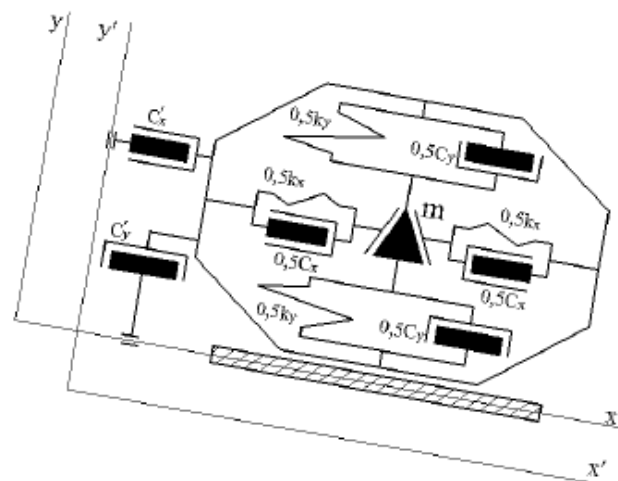
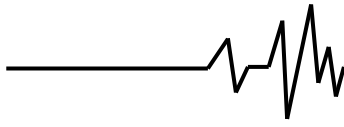


Рис. 4. Пружно-в'язко-пластична модель сипкого середовища



Рівняння відносного руху шару матеріалу (при відсутності проковзування) в проекції на рухомі вісі координат xOy , пов'язані з вібруючою поверхнею, записуються так:

$$\begin{aligned} m\ddot{y} &= -m\ddot{y}' - mg \cos \alpha - c_y \dot{y} - k_y y, \\ m\ddot{x} &= -m\ddot{x}' + mg \sin \alpha - c_x \dot{x} - k_x x - c_x'(\dot{x}' + \dot{x}). \end{aligned} \quad (4)$$

При наявності проковзування рівняння руху вздовж осі x набуде вигляду:

$$m\ddot{x} = -m\ddot{x}' + mg \sin \alpha - \text{sign}(\dot{x}) f (k_y y + c_y \dot{y}) - c_x'(\dot{x}' + \dot{x}), \quad (5)$$

де f – коефіцієнт тертя матеріалу об вібруючу поверхню.

При відриві від вібруючої поверхні диференціальні рівняння вільного руху матеріалу матимуть наступний вигляд:

$$\ddot{y} + 2n_y \dot{y} = -\ddot{y}' - g \cos \alpha. \quad (6)$$

де n_x, n_y – коефіцієнти демпфування, обумовлені зовнішніми опорами переміщення шару відносно осей x та y .

До недоліків подібних моделей можна віднести надто велику кількість рівнянь, які описують поведінку матеріалу, а також можливість використання даних моделей тільки для процесів вібраційного транспортування сипких матеріалів з невеликою товщиною шару. Також подібні моделі не пояснюють таких явищ, як виникнення циркуляційних потоків або хаотичний рух в сипкому середовищі під дією вібрації.

При дослідженні сепарування зернових сумішей на плоских решетах було запропоновано розглядати зернистий матеріал як систему, розділену горизонтальними площинами на нескінченне число елементарних шарів з можливістю руху таких шарів один відносно одного. Коефіцієнт тертя між окремими шарами розглядається як неперервно зростаюча функція сили тяжіння верхніх шарів матеріалу. Але така модель не враховує сили аеродинамічного опору і використовується лише для розрахунку процесів сепарування на плоских решетах, причому лише

для горизонтальних кругових коливань, та не пояснює причин виникнення вертикальних складових у русі часток.

Одна з перших моделей суцільного середовища була представлена в роботі [16]. Її поява обумовлена наступними особливостями руху шару сипкого матеріалу по лотку: залежність швидкості часток від їх координат в поперечному перерізі лотка як в вертикальному, так і в горизонтальному напрямках; зменшення амплітуди вертикальної складової коливань часток шару; неможливість існування режимів руху з інтенсивним підкиданням матеріалу за рахунок утворення повітряного проміжку біля дна лотка.

У цій моделі враховано те, що сипке середовище може мати в процесі навантаження два стани: пружний і пластичний. Перший стан може виникнути в результаті деформації окремих зерен, а другий - в результаті зсуву зерен одне відносно одного.

Отримані із врахуванням вищесказаного рівняння суцільного середовища, які представляють собою сукупність рівнянь теорій пружності і пластичності, вийшли дуже складними. Для їх вирішення була введена додаткова гіпотеза про те, що всі шари під час руху залишаються плоскими. Звідси можна знайти поздовжню швидкість шару, який знаходиться на будь-якій відстані від вільної поверхні лотка [17]:

$$\frac{dV_x}{dt} = \ddot{\zeta} - g \sin \alpha - \left[f_d - S \frac{df_d}{dy} \right] \text{sign} \frac{dV_x}{dy} + f_0' \frac{S}{b \cos \theta} \text{sign} V_x (g \cos \alpha + \ddot{\eta}), \quad (7)$$

де V_x – швидкість шару вздовж осі x , м/с;

$\ddot{\zeta}$ – прискорення при переносному русі, м/с²;

f_d – динамічний коефіцієнт тертя;

S – відстань до вільної поверхні шару матеріалу, м;

f_0' – коефіцієнт тертя об бокову стінку лотка;

b – ширина лотка, м;

θ – кут нахилу стінки лотка, град;

$\ddot{\eta}$ – прискорення при абсолютному русі, м/с².

Але, не зважаючи на правильну постановку задачі, її вирішення дає неповну інформацію про процеси, які відбуваються у шарі матеріалу. Модель не виявляє ділянки циркуляції матеріалу, стохастичного руху його часток.

У роботі [18] поставлена задача пошуку загальних методів опису кривих течії і в'язкості дисперсних матеріалів як в статичних умовах, так і в умовах вібраційного поля.

Рівняння динамічної рівноваги нескінченно малого елемента середовища має вигляд:

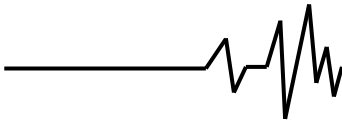
$$\sum_{k=1}^3 \frac{dP_{ik}}{dX_k} + f_i \rho = \rho \frac{d^2 U_i}{dt^2}, \quad (i = 1, 2, 3), \quad (8)$$

де P_{ik} – невідомі компоненти напружень, Н;

U_i – переміщення, м;

f_i – щільність зовнішніх навантажень;

ρ – густина середовища, кг/м³;



X_k, t – координати і час, м, с.

Але використання рівнянь (8) є проблематичним, адже для їх розв'язку необхідно знання реологічних кривих.

Остання модель, яка розглядається, передбачає представлення сипкого середовища при вібраціях у вигляді в'язкої рідини. Така ідея у дослідників з'явилася давно як результат спостережень за поведінкою сипкого середовища, яке піддається впливу вібрації. Поява в ньому різних циркуляційних потоків, спливання і занурення різних тіл, викид газових бульбашок всі ці візуальні ефекти в уяві спостерігача ідентифікують сипке середовище під впливом вібрації з поведінкою в'язкої рідини [17].

– рівняння нерозривності:

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla(\rho u) = 0, \quad (9)$$

– рівняння Нав'є-Стокса:

$$\left(\frac{d}{dt} + u\nabla \right) u = \frac{1}{m} F + \frac{1}{\rho} \left(P - \frac{\mu}{3} \nabla u \right) + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u, \quad (10)$$

– рівняння теплопровідності:

$$\frac{3}{2} \left(\frac{d}{dt} + u\nabla \right) \theta + (\nabla u) \theta - K \frac{1}{\rho} \xi = 0, \quad (11)$$

де ∇ – оператор «набла»;

u – математичне очікування вектора швидкості середовища;

P – тензор тиску;

μ – динамічна в'язкість;

θ – квазітемпература;

K – коефіцієнт теплопровідності;

ξ – коефіцієнт, що враховує відведення квазітепла.

Дана модель добре описує інтенсивні режими підкидання (віброкиплячий шар), тобто вона може пояснити лише хаотичний рух матеріалу, не розкриваючи механізму виникнення впорядкованих циркуляцій часток при одних режимах вібрації чи ущільнення зернистого матеріалу практично без руху при інших режимах. На жаль, ця модель не відображає змінний характер густини та в'язкості середовища в просторі та часі.

Таким чином, із усіх розглянутих моделей шару зерна (насіння) найбільш перспективною на нашу думку є модель поведінки сипкого середовища під дією вібрації, яка представляється у вигляді в'язкого середовища з урахуванням початкового напруження зсуву. На основі цієї моделі можна моделювати усі стани сипкого середовища під дією вібрації: спокою, регулярного і нестійкого рухів, які досліджуються експериментально, а також використовувати рівняння динаміки руху суцільного середовища, рівняння нерозривності і рівняння зв'язку напружень з деформаціями для

Також відомо, що є теоретичні докази того, що сипке середовище, яке знаходиться під дією вібраційного поля, може бути описано рівняннями гідродинаміки. Так, в роботі [11] сипке середовище розглядається як сукупність однорідних абсолютно твердих і абсолютно гладких сферичних часток однакового діаметра, причому зіткнення являються не зовсім пружними. Такий підхід характерний для теорії газів, які вивчаються на молекулярному рівні. Тому в даній роботі використовується кінематичне рівняння Больцмана, з якого витікають, як рівняння першого наближення, наступних три рівняння:

в'язкопластичного середовища, що означає застосування добре розробленого математичного апарата гідрогазодинаміки, що має велике значення для отримання практичних результатів.

Висновки. Оброблення насінневого матеріалу гарбуза може ефективно проводитися у вібраційних установках, оскільки вони забезпечують інтенсивні та енергоощадні режими оброблення матеріалу з одночасною щадною дією на оброблюваний матеріал.

Аналіз існуючих моделей поведінки сипких матеріалів під дією вібрації показав, що жодна з них не відображає змінний характер густини і в'язкості середовища в просторі та часі.

Модель поведінки сипкого середовища під дією вібрації, яка представляється у вигляді в'язкого середовища з урахуванням початкового напруження зсуву, є найбільш прийнятною як основа для моделювання усіх станів сипкого середовища під дією вібрації, які досліджуються експериментально.

Список використаних джерел

1. Цуркан О.В. Аналіз вібраційних технічних засобів для сушіння насіння гарбуза. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 4 (103). С. 5-14.
2. Цуркан О.В., Герасимов О.О., Римар Т.І. та ін. Гідродинаміка процесу фільтраційного зневоднення свіжеочищеного насіння гарбуза з вібраційною активацією. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2014. № 2 (74). С. 138-144.



3. Атаманюк В.М., Гумницький Я.М. Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів: монографія. Львів, 2013. 276 с.

4. Ярошенко Л.В. Обґрунтування конструктивних та технологічних параметрів вібраційної сушарки насіння зернових та овочевих культур для дослідно-селекційних станцій. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. № 1 (96). С. 71-80.

5. Чубик В.В., Ярошенко Л.В. Керовані вібраційні технологічні машини: монографія. Вінниця, 2011. 355 с.

6. Анісімов В.Ф., Ярошенко Л.В., Чубик Р.В. Методика розрахунку основних параметрів дебалансного приводу резонансних вібраційних машин. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2010. № 6 (93). С. 80-86.

7. Цуркан О.В., Герасимов О.О. Основні тенденції розвитку та застосування вібраційного обладнання для сушіння специфічної сільськогосподарської продукції. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2007. №4 (49). С. 86-91.

8. Степаненко С.П., Котов Б.І. Математичне моделювання процесів поділу компонентів зернового матеріалу в комбінованому вібраційно-повітряному сепараторі. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. № 2 (97). С. 51-60.

9. Lindner G., Förderrinnen. Die Fördertechnik. 1912. Heft 2. 54 p.

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

11. Раскин Х.И. Применение методов физической кинетики к задачам вибрационного воздействия на сыпучие среды. *ДАН СССР*. 1975. Т. 220. № 1. С. 54-57.

12. Федоренко И.Я., Пирожков Д.Н. Вибрируемый зернистый слой в сельскохозяйственной технологии: монографія. Барнаул, 2006. 166 с.

13. Калетнік Г.М., Цуркан О.В. Статичні умови сипкого середовища при розв'язанні задач його вібропереміщення. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2019. № 4 (95). С. 5-15.

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

15. Спиваковский А.О., Гончаревич И.Ф. Вибрационные конвейеры, питатели и вспомогательные устройства. Москва, 1972. 328 с.

16. Слиеде П.Б. Исследование движения сыпучего материала при продольном вибротранспортировании. *Вопросы динамики и прочности*. 1972. Вып. 22. С. 84-90.

17. Блехман И.И. Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника. Санкт-Петербург, 2013. 640 с.

18. Овчинников П.Ф. Виброреология. Киев, 1983. 271 с.

References

1. Tsurkan O.V. (2021). Analiz vibratsiinykh tekhnichnykh zasobiv dlia sushinnia nasinnia harbuza. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. № 4 (103). S. 5-14. [in Ukrainian].

2. Tsurkan O.V., Herasymov O.O., Rymar T.I. ta in. (2014). Hidrodynamika protsesu filtratsiinoho znevodnennia svizheochyshchenoho nasinnia harbuza z vibratsiinouiu aktyvatsiiei. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. № 2 (74). S. 138-144. [in Ukrainian].

3. Atamaniuk V.M., Humnytskyi Ya.M. (2013). Naukovi osnovy filtratsiinoho sushinnia dyspersnykh materialiv: monohrafiia. Lviv. 276 s. [in Ukrainian].

4. Yaroshenko L.V. (2020). Obgruntuvannia konstruktyvnykh ta tekhnolohichnykh parametriv vibratsiinoui susharky nasinnia zernovykh ta ovochevykh kultur dlia doslidno-selektsiinykh stantsii. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. № 1 (96). S. 71-80. [in Ukrainian].

5. Chubyk V.V., Yaroshenko L.V. (2011). Kerovani vibratsiini tekhnolohichni mashyny: monohrafiia. Vinnytsia. 355 s. [in Ukrainian].

6. Anisimov V.F., Yaroshenko L.V., Chubyk R.V. (2010). Metodyka rozrakhunku osnovnykh parametriv debalansnoho pryvodu rezonansnykh vibratsiinykh mashyn. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. № 6 (93). S. 80-86. [in Ukrainian].

7. Tsurkan O.V., Herasymov O.O. (2007). Osnovni tendentsii rozvytku ta zastosuvannia vibratsiinoho obladnannia dlia sushinnia spetsyficnoi silskohospodarskoi produktsii. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. №4 (49). S. 86-91. [in Ukrainian].

8. Stepanenko S.P., Kотов B.I. (2020). Matematychnе modeliuвання protsesiv podіlu komponentiv zernovoho materialu v kombinovanomu vibratsiino-povitriianomu separatori. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. № 2 (97). S. 51-60. [in Ukrainian].

9. Lindner G., Förderrinnen. (1912). Die Fördertechnik. Heft 2. 54 p. [in German].

10. Blekhan I.I., Dzhanelidze G.Yu. (1964). Vibrationnoe peremeshchenie. Moskva. 410 s. [in Russian].

11. Raskin Kh.I. (1975). Primenenie metodov fizicheskoi kinetiki k zadacham vibracionnogo vozdeystviya na sypuchie sredy. *DAN SSSR*. Т. 220. № 1. S. 54-57. [in Russian].

12. Fedorenko I.Ya., Pirozhkov D.N. (2006). Vibriruemyj zernistyj sloj v sel'skokhozyajstvennoj tekhnologii: monografiya. Barnaul. 166 s. [in Russian].

13. Kaletnik H.M., Tsurkan O.V. (2019).



Statychni umovy sypkoho seredovyshcha pry rozv'iazanni zadach yoho vibroperemishchennia. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. № 4 (95). S. 5-15. [in Ukrainian].

14. Zaika P.M. (1998). *Vibracionnoe peremeshchenie tverdykh i sypuchikh tel v sel'skokhozyajstvennykh mashinakh*. Kiev. 625 s. [in Russian].

15. Spivakovskij A.O., Goncharevich I.F. (1972). *Vibracionnye konvejery, pitateli i vspomogatel'nye ustrojstva*. Moskva. 328 s. [in Russian].

16. Sliede P.B. (1972). *Issledovanie dvizheniya sypuchego materiala pri prodol'nom vibrotransportirovanii. Voprosy dinamiki i prochnosti*. Vyp. 22. S. 84-90. [in Russian].

17. Blekhan I.I. (2013). *Teoriya vibracionnykh processov i ustrojstv. Vibracionnaya mekhanika i vibracionnaya tekhnika*. Sankt-Peterburg. 640 s. [in Russian].

18. Ovchinnikov P.F. (1983). *Vibroreologiya*. Kiev. 271 s. [in Russian].

BACKGROUND OF A MATHEMATICAL MODEL DEVELOPMENT OF PUMPKIN SEEDS MOTION IN A VIBRATION DRYER

Pumpkin seeds have special physical, mechanical and thermophysical characteristics, which significantly complicate the process of their post-harvest processing. It is because of the adhesion of seeds to the working bodies, the formation of conglomerates and other features of pumpkin seeds, it is recommended to use dryers with vibration activation of the material layer. This process is a complex system with a large number of elements (and, accordingly, a large number of connections between them), external influences on the system, etc. For a successful solution to the task of developing a mathematical model, it is necessary to conduct a critical analysis of existing models in

order, taking into account the research carried out, to develop their own model describing the process of behavior of material particles (pumpkin seeds) within the vibrating chamber.

An analysis of the latest publications on this issue shows that in most cases the issues of processing a certain material in specific technological conditions were solved. In this study, an attempt is made to generalize the previous experience for the development of our own mathematical model of the process of vibration drying of pumpkin seeds.

Several types of models of the movement of a granular medium under the action of vibration over the surface of the working bodies were considered. Models of a single particle with added mass were considered, including, taking into account aerodynamic drag, elastic-visco-plastic models of a layer of a granular medium, a model that considers a granular material as a system divided by horizontal planes into an infinite number of elementary layers with the possibility of movement of such layers relative to each other and some others.

Of all the considered models of the grain (seed) layer, the most promising in our opinion is the model of the behavior of a granular medium under the influence of vibration, which is represented as a viscous medium, taking into account the initial shear stress. On the basis of this model, it is possible to simulate all states of a granular medium under the influence of vibration: calmness, regular and unstable motions, studied experimentally, as well as to use the equation of dynamics of motion of a continuous medium, the equation of continuity and the equation of the relationship between stresses and deformations for a viscoplastic medium, which means the use of a well-developed mathematical apparatus of fluid dynamics, which is of great importance for obtaining practical results.

Keywords: *mathematical model, pumpkin seeds, vibration action, bulk medium, added mass.*

Відомості про автора

Цуркан Олег Васильович – доктор технічних наук, доцент кафедри технологічних процесів та обладнання переробних і харчових виробництв інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету, директор Відокремленого структурного підрозділу «Ладизинський фаховий коледж Вінницького національного аграрного університету» (вул. П. Кравчика, 5, м. Ладизин, Вінницька обл., 24321, Україна, e-mail: tsurkan_ov76@ukr.net).

Tsurkan Oleh – D.Eng.Sc., associate professor of the Department of technological processes and equipment of processing and food industries of Faculty of Engineering and Technology of Vinnytsia National Agrarian University, director of Separated structural unit «Ladyzhyn Professional College of Vinnytsia National Agrarian University» (5, P. Kravchyka St., Ladyzhyn, Vinnytsia region, 24321, Ukraine, e-mail: tsurkan_ov76@ukr.net).