

УДК 631.362.3

С.П. Степаненко, канд. техн. наук

Національний науковий центр "Інститут механізації та електрифікації сільського господарства", смт.Глеваха

Аналітичні дослідження впливу двонаправленої вібрації робочих органів сепаратора на інтенсифікацію процесу розділення зерна

Наведено аналітичні дослідження щодо, уточнення математичної моделі вібропневматичного розділення сипких сумішей з двонаправленою вібрацією робочих органів. Досліджено диференційні рівняння коливального руху робочої поверхні вібропневматичного сепаратора за умови додаткового впливу на зерновий матеріал коливального руху деки для штучного гальмування шару.

розділення зерна, віброзрідений шар, дека, розпушувач-інтенсифікатор, коливальний рух

Проблема. Розділення зернових і насінневих сумішей за густиною є найефективнішим способом підвищення якості насіння і продуктів переробки продовольчого зерна, оскільки густина зерна знаходиться у тісному кореляційному зв'язку з його якісними показниками [1]. Останні дослідження обмежувались розглядом дії сил тертя та нормальної реакції опори на матеріальну точку [1, 2, 3, 9].

Під час протікання процесу сепарації на решітному стані відбувається складний технологічний процес, який ускладнюється поперечним рухом шарів сепаруючої суміші, ймовірними процесами руху зерна в отвори решітного стану, передачею імпульсної енергії від робочої поверхні до зернини та зернового шару в цілому. В кінцевому результаті ці фактори впливають на роботу машини та на пропускну здатність решітного стану сепаратора. Необхідно приділити увагу також процесам інтенсифікації на решітних поверхнях, які теж впливають, як на продуктивність сепаратора, так і на якість його роботи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Аналітичним дослідженням руху решета у складі машинних агрегатів, в тому числі зернозбиральних, та машинам для післязбиральної обробки зернових було приділено достатньо уваги як закордонними, так і вітчизняними науковцями [5, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. Однак, дослідження одночасного впливу коливального руху решета та рухомих дек на шар зернової суміші майже не велися.

Мета дослідження. Проведення аналітичних досліджень впливу параметрів коливального руху решітного стану та рухомої деки на зерновий матеріал для штучного гальмування шару у вібропневматичному сепараторі на якісні показники його роботи.

Результати дослідження. Математичне моделювання коливального руху зернівки на поверхні решітного стану з додатковим впливом на зерновий матеріал коливального руху деки вібропневматичного сепаратора, розробленого в ННЦ «ІМЕСГ» [3, 4, 6], розглянемо на побудованій схемі, рис.1.

При аналізі роботи решітного стану сепаратора було визначено, що найбільш важливими будуть коливання робочої поверхні та імпульсно-періодична передача енергії по висоті віброзріженого шару від віброзбудувача, а також часткова передача коливань від коливань деки з розпушувачами-інтенсифікаторами [4] з нижніх ущільнених шарів до верхніх більш розпушених шарів зернового середовища, що в достатній мірі підвищує пористість динамічного середовища, як показали попередні

дослідження [4, 5, 15].

В статті наведений розв'язок задачі в випадку дії на зернову суміш коливального руху решета (сила інерції (1)) та коливального руху рухомої деки (сила інерції (2)), напрямки коливань яких різні ($\beta \neq \beta_1$):

$$I = (m_0 - m) \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (1)$$

$$I = (m_0 - m) \cdot A \cdot \omega_1^2 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t), \quad (2)$$

де m – маса частки зерна, кг;

m_0 – маса сипкого середовища в об'ємі, що дорівнює об'єму частки, кг;

A – амплітуда коливань решітного стану, м;

ω – частота коливань решета, c^{-1} ;

ω_1 – частота коливань рухомої деки, c^{-1} ;

t – час сепарації, с;

β – кут вібрації від сили інерції від 1-го вібробудувача, рад. (рис.1);

β_1 – кут вібрації від сили інерції від 2-го вібробудувача, рад. (рис.1).

Представимо вібропневматичний сепаратор у вигляді плоскої моделі на двох однакових рухомих опорах, сам сепаратор віднесено до нерухомої відносно поверхні поля системи координат (рис.1).

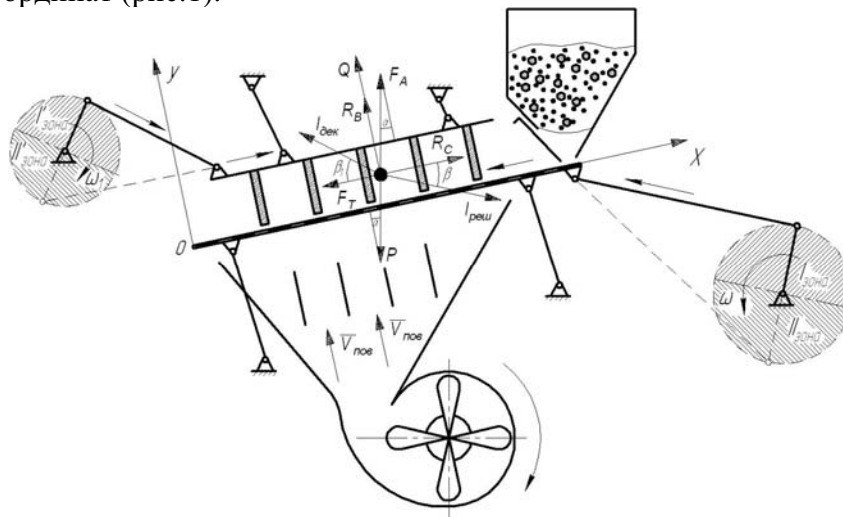


Рисунок 1 - Схема силової взаємодії на зернівку в динамічній моделі вібропневматичного сепаратора

Для спрощення побудови математичної моделі руху зернівки на коливальній поверхні решітного стану та аналітичного виведення диференціальних рівнянь, а також системного аналізу коливальних рухів решітної поверхні вібропневмосепаратора та деки для вібробудження зернового матеріалу, зробимо ряд припущень [5]:

а) зернівка, до якої прикладені сили, які діють в системі «зернова суміш-решето», відмінна за питомою вагою від усіх часток зернової суміші;

б) коливальний рух, який передається від вібробудувача решітному стану сепаратора, здійснює поздовжні коливання за законом:

$$X_{np} = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi), \quad (3)$$

де φ – фазовий кут відхилення ексцентрикового валу, рад;

в) повітряний потік, який нагнітається під робочою поверхнею решітного стану, направлений перпендикулярно поверхні решета та сталий по площі поверхні, яка просівається і діє на частку з силою [15]:

$$R_b = f(Re) \cdot \frac{F_m \cdot \rho_n \cdot (V_b)^2}{2}, \quad (4)$$

де F_m – міделевий переріз частки зерна, м²;

$f(Re)$ – коефіцієнт опору, що залежить від числа Рейнольда;

ρ_n – густина повітряного потоку, кг/м³;

V_b – швидкість повітряного потоку в шарі зерна, м/с.

г) розглядаючи зернову суміш, як вібров'язке середовище, припустимо, що на частку зерна діє сила опору вібров'язкого середовища, яка за своїм характером відповідає закону Стокса:

$$R_c = 3 \cdot \pi \cdot \nu \cdot \rho_n \cdot (1 - \varepsilon) \cdot d \cdot V_{x,y}, \quad (5)$$

де ν – коефіцієнт опору вібров'язкого середовища;

$V_{x,y}$ – відносна швидкість зернівки, м/с.

д) для збільшення пористості зернової суміші, а відповідно і вертикального переміщення повноцінних зерен в шарі, було прийнято рішення [6] штучно інтенсифікувати зерновий шар за рахунок введення в нього рухомої деки з пасивними розпушувачами, які діють на частку з силою Q [15]:

$$Q = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_c^2 \cdot \rho_n \cdot g \cdot (H_{ш} - y - r_c) \cdot [1 + 2 \cdot \operatorname{tg}^2(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2})], \quad (6)$$

де r_c – еквівалентний радіус частки, м;

g – гравітаційна стала, м/с²;

$H_{ш}$ – висота зернового шару, м;

y – початкова висота зернівки, яка є функцією часу, м;

φ – внутрішній кут тертя.

Відповідно до схеми силової взаємодії зернівки, середовища і опорної поверхні (рис.1) рівняння руху частки буде мати вигляд:

$$m \cdot \bar{a} = \bar{P} + \bar{F}_A + \bar{F}_T + \bar{R}_b + \bar{R}_c + \bar{I}_{PEШ} + \bar{I}_{ДЕК} + \bar{Q}, \quad (7)$$

де a – абсолютне прискорення частки, м/с²;

\bar{F}_T – сила опору руху частки;

\bar{F}_A – виштовхуюча сила Архімеда.

З метою подальшого одержання замкнених розв'язків, силу взаємодії частки із вібропневмозрідженим середовищем приймаємо пропорційною швидкості її переміщення в шарі. У межах цих припущень координати траєкторії частки задовольняють системі незв'язаних лінійних диференціальних рівнянь, яку запишемо у вигляді:

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{x} = m \cdot (\Delta - 1) \cdot g \cdot \sin \alpha + m \cdot (\Delta - 1) \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos \beta - \\ - m \cdot (\Delta - 1) \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos \beta_1 + 3 \cdot \pi \cdot \nu \cdot \rho_n \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \dot{x} - f \cdot m \cdot g; \\ m \cdot \ddot{y} = m \cdot (\Delta - 1) \cdot g \cdot \cos \alpha - m \cdot (\Delta - 1) \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin \beta + \\ + m \cdot (\Delta - 1) \cdot A \cdot \omega_1^2 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) \cdot \sin \beta_1 + 3 \cdot \pi \cdot \nu \cdot \rho_n \cdot (1 - \varepsilon) \cdot d \cdot \dot{y} + \\ + f(Re) \cdot \frac{F_m \cdot \rho_n \cdot (V_b)^2}{2} - Q_1 \cdot y + Q_2; \end{cases} \quad (8)$$

Всі члени правої частини рівняння (8) є функцією пористості вібропневмозрідженого шару, величина якої залежить від кінематичних, технологічних і конструкційних параметрів робочих органів.

Зробивши наступні заміни в диференційному рівнянні спроектованому на вісь y :

$$a = (\Delta - 1) \cdot g \cdot \cos \alpha + \frac{Q_2}{m} + f(\text{Re}) \cdot \frac{F_m \cdot \rho_n \cdot (V_b)^2}{2},$$

$$b_1 = A \cdot \omega^2 \cdot (\Delta - 1) \cdot \sin \beta; \quad b_2 = A \cdot \omega_1^2 \cdot (\Delta - 1) \cdot \sin \beta_1,$$

$$c = \frac{3 \cdot \pi}{m} \cdot v \cdot \rho_n \cdot (1 - \varepsilon) \cdot d; \quad d = \frac{Q_1}{m}.$$

Отримаємо диференційне рівняння другого порядку в спрощеному вигляді:

$$\ddot{y} - c \cdot \dot{y} + d \cdot y - a = b_2 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) - b_1 \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (9)$$

Знайдемо загальний розв'язок рівняння без правої частини, при цьому характеристичне рівняння прийме вигляд:

$$\lambda^2 - c \cdot \lambda + d = 0, \quad (10)$$

загальний розв'язок такого рівняння, при умові $c \neq 0$, запишемо у вигляді:

$$y_1 = C_1 \cdot e^{\frac{1}{2}t \cdot (c + \sqrt{c^2 - 4d})} + C_2 \cdot e^{\frac{1}{2}t \cdot (c - \sqrt{c^2 - 4d})}, \quad (11)$$

де C_1, C_2 - сталі коефіцієнти.

Використовуючи метод варіації постійних [17] та підставляючи початкові умови $t = 0; y = 0; \dot{y} = 0$, знаходимо рішення диференційного рівняння (9):

$$y(t) = \frac{B_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) - B_2 \cdot \sin(\omega \cdot t) + B_3 \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) + B_4 \cdot \cos(\omega \cdot t) + D}{A} + C_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + C_2 \cdot e^{\lambda_2 t}. \quad (12)$$

Швидкість частки у вібропневмозрідженому шарі зерна можна описати наступним рівнянням:

$$V_y(t) = \frac{B_1 \cdot \omega_1 \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) - B_2 \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) - B_3 \cdot \omega_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) - B_4 \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t)}{A} + C_1 \cdot \lambda_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + C_2 \cdot \lambda_2 \cdot e^{\lambda_2 t}, \quad (13)$$

де

$$\lambda_1 = \frac{1}{2} \cdot (c + \sqrt{c^2 - 4d}); \quad \lambda_2 = \frac{1}{2} \cdot (c - \sqrt{c^2 - 4d});$$

$$A = d \cdot (c^2 \cdot d^2 \cdot \omega^2 + c^2 \cdot d^2 \cdot \omega_1^2 - 2 \cdot d^2 \cdot \omega^2 \cdot \omega_1^2 + 4 \cdot d^2 \cdot \omega^2 \cdot \omega_1^2 + \omega^4 \cdot \omega_1^4 - 2 \cdot \omega^4 \cdot \omega_1^2 - 2 \cdot d^3 \cdot \omega_1^2 + 2 \cdot d^2 \cdot \omega^2 + d^2 \cdot \omega^4 + d^2 \cdot \omega_1^4 + d^4 + c^2 \cdot d \cdot \omega_1^4 \cdot \omega^2 - 4 \cdot d \cdot c^2 \cdot \omega_1^2 + c^4 \cdot \omega_1^2 \cdot \omega^2 + c^2 \cdot \omega^4 \cdot \omega_1^2);$$

$$B1 = b_2 \cdot (d^4 + d^2 \cdot \omega_1^4 - 2 \cdot d^3 \cdot \omega^2 - d^3 \cdot \omega_1^2 - \omega^4 \cdot \omega_1^2 \cdot d - \omega^2 \cdot \omega_1^2 \cdot c^2 \cdot d + d^2 \cdot \omega^2 \cdot c^2 + 2 \cdot d^2 \cdot \omega^2 \cdot \omega_1^2);$$

$$B2 = b_1 \cdot (d^4 - d^2 \cdot \omega_1^4 + 2 \cdot d^3 \cdot \omega_1^2 + d^3 \cdot \omega^2 + \omega^2 \cdot \omega_1^4 \cdot d - \omega_1^2 \cdot c^2 \cdot d^2 - 2 \cdot d^2 \cdot \omega_1^2 \cdot \omega^2 + d \cdot \omega^2 \cdot \omega_1^2 \cdot c^2);$$

$$B3 = b_2 \cdot (d \cdot \omega_1 \cdot \omega^2 \cdot c^3 + \omega^4 \cdot \omega_1 \cdot c \cdot d + d^3 \cdot c \cdot \omega_1 - 2 \cdot d^2 \cdot \omega_1 \cdot \omega^2 \cdot c);$$

$$B4 = b_1 \cdot (2 \cdot d^2 \cdot c \cdot \omega_1^2 \cdot \omega - \omega \cdot \omega_1^2 \cdot c^3 \cdot d - d^3 \cdot c \cdot \omega - d \cdot \omega_1^4 \cdot \omega \cdot c);$$

$$C1 = \frac{(B_3 + B_4) \cdot \lambda_1 - B_1 \cdot \omega_1 + B_2 \cdot \omega}{A \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)} - \frac{B_3 + B_4}{A};$$

$$C2 = \frac{(B_3 + B_4) \cdot \lambda_1 - B_1 \cdot \omega_1 + B_2 \cdot \omega}{A \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)};$$

$$D = a_1 \cdot (4 \cdot d^2 \cdot \omega_1^2 \cdot \omega^2 - 4 \cdot d \cdot \omega^2 \cdot \omega_1^2 \cdot c^2 - 2 \cdot d \cdot \omega_1^4 \cdot \omega^2 - 2 \cdot d \cdot \omega_1^2 \cdot \omega^4 + \\ + d^2 \cdot \omega^2 \cdot c^2 + d^2 \cdot \omega_1^2 \cdot c^2 + \omega_1^4 \cdot \omega^4 + \omega_1^4 \cdot \omega^2 \cdot c^2 + \omega_1^2 \cdot \omega^2 \cdot c^4 + \omega_1^4 \cdot d^2 + \\ + \omega^4 \cdot d^2 - 2 \cdot \omega_1^2 \cdot d^3 - 2 \cdot \omega^2 \cdot d^3).$$

Отримане рівняння (12) дає можливість побудувати траєкторію руху частки у вібропневмозрідженому шарі зерна відносно вісі y , тобто по висоті зернового шару.

Для визначення графічних залежностей руху частки по висоті зернової суміші приймаємо наступні значення конструкційно-кінематичних параметрів технологічного процесу: $d_3 = 4 \cdot 10^{-3}$ м, $P_B = 1,21$ кг/м³, $P_n = 740$ кг/м³, $P_q = 1400$ кг/м³, $\nu = 1,51 \cdot 10^{-5}$ (м²/с), $\eta = 1,82 \cdot 10^{-5}$ (Н·с/м²), $A = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $\omega = 60$ с⁻¹, $V_B = 0 \dots 1,5$ м/с, $m = 47 \cdot 10^{-6}$ кг, $g = 9,81$ м/с², $\varepsilon_{ст} = 0,45$, $r_q = d_e/2$, $H_{ш} = 25 \cdot 10^{-3}$ м, $\varphi = 0,6$.

Графічна інтерпретація рішення рівняння (9) представлена на рис.2 та рис.3.

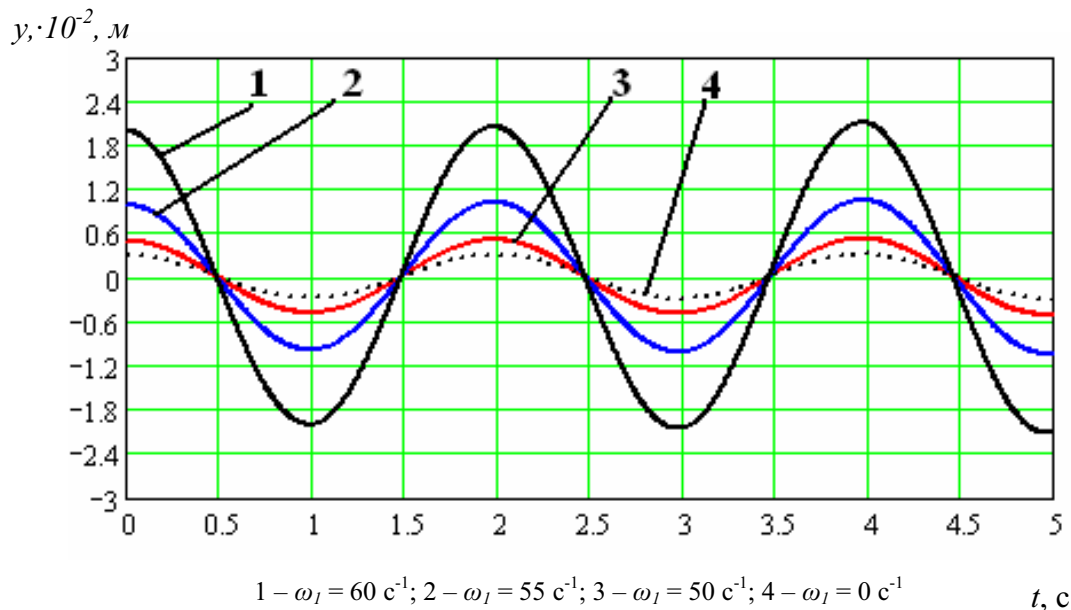


Рисунок 2 – Графік залежності переміщення частки вздовж осі y від часу сепарації зерна t при різних значеннях кутової швидкості коливань рухомої деки

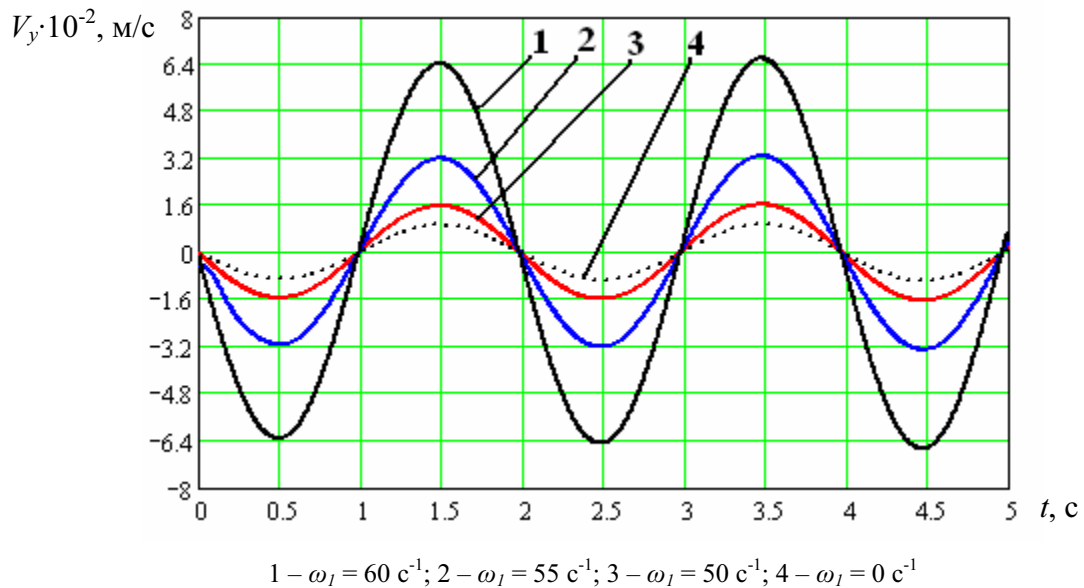


Рисунок 3 – Графік залежності швидкості переміщення частки вздовж осі y від часу сепарації зерна t при різних значеннях кутової швидкості коливальних рухів деки

Як показують графічні залежності, представлені на рис.2 та рис.3, рух частки за висотою зернової суміші має явно виражений коливальний характер. Збільшення частоти коливальних рухів рухомої деки призводить до збільшення амплітуди коливального руху частки відносно осі y . При нерухомій деці ($\omega_1 = 0 \text{ c}^{-1}$) амплітуда коливань менша, ніж з рухомою декою і становить 5 мм. Збільшення амплітуди коливального руху частки викликане більш інтенсивною гальмівною дією рухомої деки на шар зернової суміші.

Висновки. Таким чином, запропонована математична модель визначає поведінку руху частки у зернової суміші вібропневматичного сепаратора і дає можливість визначити та обґрунтувати режими роботи, конструкційні параметри нових робочих органів для підвищення пропускної здатності і ефективності роботи решітних поверхонь.

Список літератури

1. Бутко В.П. Исследование плотности зерна пшеницы как перспективного показателя технологических свойств. Автореф. дис. ...канд. техн. наук. / В.П. Бутко. – М., 1973. – 24с.
2. Василенко П. М. Теория движения частиц по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин / П.М. Василенко – К., 1960. – 283 с.
3. Гортинский В. В. Процессы сепарации на зерноперерабатывающих предприятиях / В. В. Гортинский, А. Б. Демский, М. А. Борискин. - М.: Колос, 1980. – 303с.
4. Патент на корисну модель № 18056 Україна (UA), МПК (2006) B07B1/28. Спосіб сепарації зернових матеріалів. С.П. Степаненко, Б.І. Котов, М.Г. Пастушенко (Україна); ННЦ "ІМЕСГ" УААН (Україна). - № U2006 05352, Заявл. 16.05.2006, Опубл. 16.10.2006, Бюл. №10, - 4 с: іл.
5. Степаненко С.П. Вплив параметрів пасивних розпушувачів на ефективність вібропневматичної сепарації зерна / С.П. Степаненко // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Вип.41. – Мелітополь: ТДАТА, 2006. – С. 153-160.
6. Котов Б.І. Теоретичне обґрунтування руху частинки зерна на вібропневморешеті при дії розпушувачів робочих органів / Б.І. Котов, С.П. Степаненко, Р.А. Калініченко // Науковий вісник Національного аграрного університету. – К., 2007. – Вип. 115. С. 112-117.
7. Патент на корисну модель № 18083 Україна (UA), МПК (2006) B07B4/08. Зерносепаратор. С.П. Степаненко, Б.І. Котов, С.П. Погорілий (Україна); ННЦ "ІМЕСГ" УААН (Україна). - № U2006 05566, Заявл. 22.05.2006. Опубл. 16.10.2006, Бюл. № 10, - 4 с.: іл.
8. Гусак А.А. Справочник по высшей математике: Справ. / А.А. Гусак, Г.М. Гусак. – Мн.: Наука і техніка, 1991. – 480 с.

9. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям / Э. Камке. – М., 1965. – 704 с.
10. Блехман И.И. Вибрационное перемещение / И.И. Блехман, Г.Ю. Дженелидзе. – М. Наука, 1964. – 410 с.
11. Заика П.М. Вибрационное перемещение твердых и сыпучих тел в сельскохозяйственных машинах / П.М. Заика. – К. УСХА. – 1998. – 625 с.
12. Дринча В.М. Исследование сепарации семян и разработка машинных технологий их подготовки / В.М. Дринча. – Воронеж: Издательство НПО «МОДЭК», 2006. – 384 с.
13. Гальперин Н.И. Основы техники псевдооживления / Н.И. Гальперин, В. Г. Айнштейн, В. Б. Кваша. – М.: Химия, 1967. – 664 с.
14. Тищенко Л.Н. Интенсификация сепарирования зерна / Л.Н. Тищенко. – Харьков: Основа, 2004. – 224 с., 22 л. ил. – На рус. яз.
15. Пивень М.В. Обоснование параметров процесса решетного сепарирования зерновых смесей. Автореф. дис.... канд. техн. наук. / М.В. Пивень. – Х., 2006. – 24с.
16. Степаненко С.П. Підвищення ефективності вібропневматичних сепараторів зерна / С.П. Степаненко // Дис. ...канд. техн. наук. – Глеваха.: ННЦ «ІМЕСГ». – 2008. – 183 с.
17. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике / М.Я. Выгодский. – М.: Наука, 1963. – 501с.

С. Степаненко

Аналитические исследования влияния двунаправленной вибрации рабочих органов сепаратора на интенсификацию процесса разделение зерна

Приведены аналитические исследования относительно, уточнения математической модели вибропневматического разделения сыпучих смесей с двунаправленной вибрацией рабочих органов. Исследовано дифференциальное уравнение колебательного движения рабочей поверхности вибропневматического сепаратора при условии дополнительного влияния на зерновой материал колебательного движения деки для искусственного торможения слоя.

S. Stepanenko

Analytical study of influence of working two way vibration separator for the separation of grain process intensification

Analytical researches are resulted relatively, clarifications of mathematical model of vibropneumatic division of friable mixtures with the bidirectional vibration of workings organs. Differential equalization of fluctuating motion of working surface of vibropneumatic separator is investigational on condition of additional influence on corn material of fluctuating motion of sounding board for the artificial braking layer.

Одержано 22.07.11