

УДК 631.171: 633.85

© В.В. Шевчук, к.т.н.

Львівський національний аграрний університет

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМОДІЇ ВАЛЬЦЬОВОГО РОБОЧОГО ОРГАНА З НАСІННЯМ ОЛІЙНИХ КУЛЬТУР

Розроблена динамічна модель взаємодії вальцьового робочого органа з насінням олійних культур відображає умову їх захоплення валками, залежність діаметра валків від зазору між ними, а також закономірності зміни продуктивності плющилки й споживаної нею потужності.

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ, ПЛЮЩИЛКА НАСІННЯ, ДІАМЕТР ВАЛКІВ, ЗАЗОР, ОЛІЙНІ КУЛЬТУРИ, ПРОДУКТИВНІСТЬ, СПОЖИВАНА ПОТУЖНІСТЬ.

Постановка проблеми. Перспективи розвитку технологій виробництва олії на сучасному етапі тісно пов'язані, насамперед, з удосконаленням найбільш енерго- та матеріаломістких технологічних процесів. Різноманітність й специфічність фізико-механічних властивостей олійних культур зумовлюють необхідність розробки значної кількості різних конструкцій машин і схем переробки даних культур [1].

Подрібнення насіння – одна з основних технологічних операцій процесу отримання олії, від якої залежать її вихід та якість [2, 3]. Проблема удосконалення машин для роздавлювання ядра олійних культур і створення технологічних ліній малої продуктивності набуває для України істотного значення й актуальності, оскільки сучасні способи і засоби роздавлювання насіння недостатньо ефективні та потребують подальшого дослідження й удосконалення [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На основі аналізу теоретичних досліджень процесу подрібнення насіння олійних культур перед відтисканням олії [2, 3], варто відмітити, що відомі дослідження спрямовані на визначення: умови захоплення насінин між валками; діаметра валків; тиску, необхідного для подрібнення насінин. Проте не досліджувались дані параметри з урахуванням динаміки руху насінин між валками.

Тому виникає необхідність дослідити динамічну модель взаємодії вальцьового робочого органа з насінням олійних культур, що дозволить встановити закономірності зміни продуктивності плющилки й споживаної нею потужності від частоти обертання валків.

Мета дослідження. Розробити динамічну модель взаємодії вальцевого робочого органа з насінням олійних культур та встановити закономірності зміни продуктивності плющилки й споживаної нею потужності від частоти обертання валків.

Результати дослідження. Одним із показників, що характеризує умову захоплення насінин валками плющильного механізму, є їх діаметр D (рис. 1).

У початковому положенні (рис. 1), коли насінина ще практично не деформується, на неї діє сила P , зумовлена силою тяжіння самої насінини, а також сумарною дією на неї з боку інших насінин. Крім того, зі сторони вальців діють нормальні реакції N і сили тертя T .

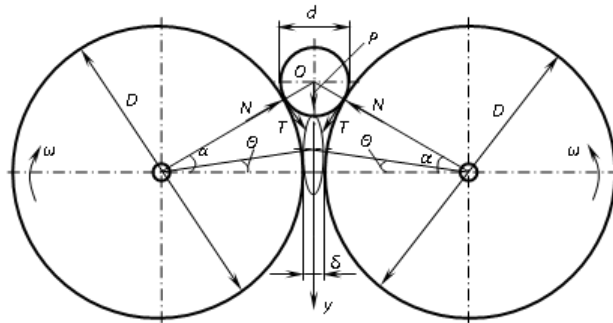


Рис. 1 – Розрахункова схема взаємодії насінини з валками

У початковий момент часу швидкість центра мас насінин дорівнює нулю. Далі насінина розганяється, поки швидкість її центра мас V_c не зрівнюється з проекцією на вертикаль швидкості точок ободу валка (рис. 1), тобто:

$$V_c = \omega \cdot \frac{D}{2} \cos \Theta. \quad (1)$$

де Θ – біжучий кут.

Запишемо диференціальне рівняння руху центра мас насінини:

$$m \frac{d^2 y_c}{dt^2} = P + 2T \cos \Theta - 2N \sin \Theta, \quad (2)$$

де m – маса насінини; y_c – вертикальне переміщення її центра мас; P – сила, що діє на насінину і зумовлена силою тяжіння самої насінини, а також сумарною дією на неї з боку інших насінин; $T = fN$ – максимальне значення сили тертя.

Переміщення y_c можна виразити через змінний кут Θ , а саме:

$$y_c = \frac{D + \delta}{2} (tg \alpha - tg \Theta), \quad (3)$$

де α – кут захоплення.

Звідки:

$$tg \Theta = tg \alpha - \frac{2y_c}{D + \delta}, \quad (4)$$

де δ – зазор між валками, мм.

Сила P_c , яка стискає насініну, дорівнює проекції сил T і N на горизонталь, тобто:

$$P_c = T \sin \Theta + N \cos \Theta = N(f \sin \Theta + \cos \Theta). \quad (5)$$

З іншого боку сила P_c пропорційна деформації насініни Δ_n :

$$P_c = c_n \Delta_n, \quad (6)$$

де c_n – жорсткість насініни.

$$\Delta_n \approx (D + d) \cdot (\cos \Theta - \cos \alpha).$$

Тоді з формули (5) нормальну реакцію N можна подати так:

$$N = \frac{c_n (D + d) (\cos \Theta - \cos \alpha)}{f \sin \Theta + \cos \Theta}. \quad (7)$$

Підставивши в рівняння (2) вираз (7), одержимо:

$$m \frac{d^2 y_c}{dt^2} = P + 2 \frac{c_n (D + d) (\cos \Theta - \cos \alpha) (f - tg \Theta)}{(f tg \Theta + 1)}. \quad (8)$$

Якщо в рівняння (8) замість $tg \Theta$ підставити вираз (4) і утримати члени $\left(\frac{2y_c}{D + \delta}\right)$ тільки у першій степені, а вищими степенями знехтувати, як величинами вищого порядку малості, то одержимо лінійне диференціальне рівняння:

$$m \frac{d^2 y_c}{dt^2} = P + \frac{4c_n (D + d) (f - tg \alpha) \cdot (1 - f tg \alpha)}{(D + d)} y_c. \quad (9)$$

Розв'язок цього диференціального рівняння можна подати як суму загального розв'язку однорідного рівняння і часткового розв'язку неоднорідного рівняння:

$$y_c = A_1 e^{nt} + A_2 e^{-nt} - \frac{P}{k}, \quad (10)$$

$$\text{де } k = \frac{4c_n (D + d) \cdot (f - tg \alpha) \cdot (1 - f \cdot tg \alpha)}{(D + d)}; \quad n = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Довільні постійні визначаємо з початкових умов:

$$\begin{cases} t = 0; \\ y_c = 0; \\ \frac{dy_c}{dt} = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Знайдемо похідну:

$$\frac{dy_c}{dt} = nA_1 e^{nt} - nA_2 e^{-nt}. \quad (12)$$

Тоді на основі умови (11) одержуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} A_1 + A_2 - \frac{P}{k} = 0; \\ A_1 - A_2 = 0. \end{cases} \quad (13)$$

Звідки знаходимо $A_1 = A_2 = \frac{P}{2k}$.

Отже,

$$\begin{cases} y_c = \frac{P}{2k} (e^{nt} + e^{-nt} - 2) = \frac{P}{k} (ch(nt) - 1); \\ \frac{dy_c}{dt} = \frac{Pn}{2k} (e^{nt} - e^{-nt}) = \frac{P}{k} sh(nt). \end{cases} \quad (14)$$

$$\frac{P}{k} sh(nt_1) = \frac{D}{d} \omega \cos \Theta. \quad (15)$$

Тоді з рівнянь (15) і (14) можна знайти момент часу t_1 , коли швидкості валка і насінини вирівнюються.

Надалі, коли $t \geq t_1$, швидкість центра мас:

$$\begin{cases} V_c = \frac{D}{2} \omega \cos(\Theta - \omega(t - t_1)); \\ y_c(t_1) \leq y_c \leq \frac{D + \delta}{2} tg \alpha. \end{cases} \quad (16)$$

Відповідно час руху центра мас насінини (час плющення):

$$t_2 = t_1 + \Theta / \omega. \quad (17)$$

Оскільки в диференціальне рівняння (8) час t в явній формі не входить, то можна понизити порядок цього рівняння, а саме:

$$\frac{d^2 y_c}{dt^2} = \frac{d \dot{y}_c}{dt} = \frac{d \dot{y}_c}{dy_c} \cdot \frac{dy_c}{dt} = \frac{1}{2} \frac{d(\dot{y}_c)^2}{dy_c} = - \frac{d(y_c^2)}{(D + \delta) \cdot d(tg \Theta)}. \quad (18)$$

Підставляємо (18) в рівняння (8), відокремлюємо змінні і проводимо інтегрування:

$$m \int_0^{y_c} d(\dot{y}_c) = (D + \delta) \int_{\Theta}^{\alpha} \left(P + 2 \frac{(D + d)c_n (\cos \Theta - \cos \alpha) (f - tg \Theta)}{(ftg \Theta + 1)} dtg \Theta \right). \quad (19)$$

Якщо прийняти, що $\cos\Theta - \cos\alpha \approx \frac{1}{2}(tg^2\alpha - tg^2\Theta)$, то праву частину можна легко проінтегрувати:

$$m \dot{y}_c^2 = H(f \cdot tg\alpha) - H(f \cdot tg\Theta), \quad (20)$$

Функція H має такий вигляд:

$$H(x) = Apx + \frac{c_n(D+\delta)}{f^3} \left(ab \ln(1+x) + (a-b-1)x - \frac{bx^2}{2} + \frac{x^3}{3} \right), \quad (21)$$

де $A = \frac{D+\delta}{f \cdot 1000}$; $a = f^2 tg^2\alpha - 1$; $b = f^2 + 1$; $B = \frac{c_n(D+\delta)}{f^3}$.

Кут Θ , за якого швидкість насінини $V_c = \frac{D}{2} \omega \cos \frac{\Theta}{1000}$ дорівнює проекції швидкості обода валка на вертикаль, визначаємо з рівняння:

$$\frac{D}{2000} \omega \cos\Theta = \sqrt{\frac{H(f tg\alpha) - H(f tg\Theta)}{m}}. \quad (22)$$

Оскільки

$$\frac{dy_c}{dt} = \sqrt{\frac{H(f tg\alpha) - H(f tg\Theta)}{m}}, \quad (23)$$

крім того, $d(tg\Theta) = -\frac{2dy_c}{(D+\delta) \cdot 10^{-3}}$, тобто

$$dy_c = -\frac{D+\delta}{2000} \cdot \frac{d\Theta}{\cos^2\Theta}. \quad (24)$$

Звідки час t_1 , за який швидкість насінини вирівнюється зі швидкістю валка, становить:

$$t_1 = \frac{(D+\delta)}{2000} \int_{\Theta_1 \cos^2\Theta}^{\alpha} \frac{d\Theta}{\sqrt{\frac{H(f \cdot tg\alpha) - H(f \cdot tg\Theta)}{m}}}. \quad (25)$$

Цей інтеграл визначаємо чисельним методом трапецій. При заданих значеннях параметрів [4, 5] ($D = 55$ мм, $\delta = 1,26$ мм, $f = 0,3$, $\alpha = 25^\circ$) час, за який швидкість насінини вирівнюється зі швидкістю валка, становить $1,32 \cdot 10^{-5}$ с.

Відповідно час руху центра мас насінини (час плющення):

$$t_2 = t_1 + \Theta/\omega. \quad (26)$$

Продуктивність плющилки можна обчислити за формулою:

$$Q_{pi} = \eta \cdot \delta \cdot l \cdot \omega \cdot D/2 \cdot \rho, \quad (27)$$

де η – коефіцієнт заповнення міжвалкового простору; ρ – густина насіння.

На основі виразу (27) з використанням програмного забезпечення MATLAB 7.11.0 отримано залежності (рис. 2) продуктивності Q_{nl} плющилки насіння олійних культур від частоти обертання n валків. Вихідні значення параметрів [4, 5]: коефіцієнт заповнення міжвалкового простору $\eta = 0,8$; зазор δ між валками (мм) – 1,26 – для озимого ріпаку, 0,95 – гірчиці сизої, 1,51 – гірчиці білої, 1,59 – редьки олійної й льону олійного – 0,695; довжина валків $l = 235$ мм, частота їх обертання $n = 10\text{--}60$ хв⁻¹ та діаметр $D = 55$ мм; густина насіння ρ (г/мм³) – 0,7 – для озимого ріпаку; 0,72 – гірчиці сизої й гірчиці білої; 0,75 – редьки олійної й льону олійного – 0,6.

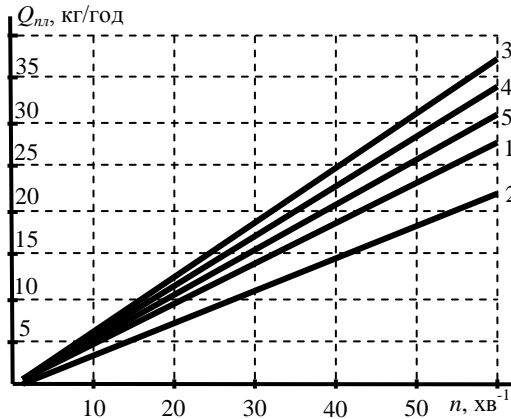


Рис. 2 – Залежності продуктивності Q_{nl} плющилки від частоти обертання n валків: 1 – озимий ріпак; 2 – гірчиця сиза; 3 – гірчиця біла; 4 – редька олійна; 5 – льон олійний

Згідно з отриманими залежностями зі збільшенням частоти зростає продуктивність плющилки. Так, у діапазоні частот обертання валків 10–60 хв⁻¹ продуктивність (кг/год) становить: 5–27 – для насіння озимого ріпаку; 3–22 – гірчиці сизої; 6–37 – гірчиці білої; 5–34 – редьки олійної й 5–31 – льону олійного.

Тоді, потужність N_o , що необхідна для плющення потоку насіння і відповідає продуктивності Q_{nl} :

$$N_o = A_o \cdot Q_{nl} = \frac{A \cdot \eta \cdot \delta \cdot l \cdot \omega \cdot D \cdot \rho}{2m} \quad (28)$$

Крім того, ще необхідно врахувати потужність для подолання сил тертя в підшипниках, потужність для зміни швидкості руху плющильного механізму й потоку насіння. Потужність N_1 , що

затрачається на зміну кутової швидкості ланок плющильного робочого органа, становить:

$$N_1 = \frac{1}{t_1} \sum_{i=1}^k \frac{J_i \omega_i^2}{2}, \quad (29)$$

де t_1 – час розгону потоку насіння; k – кількість ланок, що здійснюють обертовий рух; J_i – осьові моменти інерції ланок; ω_i – кутові швидкості ланок.

Щоб надати масі потоку насіння швидкості $v = \omega \cdot D/2$, необхідна потужність N_2 :

$$N_2 = \frac{1}{8} \omega^2 D^2 Q_{nl}, \text{ Вт.} \quad (30)$$

Потужність N_3 , необхідна для подолання сил тертя в підшипниках:

$$N_3 = \sum_{i=1}^n (T_i k_i \omega_i), \quad (31)$$

де n – кількість підшипників; T_i – нормальні реакції в підшипниках; k_i – коефіцієнт тертя кочення.

Споживана плющильною потужність становить:

$$N_{nl} = N_0 + N_1 + N_2 + N_3. \quad (32)$$

На основі виразу (28–32) отримано залежність (рис. 3) споживаної потужності N_{nl} плющилки насіння олійних культур від частоти обертання n валків. Розрахункові дані [4, 5]: $\eta = 0,8$; δ (мм) – 1,26 – для озимого ріпаку, 0,95 – гірчиці сизої, 1,51 – гірчиці білої, 1,59 – редьки олійної й льону олійного – 0,695; $l = 235$ мм; $n = 10$ –60 хв^{-1} ; $D = 55$ мм; ρ (г/мм^3) – 0,7 – для озимого ріпаку, 0,72 – гірчиці сизої та білої, 0,75 – редьки олійної й льону олійного – 0,6; маса тисячі насінин m_{1000} (г) – 0,0032 – для озимого ріпаку, 0,0044 – гірчиці сизої й гірчиці білої, 0,01 – редьки олійної й льону олійного – 0,0038.

Найбільша потужність споживається (рис. 3) при роздавлюванні насінин льону олійного – 0,89 кВт. Для інших олійних культур споживана потужність відповідно становить (кВт): 0,53 – для насіння озимого ріпаку; 0,25 – гірчиці сизої; 0,39 – гірчиці білої; 0,34 – редьки олійної.

Висновки. Розроблена динамічна модель взаємодії вальцьового робочого органа з насінинами олійних культур відображає закономірності зміни продуктивності плющилки й споживаної нею потужності від частоти обертання валків.

На основі виразів (27) й (32) отримано залежності продуктивності Q_{nl} й споживаної потужності N_{nl} плющилки насіння

олійних культур від частоти обертання n валків. Продуктивність Q_{nl} (кг/год) вальцевої площилки становить: 5–27 – для насіння озимого ріпаку, 3–22 – гірчиці сизої, 6–37 – гірчиці білої, 5–34 – редьки олійної й 5–31 – льону олійного; споживана потужність N_{nl} (кВт), відповідно: 0,1–0,53; 0,05–0,25; 0,08–0,39; 0,07–0,34 та 0,15–0,89 у діапазоні частот обертання валків 10–60 хв^{-1} .

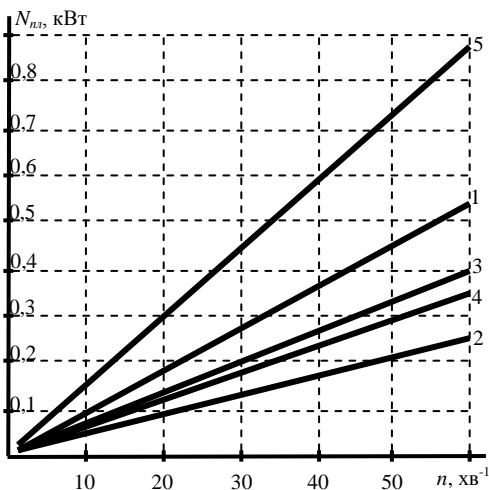


Рис. 3 – Залежності споживаної потужності N_{nl} від частоти n обертання валків: 1 – озимий ріпак; 2 – гірчиця сиза; 3 – гірчиця біла; 4 – редька олійна; 5 – льон олійний

Література

1. Шевчук Р.С. Комплекс обладнання для отримання рослинної олії в малих переробних цехах / Р.С. Шевчук, В.О. Василькевич, В.В. Шевчук, В.В. Том'юк // Техніка і технології в АПК. – 2011. – № 9 (24). – С. 11–13.
2. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв: навч. посібник / [Дацишин О. В., Ткачук А. І., Гвоздев О.В. та ін.]; за заг. ред. О.В. Дацишина. – Вінниця: Нова Книга, 2009. – 488 с.
3. Процеси та апарати харчових виробництв: підручник / [А.М. Поперечний, О.І. Черевко, В.Б. Гаркуша та ін.]; за ред. А.М. Поперечного. – К.: Центр учбової літератури, 2007. – 304 с.
4. Шевчук В.В. Дослідження механіко-технологічних властивостей насіння олійних культур / В.В. Шевчук // Сільськогосподарські

машини: Зб. наук. ст. – Вип. 21. – Том II. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2011. – С. 229–237.

5. Шевчук Р.С. Механічні властивості насіння олійних культур під час стиску / Р.С. Шевчук, В.В. Шевчук // Вісник Львівського національного аграрного університету : агроінженерні дослідження. – Львів: Львів. нац. аграр. ун-т, 2011. – №15. – С. 257–264.

Рецензент д.т.н., проф. В.Ф. Дідух