Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2020, Vol. 11, No 2, 157-164
ISSN 2663-1334 (print), ISSN 2663-1342 (online), www.journals.nubip.edu.ua/index.php/Tekhnica

DOI: 10.31548/machenergy.2020.02.157-164

УДК 631.362

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СЕПАРАЦІЇ НАСІННЯ РІПАКУ СЕПАРАТОРОМ УДАРНОЇ ДІЇ

М. В. Брагінець[1], В. Т. Дмитрів[2], В. С. Хмельовський[3], О. В. Богомолов[1], О. О. Богомолов[1]

[1]Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Україна.
[2]Національний університет «Львівська політехніка», Україна.
[3]Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

Стаття з спеціальності: 133 – галузеве машинобудування.

Кореспонденція авторів: brnivl2020@gmail.com.

Історія статті: отримано – січень 2019, акцептовано – квітень 2020.
Бібл. 16, рис. 6, табл. 0.

Анотація. Розглянуті питання використання насіння ріпаку на корм в тваринництві та його підготовка в технологічній лінії, шляхом очищення насіння ріпаку від важковідокремлюванного насіння бур'янистих рослин. Встановлено, що на пневмо-решітних сепараторах загального призначення, які, як правило, використовують для очищення насіння ріпаку, видаляється значна кількість насіння бур'янів, мінеральних та органічних домішок але повністю видалити важковідокремлюване насіння, таких бур'янів як, наприклад: мишій, куряче просо, підмаренник чіпкий та інших не вдається.

Наведені дані про використання продуктів переробки насіння ріпаку на корм свиням та великій рогатій худобі, наприклад, ріпакова макуха, що використовується у складі комбікормів, дозволяє підвищити молочну продуктивність корів та знизити втрати праці на одну одиницю продукції до 5…14 %.

Запропоновано проводити очищення насіння ріпаку від важковідокремлюваних домішок за допомогою багатоярусного сепаратора ударної дії.

В статті проведено моделювання процесу сепарації насіння ріпаку сепаратором ударної дії. Розглянуто рух частинки ідеалізованої, у вигляді матеріальної точки при співударянні її з похилими, в поздовжньому та поперечному напрямках, деками сепаратора ударної дії.

Розрахована теоретична продуктивність сепаратора ударної дії, яка складає 8…30 кг/год. для одного модуля.

Проведені дослідження дозволили визначити конструктивні параметри багатоярусного ударного сепаратора та розрахувати його продуктивність.

Ключові слова: насіння, ріпак, сепарація, макуха, шрот, моделювання, удар.

Постановка проблеми

При використанні насіння ріпаку у тваринництві, його потрібно очищувати від домішок. Для цього використовуються дві операції: попереднє очищення збіжжя на зерноочисних машинах типу ОВП-20А та очищення ріпаку від важковідокремлюваних домішок. Виконання цих сумісних двох операцій є технологічний процес очищення. В технологічному процесі сепарації насіння ріпаку перша операція – попереднє очищення купи насіння ріпаку виконується машиною з пневмо-решітним робочим органом, а друга – експериментальною установкою з робочим органом у вигляді ударних поверхонь, роботу якої необхідно представити математичними залежностями з використанням теорії та кінематики руху. Тому, необхідність моделювання технологічного процесу сепарації насіння ріпаку сепаратором ударної дії є безсумнівно актуальною задачею

Аналіз останніх досліджень

Ріпак є цінною олійною та кормовою культурою. Річне виробництво ріпаку в світі становить 50 млн. тон і з кожним роком збільшується. Підвищений інтерес до ріпаку обумовлений пристосованістю цієї культури до помірного клімату, високою продуктивністю сучасних сортів, прогресивною технологією оброблення, збільшенням потреб у виробництві рослинної олії та високобілкових кормів. Ріпаковий шрот і макуха є хорошим постачальником мінеральних речовин. За вмістом кальцію, фосфору, міді, магнію і марганцю вони перевершують соєвий шрот. Доступність у них кальцію становить – 68 %, фосфору – 75 %, магнію – 62 %, марганцю – 54 %, цинку – 44 %. У Північнокавказькому НДУ тваринництва встановлено, що годування свиней кормами з ріпаковим шротом, замість соняшникового, дозволило знизити витрату кормів на 1 кг приросту живої маси до 4,25 кг, використання ріпакового шроту для годівлі дійних корів вигідне ще й тому, що він в 2 рази дешевше соєвого. Для годування корів використовується і ріпакова макуха в складі комбікормів, яка дозволяє підвищити молочну продуктивність корів та знизити витрати праці на одну одиницю продукції до 5…14 % [1, 2]. Недостатня вивченість питань очищення насіння ріпаку від насіння бур'янистих рослин мишію, курячого проса та інших, стримують його

розповсюдженість в Україні. Як показала практика насінницьких господарств, однією з основних проблем очищення насіння ріпаку є очищення його від важковідокремлюванного насіння бур'янистих рослин. Типовою є ситуація, коли після проходження всього циклу післязбиральної обробки, вихід насіння ріпаку I класу становить 35…40 %, а ще 35…40 % повноцінного насіння, яке за всіма іншими показниками, що задовольняють вимоги стандарту, не вдається довести до рівня I класу із за вмісту насіння бур'янистих рослин. Розв'язок цієї проблеми дозволить суттєво підвищити забезпеченість виробничих господарств високоякісним насіннєвим матеріалом ріпаку, отримати значний економічний ефект [4].

Для сепарації насіння ріпаку використовують, як правило, пневмо-решітні сепаратори, що випускаються промисловістю для очищення зернових культур. Триєри не використовуються, оскільки відбувається забивання чарунок олійними домішками. Значна кількість насіння бур'янистих рослин видаляється пневмо-решітними сепараторами, але повністю видалити насіння таких бур'янів як: мишій, куряче просо, підмаренник чіпкий, круглець метельчатий не вдається. Пошук методів та засобів очищення насіння ріпаку від важковідокремлюваних домішків триває до теперішнього часу. Багатьма дослідниками [3-7] встановлено, що фізико-механічні властивості насіння ріпаку та важковідокремлюваних домішків мають найбільші відмінності за пружністю. Тому, пошук нових способів очищення насіння ріпаку від важковідокремлюваних домішків, слід здійснювати за цією ознакою та виконати моделювання технологічного процесу сепарації насіння ріпаку сепаратором ударної дії, який здійснює даний процес за пружними властивостями компонентів. Значно поліпшити якість роботи ударних сепараторів, можна шляхом використання багаторазового удару насіння об відбивні поверхні, що сепарують. Багаторазові зіткнення насіння з відбивними поверхнями, дозволяють, як би, усереднити їхні пружні властивості й тим самим точніше розділити суміш за пружними властивостями [7]. Для сепарації зернових сумішей, в яких процес здійснюється за допомогою удару пружних тіл з поверхнею, що сепарує, використовуються ударні сепаратори або сепаратори з вібраційними неперфорованими поверхнями [7-10]. Сепарація зернових сумішей на ударних та віброударних поверхнях здійснюється у тому разі, коли траєкторії та швидкості переміщення зерна різні. Найкращий ефект сепарації досягається, якщо траєкторії відмінні не тільки за величиною, а і за напрямом. Тобто, основною задачею теоретичного дослідження процесу сепарації зернових сумішей є визначення швидкостей та напрямків переміщення компонентів, а також траєкторій їх руху по робочим поверхням сепараторів. В основу теорії процесу ударної та віброударної сепарації покладені закономірності руху переміщення частинки, ідеалізованої у вигляді тіла або матеріальної точки [11-16]. Дослідження моделі у вигляді матеріальної точки, дозволило, у багатьох випадках, розглянути сутність явища ударної та віброударної сепарації та визначити ступінь впливу на нього різних факторів. Однак, моделювання процесу багаторазового зіткнення частинки, ідеалізованої у вигляді матеріальної точки, з похилими в поздовжньо-поперечному напрямку робочими поверхнями з багаторазовими зіткненнями, дослідниками не розглядались. Тому, моделювання процесу сепарації насіння ріпаку сепаратором ударної дії, з багаторазовими зіткненнями компонентів суміші, є безперечно актуальним.

Мета досліджень

Метою досліджень є підвищення якості сепарації насіння ріпаку, шляхом моделювання процесу, при багаторазових зіткненнях частинок з похилими в поздовжньо-поперечному напрямку деками сепаратора, за рахунок ударного переміщення.

Результати досліджень

Розглянемо схему роботи одного ярусу сепаратора ударної дії (рис. 1).

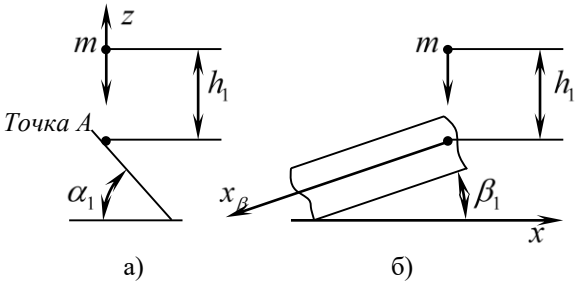

Рис. 1. Схема руху насіння з бункера на деку (а – вид спереду, б – вид з боку): α_1 – кут нахилу деки у горизонтальній площині; β_1 – кут нахилу деки у повздовжній вісі x до горизонту.

Fig. 1. Scheme of seed movement from the hopper to the deck (a - front view, b - side view).

Маємо вісі x і z, вісь y в горизонтальній площині перпендикулярна до вісі x. Визначаємо час t_1, за який пройде насіння масою m_1 до деки:

$$t_1 = \sqrt{\frac{2h_1}{g}}, \text{ с} \quad (1)$$

Швидкість в точці A для насіння масою m_1 буде:

$$v(t) = v_0 + g \cdot t, \quad (2)$$

де v_0 – початкова швидкість, $v_0 = 0$.

Враховуючи рівняння (1), отримуємо:

$$v_1 = \sqrt{2gh_1}. \quad (2.1)$$

Залежність (2.1) – швидкість опускання насіння на 1-у деку, в точці взаємодії (A) – швидкість удару.

Перетворюємо координатну систему (рис. 2) з Axy в $Ax'y'$.

$$\begin{cases} \bar{\tau} = -\cos\alpha \cdot \bar{\imath} + \sin\alpha \cdot \bar{\jmath}; \\ \bar{n} = \sin\alpha \cdot \bar{\imath} + \cos\alpha \cdot \bar{\jmath}. \end{cases} \quad (3)$$

Формуємо матрицю переходу:

$\mathrm{A} = \begin{vmatrix} -\cos\alpha & \sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{vmatrix}$ – матриця переходу від системи Axy до системи $Ax'y'$;

$A^{-1} = \begin{vmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ \sin\alpha & -\cos\alpha \end{vmatrix}$ – матриця оберненого переходу від системи Axy до системи $Ax'y'$;

$\begin{vmatrix} \bar{\tau} \\ \bar{n} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \bar{i} \\ \bar{j} \end{vmatrix}$ – вектори-стовпчики ортів координаційних систем.

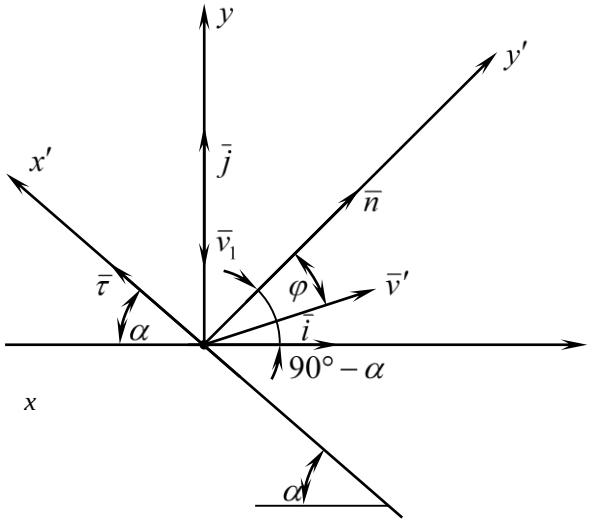

Рис. 2. Координатні системи площини у точці удару насіння в деку: $\bar{n}$ і $\bar{\tau}$ – орти координатної системи $Ax'y'$.

Fig. 2. Coordinate systems of the plane at the point of impact of the seed in the deck.

У матричній формі система рівняння (3) запишеться:

$$\begin{vmatrix} \bar{\tau} \\ \bar{n} \end{vmatrix} = Ax \begin{vmatrix} \bar{i} \\ \bar{j} \end{vmatrix}.$$

Тоді вектор швидкості $\bar{v}'$ частини (зернини) після удару в двох координаційній системі буде

$$\bar{v}' = v'_x \cdot \bar{\imath} + v'_y \cdot \bar{\jmath} = v'_x \cdot \bar{\tau} + v'_y \cdot \bar{n},$$

або у вигляді системи рівнянь, прийнявши, що $v'_x = v^{1\prime}_\tau$; $v'_y = v'_n$.

$$\begin{cases} v'_x = \cos\alpha \cdot v'_\tau + \sin\alpha \cdot v'_n; \\ v'_y = \sin\alpha \cdot v'_\tau - \cos\alpha \cdot v'_n. \end{cases}$$

$$\begin{cases} v'_\tau = -\cos\alpha \cdot v'_x + \sin\alpha \cdot v'_y; \\ v'_\tau = \sin\alpha \cdot v'_x + \cos\alpha \cdot v'_y. \end{cases}$$

У матричній формі

$$\begin{vmatrix} v'_x \\ v'_y \end{vmatrix} = A^{-1}x \begin{vmatrix} v'_\tau \\ v'_n \end{vmatrix}; \begin{vmatrix} v'_\tau \\ v'_n \end{vmatrix} = Ax \begin{vmatrix} v'_x \\ v'_y \end{vmatrix}.$$

Тоді зміна енергії при ударі буде в векторній формі

$$m(\bar{v}'_1 - v_1) = \bar{S}_1.$$

В проекціях на осі координати системи $Ax'y'$ (на дотичну τ і нормаль n)

$$\begin{cases} m(-\bar{v}'_1 \sin\varphi - v_1 \sin\alpha) = 0; \\ m(\bar{v}'_1 \cos\varphi - v_1 \cos\alpha) = \bar{S}_1. \end{cases} \quad (4)$$

З першого рівняння системи (4) знаходимо:

$$-\bar{v}'_1 \sin\varphi = v_1 \sin\alpha. \quad (5)$$

Коефіцієнт відновлення K_v для розрахунку швидкості після удару:

$$K_v = -\frac{v'_n}{v_n} = -\frac{v'_1 \cos\varphi}{-v_1 \cos\alpha}.$$

Тоді

$$v'_1 \cos\varphi = K_v v_1 \cos\alpha. \quad (6)$$

З рівнянь (5) та (6) визначаємо модуль швидкості матеріальної точки після удару

$$v'_1 = v_1 \sqrt{\sin^2\alpha + K_v^2 \cos^2\alpha}.$$

Кут нахилу вектора швидкості $\bar{v}'_1$ до нормалі n

$$\varphi = arcctg(-K_v \cdot ctg\alpha).$$

З другого рівняння системи (4) визначаємо модуль ударного імпульсу

$$S = m \cdot v_1 \cdot \cos\alpha\,(K_v - 1).$$

Розраховуємо рух насіння, яке відбилося від першої деки і падає на другу деку (рис. 3).

Схема векторів сил і швидкостей буде наступною:

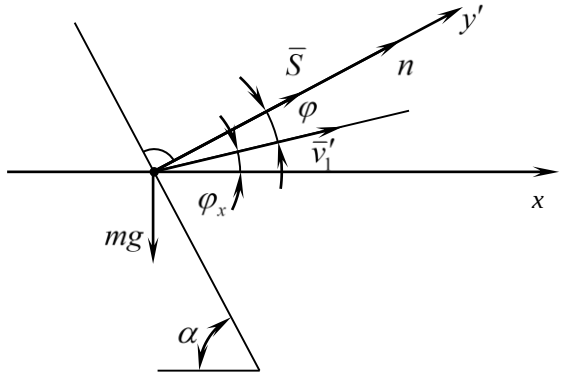

Рис. 3. Схема напрямку дії сил і векторів швидкостей відбитого насіння у момент відбиття.

Fig. 3. Scheme of the direction of action of forces and vectors of velocities of the reflected seed at the moment of reflection.

Враховуючи з рис. 2:

$$\begin{cases} v'_\tau = -v'_1 \cdot \sin\varphi; \\ v'_n = v'_1 \cdot \cos\varphi. \end{cases} \quad (7)$$

Тоді за формулою (7) перетворення координат швидкостей отримаємо

$$\begin{cases} v'_{x1} = -v'_1 \sin\varphi \cos\alpha + v'_1 \cos\varphi \sin\alpha; \\ v'_{y1} = -v'_1 \sin\varphi \sin\alpha - v'_1 \cos\varphi \cos\alpha. \end{cases} \quad (8)$$

Кут нахилу вектора швидкостей $\bar{v}'_1$ відносно додаткового напрямку осі буде

$$\cos(\varphi_x) = \cos(v'_1, x) = \frac{v'_{x1}}{v'}; \quad (9)$$

$$\varphi_x = arccos(\varphi_x).$$

Складаємо систему рівнянь руху насіння після удару об деку, у проекціях на вісі x і y

$$\begin{cases} m \cdot v'_{x1} = S \cdot \sin\alpha; \\ m \cdot v'_{y1} = S \cdot \cos\alpha - mgt. \end{cases} \quad (10)$$

З системи (10) визначаємо проекції швидкостей насіння після удару

$$\begin{cases} v'_{x1} = \frac{S}{m} \cdot \sin\alpha; \\ v'_{y1} = \frac{S}{m} \cos\alpha - gt. \end{cases} \quad (11)$$

Початкові умови після ударного руху

t=0; x_0=0; y_0=0; $\dot{x}_0 = v'_{x1}$; $\dot{y}_0 = v'_{y1}$.

Рівняння руху насіння після удару

$$\begin{cases} v'_{x1} = \frac{S}{m} \cdot \sin\alpha; \\ v'_{y1} = \frac{S}{m} \cos\alpha - gt. \end{cases} \quad (12)$$

Підставляємо в систему (12) вирази системи (11)

$$\begin{cases} x = \frac{S}{m} \sin\alpha \cdot t; \\ y = \frac{S}{m} \cos\alpha \cdot t - gt^2 - \frac{gt^2}{2}. \end{cases} \quad (13)$$

Знаючи конструкцію сепаратора, відстань по горизонталі між деками задано – x, по вертикалі – y.

Тоді визначаємо час, по осі x– $t \Longrightarrow t_x$, по осі y – $t \Longrightarrow t_y$.

З системи рівнянь (13) отримаємо:

з першого рівняння:

$$t_x = \frac{x \cdot m}{S \cdot \sin\alpha}; \quad (14)$$

з другого рівняння:

$$t_{y,1,2} = \frac{\frac{S}{m}\cos\alpha \pm \sqrt{\left(\frac{S}{m}\cos\alpha\right)^2 - 6gy}}{3g}; \quad (15)$$

Умова:

– насіння долетіло до другої деки:

$$t_2 = t_y = t;$$

– насіння не долетіло до деки

$$t_x > t_y; t = t_y;$$

– не повинна виконуватись умова, коли насіння перелетіло до другу деку

$$t_x < t_y.$$

Прийнявши значення часу t, з системи рівнянь (13) визначаємо швидкість в точці удару на другій деці – точка A_2:

$$\begin{cases} \frac{d_x}{d_t} = \frac{S}{m}\sin\alpha = v'_{x1-2}; \\ \frac{d_y}{d_t} = \frac{S}{m}\cos\alpha - mg - gt = v'_{y1-2}. \end{cases} \quad (16)$$

Модуль швидкості у точці падіння буде

$$v'_{1-2} = \sqrt{(v'_{x1-2})^2 + (v'_{y1-2})^2}. \quad (17)$$

Розрахуємо кут нахилу вектора швидкості v'_{x1-2} відносно осі x в момент удару в точці A_2 (рис. 4):

$$\cos(\beta_2) = \cos\left(v'_{1-2,x}\right) = \frac{v'_{x1-2}}{v'_{1-2}}; \quad (18)$$

$$\beta_2 = arccos\left(v'_{1-2,x}\right).$$

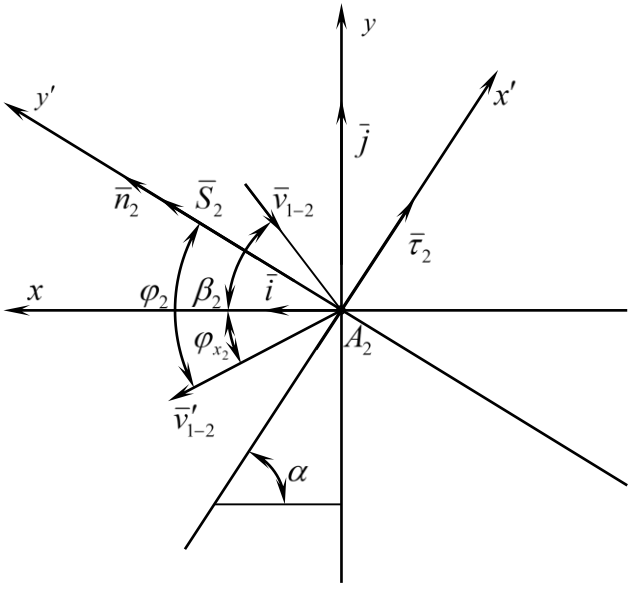

Рис. 4. Координатні системи площини у точці A_2 удару насіння об другу деку.

Fig. 4. Coordinate systems of the plane at the point A2 of the impact of the seed on the second deck.

Перетворимо координаційну систему для другої деки:

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_2 &= -\bar{\imath}\cos\alpha + \bar{\jmath}\sin\alpha \\ \bar{n}_2 &= \bar{\imath}\sin\alpha + \bar{\jmath}\cos\alpha \end{aligned}. \quad (19)$$

Зміна кількості енергії (імпульс удару) в векторній формі буде мати вигляд:

$$m(\bar{v}'_{1-2} - \bar{v}_{1-2}) = \bar{S}_2. \quad (20)$$

В проекціях на осі координат системи $A_2x'y'$ (на дотичну τ_2 і нормаль n_2):

$$\begin{cases} m\left(v'_{1-2}\sin\varphi_2 + v'_{1-2}\cos\left(180 - (\beta_2 + \alpha)\right)\right) = 0; \\ m\left(v'_{1-2}\cos\varphi_2 - v_{1-2}\cos(\beta_2 + \alpha - 90)\right) = S_2. \end{cases} \quad (21)$$

З першого рівняння системи (21):

$$v'_{1-2}\sin\varphi_2 = -v_{1-2}\cos\left(180 - (\beta_2 + \alpha)\right). \quad (22)$$

Коефіцієнт відновлення K_{v2} для розрахунку швидкості після удару:

$$K_{v2} = -\frac{v'_{n2}}{v_{n2}} = -\frac{v'_{1-2}\cos\varphi_2}{-v_{1-2}\cos(\beta_2 + \alpha - 90)};$$

$$v'_{1-2}\cos\varphi_2 = K_{v2}\, v_{1-2}\cos(\beta_2 + \alpha - 90). \quad (23)$$

З рівнянь (21) і (22) піднявши до квадрату і просумувавши, визначаємо модуль швидкості насіння після удару

$$v'_{1-2} = v_{1-2}\sqrt{(-\cos(\beta_2 + \alpha))^2 + K_{v2}^2(-\sin(\beta_2 + \alpha))^2}. \quad (24)$$

Кут нахилу φ_2 вектора швидкості v'_{1-2} до нормалі n_2, розділивши залежність (22) на (23) і провівши спрощення, отримаємо:

$$\varphi_2 = arctg\left(-\frac{\mathrm{ctg}(\beta_2 + \alpha)}{K_{v2}}\right). \quad (25)$$

З другого рівняння системи (21) визначаємо модуль ударного імпульсу:

$$S_2 = mv_{1-2}sin(\beta_2 + \alpha)(1 - K_v). \quad (26)$$

Розглядаємо рух насіння, яке відбилось від другої деки і падає на третю деку. З рисунку 4 визначаємо:

$$\begin{cases} v'_{\tau 2} = v_{1-2}\sin\varphi_2; \\ v'_{n2} = v_{1-2}\cos\varphi_2. \end{cases} \quad (27)$$

Тоді за аналогією з формулами (8) та згідно рисунку 4 записуємо:

$$\begin{cases} v'_{x1-2} = v'_{\tau 2}\cos\alpha + v'_{n2}\sin\alpha; \\ v'_{y1-2} = -v'_{\tau 2}\sin\alpha + v'_{n2}\cos\alpha. \end{cases} \quad (28)$$

або враховуючи (27) отримуємо:

$$\begin{cases} v'_{x1-2} = v'_{1-2}\sin\varphi_2\cos\alpha + v'_{1-2}\cos\varphi_2\sin\alpha; \\ v'_{y1-2} = -v'_{1-2}\sin\varphi_2\sin\alpha + v'_{1-2}\cos\varphi_2\cos\alpha. \end{cases} \quad (29)$$

Кут між вектором швидкості v'_{1-2} і додатковою віссю x буде становити:

$$\cos(\varphi_{x2}) = \cos\left(\bar{v}'_{1-2,x}\right) = \frac{v'_{x1-2}}{v'_{1-2}};$$

$$\varphi_{x2} = arccos\left(\frac{v'_{x1-2}}{v'_{1-2}}\right). \quad (30)$$

Складаємо систему рівнянь руху насіння після удару об другу деку в проекціях на вісі x і y:

$$\begin{cases} mv'_{x1-2} = S_2\sin\alpha \\ mv'_{y1-2} = S_2\cos\alpha - mgt_2 \end{cases}. \quad (31)$$

В системі (31) визначаємо проекції швидкості насіння після удару об другу деку:

$$\begin{cases} v'_{x1-2} = \frac{S_2}{m}\sin\alpha \\ v'_{y1-2} = \frac{S_2}{m}\cos\alpha - gt_2 \end{cases}. \quad (32)$$

Початкові умови руху, після другого удару об другу деку:

$$\begin{cases} x = v'_{x1-2} \cdot t_2; \\ y = v'_{x1-2}t_2 - \frac{gt_2^2}{2}. \end{cases} \quad (33)$$

Підставляємо в систему (33) вирази з (32)

$$\begin{cases} x = \frac{S_2}{m}\sin\alpha\, t_2; \\ y = \frac{S_2}{m}\cos\alpha\, t_2 - gt_2^2 - \frac{gt_2^2}{2}. \end{cases} \quad (34)$$

Аналогічно визначаємо час t_2 по осі $x \rightarrow t_2 \Longrightarrow t_{2x}$, по

осі $y \to t_2 \Rightarrow t_{2y}$.

З системи (34) одержуємо:

$$t_{2x} = \frac{xm}{S_2 \sin\alpha}; \quad (35)$$

З другого рівняння системи (34):

$$t_{2y,1-2} = \frac{\frac{S_2}{m}\cos\alpha \mp \sqrt{\left(\frac{S_2}{m}\cos\alpha\right)^2 - 6gy}}{3g}; \quad (36)$$

Умова така ж сама.

Прийнявши значення *t* після другої деки з системи рівнянь (33) визначаємо швидкість у точці удару на третій деці – точка *A3* (аналогічно з рис. 4).

$$\begin{cases} \frac{d_x}{d_t} = \frac{S_2}{m}\sin\alpha = v_{x2-3}; \\ \frac{d_y}{d_t} = \frac{S_2}{m}\cos\alpha - 2gt - gt = v_{y2-3}. \end{cases} \quad (37)$$

де *m* – еквівалент сили насіння,

$$m \to \frac{m}{g} \to \frac{Н\cdot м}{c^2}.$$

Визначивши час t_2, який визначає момент удару насіння в другу деку, розрахуємо швидкості за рівняннями системи (36). Модуль швидкості у точці падіння (удару) насіння буде:

$$v_{2-3} = \sqrt{(v_{x2-3})^2 + (v_{y2-3})^2}. \quad (38)$$

Кут нахилу вектора швидкості $\bar{v}_{2-3}$ відносно вісі x в момент удару в точці *A3* буде згідно рівняння (17):

$$\beta_3 = arccos\left(\frac{v_{x2-3}}{v_{2-3}}\right). \quad (39)$$

Зміна кількості енергії (імпульс удару) у векторній формі буде мати вигляд:

$$\bar{S}_3 = m(\bar{v}'_{2-3} - v_{2-3}). \quad (40)$$

де $\bar{v}'_{2-3}$ – вектор швидкості насіння після удару об третю деку.

Відповідно, модуль швидкості насіння після удару за аналогією залежності (23) буде:

$$v'_{2-3} = v_{2-3}\sqrt{(-\cos(\beta_3+\alpha))^2 + K_{v3}^2(-sin(\beta_2+\alpha))^2}. \quad (41)$$

Кут нахилу φ_3 вектора швидкості v'_{2-3} до нормалі n_3, за аналогією залежності (25), буде:

$$\varphi_3 = arctg\left(-\frac{\mathrm{ctg}(\beta_3+\alpha)}{K_{v3}}\right). \quad (42)$$

Відповідно модуль ударного імпульсу буде становити:

$$S_3 = mv_{2-3}sin(\beta_3+\alpha)(1-K_{v3}). \quad (43)$$

Отже, після удару насіння об третю деку, розраховуємо часові і кінематичні параметри руху насіння до опускання на основу, або на наступну деку, якщо вона є.

Алгоритм розрахунку аналогічний попередньому. Кут між вектором швидкості v'_{2-3} і додатковою віссю *x*:

$$\varphi_{x3} = arccos\left(\frac{v'_{x2-3}}{v'_{2-3}}\right). \quad (44)$$

Проекції вектора модуля швидкості на вісі *x* і *y*:

$$\begin{cases} v'_{x2-3} = v'_{2-3}\sin\varphi_3\cos\alpha + v'_{2-3}\cos\varphi_3\sin\alpha; \\ v'_{y2-3} = -v'_{2-3}\sin\varphi_3\sin\alpha + v'_{2-3}\cos\varphi_3\cos\alpha. \end{cases} \quad (45)$$

Визначаємо час t_{3x} по вісі *x*:

$$t_{3x} = \frac{xm}{S_3\sin\alpha g},$$

$$t_{3y} = \frac{\frac{S_3 g}{m}\cos\alpha \mp \sqrt{\left(\frac{S_3 y}{m}\cos\alpha\right)^2 - 6gy}}{3g}; \quad (46)$$

де *m* – маса зернини, $\frac{H\cdot c^2}{м}$.

Для наступних дек записуємо залежності:

$\varphi_{xi} = arccos\left(\frac{v_{xi}}{v_{i-1}}\right)$ – до удару об *i*-у деку;

$\beta_i = arccos\left(\frac{v_{xi}}{v_i}\right)$ – до удару об *i*-у деку;

$v_i = v_i\sqrt{(-\cos(\beta_i+\alpha))^2 + K_{vi}^2(-sin(\beta_i+\alpha))^2}$ – після удару об *i*-у деку;

$\varphi_i = arctg\left(-\frac{\mathrm{ctg}(\beta_i+\alpha)}{K_{vi}}\right)$ – після удару;

$S_i = mv_i sin(\beta_i+\alpha)(K_{vi}-1)$ – імпульс сили після удару об *i*-у деку.

Час проходження насінини після удару об *i-1* деку до *i* деки:

$$t_{x,(i+1,i)} = \frac{xm_i}{S_i\sin\alpha};$$

$$t_{y,(i+1,i)} = \frac{\frac{S_i g}{m_i}\cos\alpha \mp \sqrt{\left(\frac{S_i y}{m_i}\cos\alpha\right)^2 - 6gy}}{3g},$$

де *i* – номер деки;

m_i – маса *1*-ї насінини, Н·с²/м;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

y – відстань по вертикалі між деками *i+1* та *i*, м;

x – імпульс сили відбитої насінини від деки *i*, Н·с.

Загальний час проходження зернини для трьох дек буде:

$$t_{сум} = t + t_1 + t_2 + t_3 + t_i, \text{ с} \quad (47)$$

t – тривалість проходження насіння від бункера до першої деки, с;

t_1 – тривалість проходження насіння від першої до другої деки, с;

t_2 – тривалість проходження насіння від другої до третьої деки, с;

t_3 – тривалість проходження насіння від третьої до *i*-ої деки, с;

t_i – тривалість проходження насіння від i-ої до i+1 деки.

Продуктивність сепарування визначаємо за наступною залежністю для насіння m_i маси:

$$Q_{c.m_i} = \frac{m_{i_{1000}}\delta_{m_i}}{t_{сум.m_i}\cdot 10^3}, \text{ кг/с} \quad (48)$$

де $m_{i_{1000}}$ – маса 1000 насінин *i*-го розмірного ряду, грам (наприклад, m_1=2,5; m_2=5,0; m_3=7,5;);

δ_{m_i}– відсоток фракції заданої маси в 1000 насінин;

$t_{сум.m_i}$ – сумарний час проходження насіння масою m_i від бункера до останньої деки, с.

Далі, за допомогою програми MathCad, були розраховані залежності модуля швидкості насінин при ударі від їх маси та кута установки деки, які представлені на рис. 5. Як видно з рис. 5, величина модуля швидкості частинки після удару не залежить від маси насінини і зростає при збільшені нахилу деки в межах від 100 до 500. Тобто, найбільш сприятливими для сепарації будуть кути нахилу в межах 40°-50°.

На рис. 6 представлені залежності продуктивності сепарації від маси насінин і кута установки деки. Як видно з рис. 6 продуктивність сепарації дещо збільшується з підвищенням кута установки деки в межах 10°-50° та значно зростає в залежності від маси насінин і коливається від 8 до 30 кг/год. для одного ярусу.

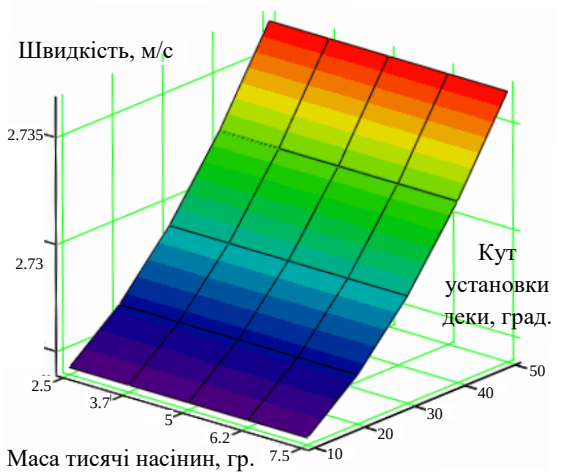

Рис. 5. Залежність модуля швидкості насінини від її маси і кута установки деки.

Fig. 5. Dependence of the seed velocity modulus on its mass and the angle of installation of the deck.

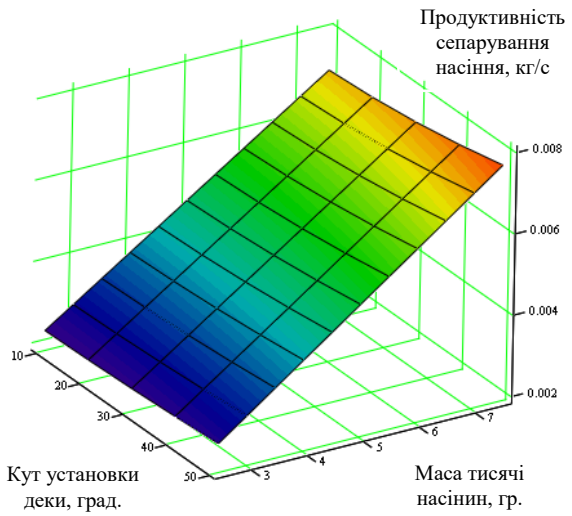

Рис. 6. Продуктивність сепарування від маси насінини і кута установки деки.

Fig. 6. Productivity of separation from weight of seeds and a corner of installation of a deck.

Висновки

1. В результаті проведеного дослідження розв'язано задачу визначення продуктивності сепаратора ударної дії від маси насінини і кута установки деки, яка коливається від 8 до 30 кг/год. для одного ярусу сепаратора.

2. Модуль швидкості частинки ідеалізованої у вигляді матеріальної точки, не залежить від маси частинки, і значно зростає зі збільшенням кута нахилу деки в межах від 10° до 50°.

Список літератури

1. *Лазаревич В. П.* Використання насіння ріпаку в раціонах корів. Вісник аграрної науки. 2012. № 5. С. 29–31.

2. *Жуковський О. М.* Відходи переробки ріпаку в годівлі тварин. Тваринництво України. 2007. № 3. С. 32–34.

3. *Птицын С. Д.* Сепарация зерна при ударе. Труды ВИМ. 1949. Т 12. С. 79–84.

4. *Бобров С. Ф.* Разделение зерна по принципу упругости и зависимости от угла наклона отражательных плиток. Научн. записки Херсонского СХИ. Киев : УСХА, 1959. Вып. 8. С. 127–136.

5. *Шукюров С. А.* Сопротивление семян сои по упругим свойствам: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук 05.20.01. Новосибирский ин-т механизации сельского хоз-ва. Новосибирск, 1984. 19 с.

6. *Филинков Н. И.* Физико-механические основы сепарации зерновой массы по влажности методом упругих деформаций. Труды ВНИИ зернобобовых культур. 1968. Т. 2. С. 319–333.

7. *Богомолов А. В.* Сепарация трудноразделимых сыпучих смесей. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2013. С. 303–308.

8. *Васильєв А. М.* Новый режим вибрационного движения частицы на рифленой поверхности сепарирующих машин. Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. № 12. С. 16–18.

9. *Заика П. М., Мазнев Г. Е.* Сепарация семян по комплексу физико-механических свойств. Москва. Колос. 1978. 278 с.

10. *Богомолов О. В., Токолов Ю. І., Зінченко М. О.* Патент на корисну модель № 57958 Україна, B07B 13/00. Пристрій для розподілу для зернових матеріалів за пружними властивостями; заявник і патентовласник Харківський національний технічний університет сільського господарства. № —u200203187; заявлено 07.03.2002; опубліковано 15.07.2003. Бюл. № 7.

11. *Ольшанський В. П.* Про взаємодію важкого твердого тіла з пружним півпростором. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Серія: сучасні напрями технології та механізації процесів переробних та харчових виробництв. 2018. Вип. 194. С. 38–46.

12. *Заика П. М., Мазоренко Д. И., Завгородний А. И.* Периодический режим движения материальной точки между двумя криволинейными поверхностями. Сб. науч. тр. МИИСП. Серия: совершенствование рабочих органов сельскохозяйственных машин. Москва. 1977. Вып. 2. С. 12–20.

13. *Кобринский А. Е., Кобринский А. А.* Виброударные системы. Москва. Наука, 1973. 252 с.

14. *Hashem Alkhaldi*. Contact Investigation of Granular Mechanical Media in Tumbling Sorting Machine. Institut Fur Technische Und Numerische Mechanik Der Universitat Stuttgart. 2007. 122 p.

15. *Luding S.* Collisions and Contacts two Particles, Physics of Dry Granular Media. E350-NATO ASI series, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers. 1998. P. 285-314.

16. *Muth B., Eberhard P., Luding S.* Contact Simulation for Many Particles Considering. Mechanics Dased Design of Structures and Machines. 2003. Vol. 31. No. 3. P. 433-457.

References

1. *Lazarevich V. P.* The use of rapeseed in the diets of cows. Bulletin of Agricultural Science. 2012. № 5. P. 29–31.

2. *Zhukovsky O. M.* Waste of rapeseed processing in animal feed. Livestock of Ukraine. 2007. № 3. P. 32–34.

3. *Ptitsyn S. D.* Separation of grain at impact. Proceedings of VIM. 1949. Vol. 12, P. 79–84.

4. *Bobrov S. F.* Separation of grain according to the principle of elasticity and dependence on the angle of inclination of reflective tiles. Scientific. notes of the Kherson Agricultural Institute. Kiev: USKHA, 1959. Issue. 8, P.127–136.

5. *Shukurov S. A.* Resistance of soybean seeds by elastic properties: author. dis. for the degree of Cand. tech. Sciences 05.20.01. Novosibirsk Institute of Agricultural Mechanization. Novosibirsk, 1984. 19 p.

6. *Filinkov N. I.* Fiziko-mekhanicheskie osnovy separation of grain mass by moisture using the elastic deformation method. Proceedings of the All-Russian Research Institute of Leguminous Crops. 1968. T. 2. P. 319–333.

7. *Bogomolov A. V.* Separation of hard-to-separate loose mixtures. Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture. 2013. P. 303–308.

8. *Vasiliev A. M.* A new mode of vibrational motion of a particle on the corrugated surface of separating machines. Storage and processing of agricultural raw materials. 2012. № 12. P. 16–18.

9. *Zaika P. M., Maznev G. E.* Separation of seeds by a complex of physical and mechanical properties. Moscow. Ear. 1978. 278 p.

10. *Bogomolov O. V., Tokolov Y. I., Zinchenko M. O.* Patent for utility model № 57958 Ukraine, B07B 13/00. Distribution device for grain materials by elastic properties; applicant and patent owner Kharkiv National Technical University of Agriculture. № u200203187; filed 07.03.2002; published 15.07.2003. Bull. № 7.

11. *Olshansky V. P.* On the interaction of a heavy solid with an elastic half-space. Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture. Series: modern directions of technology and mechanization of processes of processing and food productions. 2018. Vip. 194. P. 38–46.

12. *Zaika P. M., Mazorenko D. I., Zavgorodniy A. I.* Periodic regime of motion of a material point between two curvilinear surfaces. Sat. scientific. tr. MIISP. Series: improving the working bodies of agricultural machines. Moscow. 1977. Issue. 2. P. 12–20.

13. *Kobrinsky A. E., Kobrinsky A. A.* Vibroimpact systems. Moscow. Nauka, 1973. 252 p.

14. *Hashem Alkhaldi*. Contact Investigation of Granular Mechanical Media in Tumbling Sorting Machine. Institut Fur Technische Und Numerische Mechanik Der Universitat Stuttgart. 2007. 122 p.

15. *Luding S.* Collisions and Contacts two Particles, Physics of Dry Granular Media. E350-NATO ASI series, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers. 1998. P. 285-314.

16. *Muth B., Eberhard P., Luding S.* Contact Simulation for Many Particles Considering. Mechanics Dased Design of Structures and Machines. 2003. Vol. 31. No. 3. P. 433-457.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЕПАРАЦИИ СЕМЯН РАПСА СЕПАРАТОРОМ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

Н. В. Брагинец, В. Т. Дмытрив, В. С. Хмелевский, А. В. Богомолов, А. А. Богомолов

Аннотация. Рассмотрены вопросы использования семян на корм в животноводстве и его подготовка в технологической линии, путем очистки семян от трудноотделяемых семян сорных растений. Установлено, что на пневмо-решетных сепараторах общего назначения, которые, как правило, используют для очистки семян, удаляется значительное количество семян сорняков минеральных и органических примесей, но полностью удалить трудноотделяемых семена, таких сорняков как, например: мышиный, куриное просо, подмаренник цепкий и других, не удается.

Приведенные данные об использовании продуктов переработки семян рапса на корм свиньям и крупному рогатому скоту, например, рапсовый жмых, используется в составе комбикормов, позволяет повысить продуктивность коров и снизить потери труда на одну единицу продукции до 5 ... 14%.

Предложено проводить очистку семян от трудноотделяемых примесей с помощью многоярусного сепаратора ударного действия.

В статье проведено моделирование процесса сепарации семян сепаратором ударного действия. Рассмотрено движение частицы идеализированной в виде материальной точки при соударения ее с наклонными, в продольном и поперечном направлениях, деками сепаратора ударного действия.

Рассчитана теоретическая производительность сепаратора ударного действия, которая составляет 8 ... 30 кг/ч. для одного модуля. Проведенные исследования позволили определить конструктивные параметры многоярусного ударного сепаратора и рассчитать его производительность.

Ключевые слова: семена, рапс, сепарация, жмых, шрот, моделирование, удар.

MODELING OF PROCESS OF SEPARATION OF RAPPINE SEEDS BY SHOCK SEPARATOR

M. V. Braginets, V. T. Dmutriv, V. S. Khmelovskyi, O. V. Bogomolov, O. O. Bogomolov

Abstract. The questions of the use of seeds for fodder in animal husbandry and its preparation in the technological line by cleaning seeds from hard-to-separate seeds of weeds are considered. It has been established that general-purpose pneumatic sieve separators, which are usually used for cleaning seeds, remove a significant amount of weed seeds, mineral and organic impurities, but completely remove hard-to-separate seeds, such weeds as, for example: mice, chicken millet, tenacious bedstraw and others fail.

The given data on the use of rapeseed processing

products for feed for pigs and cattle, for example, rapeseed cake, is used as part of compound feed, it can increase the productivity of cows and reduce labor losses per unit of production up to 5 ... 14%. It is proposed to purify seeds from difficult-to-separate impurities using a multi-tiered impact separator.

The article presents the modeling of the process of separation of seeds by a percussion separator. The motion of a particle idealized in the form of a material point when it collides with inclined, in the longitudinal and transverse directions, decks of the impact separator is considered.

The theoretical productivity of the impact separator is calculated, which is 8 ... 30 kg / h. for one module. The studies carried out made it possible to determine the design parameters of the multi-tiered impact separator and calculate its performance.

Key words: seeds, rapeseed, separation, cake, meal, modeling, blow.

М. В. Брагінець ORCID 0000-0002-2135-9165.
В. Т. Дмитрів ORCID 0000-0001-9361-6418.
В. С. Хмельовський ORCID 0000-0002-6018-8821.
О. В. Богомолов ORCID 0000-0002-1531-7030.
О. О. Богомолов ORCID 0000-0001-8297-2708.