

УДК 631.358:633.521

А.В.Хомич, І.М. Дударев

Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СТРУШУВАЧА СТРІЧКИ СТЕБЕЛ ЛЬОНУ

У статті досліджено процес струшування стрічки стебел льону після обмолочування. Отримано аналітичні залежності, що дозволяють встановити траєкторії руху насіннєвого вороху льону та вільного кінця стебел у стрічці, а також обґрунтувати конструктивні параметри струшувача. Ключові слова: струшувач, стрічка стебел, льон, коливання, траєкторія руху.

Постановка проблеми. Сталий розвиток текстильної промисловості, а, відповідно, легкої промисловості, неможливий без її забезпечення дешевою та якісною натуральною сировиною вітчизняного виробництва. Такою сировиною є волокно, що одержане з льону-довгунця та олійного льону. Дослідні роботи науковців спрямовані на розробку та впровадження у виробництво нових технологій збирання та переробки цих культур, а також засобів для їх реалізації, що дозволили б підвищити рентабельність виробництва льону. Тому дослідження у цьому напрямку є надзвичайно актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед проблемних питань у технології збирання та первинної переробки льону (льону-довгунця та олійного льону), над якими працюють науковці, є удосконалення конструкції пристроїв для обмолочування стрічки льону. Це пов'язано з тим, що під час обмолочування необхідно забезпечити збереження без пошкоджень як насіннєвої частини врожаю, так і стеблової. Відомі конструкції пристроїв для обмолочування льону мають низку недоліків [1,2], усунути які можна шляхом розробки нової конструкції універсального молотильного пристрою для льону-довгунця та олійного льону, а також дослідження його роботи.

Мета досліджень – дослідження роботи струшувача стебел стрічки льону.

Результати досліджень. Для обмолочування стрічки олійного льону та льону-довгунця пропонується використовувати пристрій, що представлений на рис. 1. Пристрій містить затискні транспортери, дисковий затискний транспортер, підвідний стіл, молотильний барабан, струшувач, накопичувач та вивантажувальний транспортер.

Розглянемо процес взаємодії стрічки стебел льону з робочим органом струшувача. Прийmemo наступні припущення: стрічка утворена паралельно розміщеними стеблами однакової довжини та діаметра; у стрічці відсутня розтягнутість стебел та їх перекис; нехтуємо силами зчеплення між стеблами; нехтуємо коливаннями стебел у стрічці, що виникають в результаті коливань віток затискного транспортера. Дослідимо переміщення вільного кінця стебла під час дії на нього лопаті струшувача. Нехай стебло, що переміщується затискним транспортером, у початковий момент контакту з лопаткою струшувача знаходиться в горизонтальному положенні (рис. 2 а). Для визначення максимального значення кута β_{\max} відхилення вільної частини стебла довжиною $AB = AD = l$, скористаємося теоремою косинусів:

$$OD^2 = AD^2 + AO^2 - 2AD \cdot AO \cdot \cos \beta_{\max}. \quad (1)$$

Оскільки $OD = r$, $AO = AB - BC + OC = l - l_k + r$ (де r – довжина лопаті струшувача, м; l_k – початкова (максимальна) довжина ділянки контакту лопаті струшувача з стеблом (стрічкою), що приймається з врахуванням довжини суцвіття, м), тоді після підстановки значень у вираз (1) та проведення перетворень, отримаємо:

$$\beta_{\max} = \arccos \left(1 + \frac{l_k(l_k - 2r)}{2l(l - l_k + r)} \right). \quad (2)$$

Значення максимального кута відхилення вільної частини стебла від початкового горизонтального положення не має перевищувати значення кута згину стебла β_z , тобто має виконуватися умова:

$$\beta_{\max} < \beta_z. \quad (3)$$

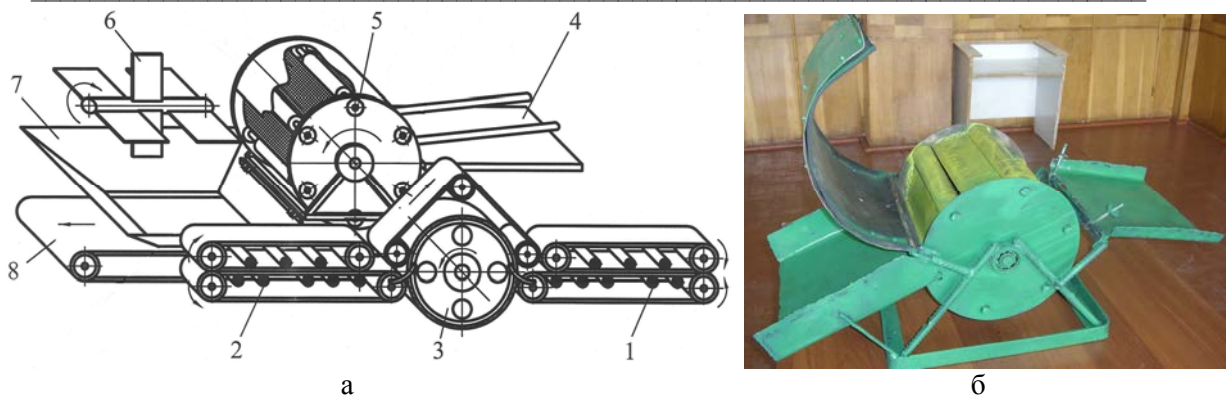


Рис. 1. Пристрій для обмолочування стрічки льону: а – схема пристрою (1, 2 – затискні транспортери; 3 – дисковий затискний транспортер; 4 – підвідний стіл; 5 – молотильний барабан; 6 – струшувач; 7 – накопичувач; 8 – вивантажувальний транспортер); б – молотильний барабан

З виразу (2) можна отримати залежність, що дозволяє визначити довжину лопаті струшувача:

$$r = \frac{l(l-l_k)(1-\cos \beta_{\max}) + l_k^2 / 2}{l_k - l(1-\cos \beta_{\max})}. \quad (4)$$

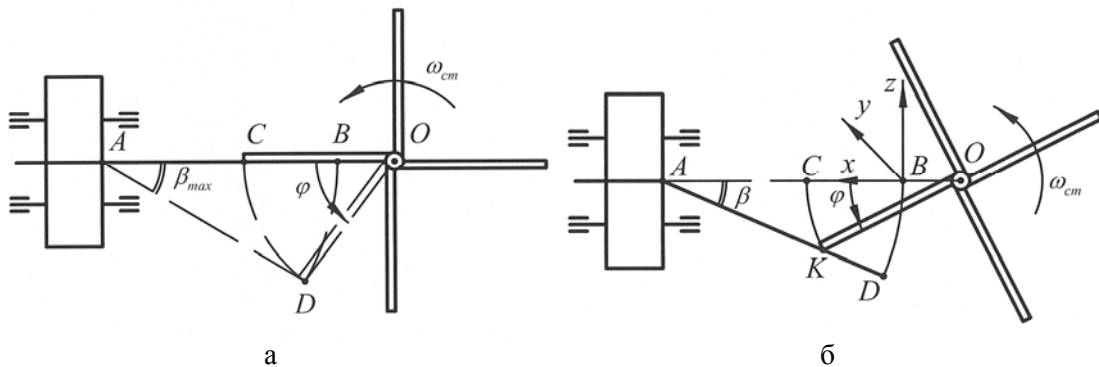


Рис. 2. Розрахункова схема: а – до визначення кута β_{\max} ; б – до дослідження дії струшувача на стебло

Визначимо ширину лопаті струшувача h_{cm} , яка б забезпечувала створення сприятливих умов для очищення стрічки від залишків насінневого вороху льону. Припустимо, що стебло під час переміщення затискним транспортером не відхиляється в горизонтальній площині від свого початкового положення. За теоремою синусів з трикутника ΔAOD матимемо (рис. 2 а):

$$\varphi = \varphi_0 = \arcsin(l \sin \beta_{\max} / r), \quad (5)$$

де φ – кут повороту лопаті струшувача, рад.; φ_0 – кут повороту лопаті струшувача за якого лопать досягає вільного кінця стебла (точка D), рад.

З іншої сторони $\varphi_0 = \omega_{cm} t_D$ (де ω_{cm} – кутова швидкість обертання струшувача, c^{-1} ; t_D – час, за який кінець лопаті досягне верхівки стебла (точка D), с), звідки $t_D = \varphi_0 / \omega_{cm}$. Для того, щоб відбулося струшування залишків насінневого вороху зі стрічки, необхідно, щоб за час t_D стрічка пройшла шлях, що менший за ширину лопаті h_{cm} . В іншому випадку насінневий ворох залишиться на стрічці стебел льону, оскільки стрічка вийде із зони дії лопаті. Враховуючи зазначене, отримаємо умову:

$$h_{cm} \geq V_{mp} t_D, \quad (6)$$

де V_{mp} – лінійна швидкість руху затискного транспортера (швидкість стрічки льону), м/с.

Дослідимо переміщення вільного кінця стебла у зоні дії на нього лопаті струшувача. Розмістимо початок відліку нерухокої системи координат xuz у точці B (рис. 2 б), що визначає

положення вільного кінця стебла у початковий момент його контакту з лопаткою. Вісь x спрямуємо горизонтально вздовж стебла у початковому положенні у напрямку до затискного транспортера. Вісь y спрямуємо у горизонтальній площині вздовж затискного транспортера у напрямку руху стрічки стебел. Вісь z спрямуємо вертикально вгору. Для випадку, що розглядається, рівняння руху вільного кінця стебла (точка D) мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} x &= l(1 - \sqrt{1 - \sin^2 \beta}); \\ y &= V_{mp}t; \\ z &= -l \sin \beta, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

де β – кут відхилення вільної частини стебла від початкового горизонтального положення, град.;
 t – час, с.

За теоремою синусів з трикутника ΔAOK матимемо:

$$\sin \beta = r \sin \varphi / AK. \quad (8)$$

Визначимо AK за теоремою косинусів:

$$AK^2 = AO^2 + KO^2 - 2AO \cdot KO \cdot \cos \varphi,$$

звідки

$$AK = \sqrt{(l - l_k + r)^2 + r^2 - 2(l - l_k + r)r \cos \varphi}. \quad (9)$$

Після підстановки виразу (9) у залежність (8) та враховуючи, що $\varphi = \omega_{cm}t$, отримаємо:

$$\sin \beta = \frac{r \sin(\omega_{cm}t)}{\sqrt{(l - l_k + r)^2 + r^2 - 2(l - l_k + r)r \cos(\omega_{cm}t)}}. \quad (10)$$

Траєкторія руху вільного кінця стебла під час дії на нього лопаті струшувача, побудована за рівняннями (7), представлена на рис. 3 а.

Після того, як стебло льону звільняється від дії лопаті струшувача, воно здійснює згасаючі гармонічні коливання. Розмістимо початок відліку нерухомої системи координат xuz у точці B (рис. 2 б), що розміщена на відстані l від затискного транспортера у горизонтальній площині руху стрічки льону. Вісь x спрямуємо горизонтально вздовж стебла у початковому положенні у напрямку до затискного транспортера. Вісь y спрямуємо у горизонтальній площині вздовж затискного транспортера у напрямку руху стрічки стебел. Вісь z спрямуємо вертикально вгору. Для випадку, що розглядається, рівняння руху вільного кінця стебла (приймавши, що вага Q вільної частини стебла зосереджена у точці D) в проекції на вісь z має вигляд:

$$\frac{d^2z}{dt^2} + 2h \frac{dz}{dt} + k^2z = 0, \quad (11)$$

де h – коефіцієнт, що характеризує властивості середовища з опором, c^{-1} ; $k = \sqrt{g / \delta_c}$ – колова частота власних коливань стебла, c^{-1} ; g – прискорення вільного падіння, m/c^2 ; δ_c – статичний прогин стебла під дією власної ваги, що зосереджена в точці D , м.

Загальний розв'язок диференціального рівняння (11) у випадку малого опору середовища ($h \ll k$) має вигляд [3]:

$$z = e^{-ht} (c_1 \sin(k^*t) + c_2 \cos(k^*t)), \quad (12)$$

де c_1 та c_2 – сталі інтегрування; $k^* = \sqrt{k^2 - h^2}$ – колова частота згасаючих коливань, c^{-1} .

Ввівши нові сталі A і α , що пов'язані з довільними сталими c_1 та c_2 виразами $c_1 = A \cos \alpha$ та $c_2 = A \sin \alpha$, тоді загальний розв'язок рівняння (11) можна записати у вигляді:

$$z = Ae^{-ht} (\cos \alpha \sin(k^*t) + \sin \alpha \cos(k^*t)), \quad (13)$$

або

$$z = Ae^{-ht} \sin(k^*t + \alpha), \quad (14)$$

де A – амплітуда вільних коливань вільного кінця стебла (точка D), м; α – початкова фаза коливань, рад.

Визначимо швидкість руху точки D , продиференціювавши рівняння (14) за часом:

$$\frac{dz}{dt} = -Ahe^{-ht} \sin(k^*t + \alpha) + Ak^*e^{-ht} \cos(k^*t + \alpha). \quad (15)$$

За початковими умовами $t = 0$, $z(0) = z_0$, $\dot{z}(0) = \dot{z}_0$ з рівнянь (14) та (15) визначимо початкову фазу α і амплітуду вільних коливань A :

$$\alpha = \arctg\left(\frac{k^*z_0}{\dot{z}_0 + hz_0}\right) \text{ та } A = \sqrt{z_0^2 + \frac{(\dot{z}_0 + hz_0)^2}{(k^*)^2}}. \quad (16)$$

За малого опору середовища для визначення періоду згасаючих коливань справедлива залежність [3]:

$$T^* = \frac{2\pi}{k^*} = \frac{2\pi}{\sqrt{k^2 - h^2}} \approx T, \quad (17)$$

де $T = 2\pi/k$ – період власних коливань вільного кінця стебла (точка D), с.

Якщо $\frac{2\pi}{k^*} \approx \frac{2\pi}{k}$, тоді можна прийняти, що $k^* = k = \sqrt{g/\delta_c}$.

Статичний прогин стебла під дією власної ваги для випадку, що розглядається, визначається наступним чином [4]:

$$\delta_c = \frac{Ql^3}{3EJ}, \quad (18)$$

де $Q = mg$ – вага вільної частини стебла, що зосереджена в точці D , Н; m – маса вільної частини стебла, кг; l – довжина вільної частини стебла, м; E – модуль пружності стебла, Па; J – момент інерції вільної частини стебла, м⁴; EJ – жорсткість стебла при згині, Н·м².

Коефіцієнт, що характеризує властивості середовища з опором, визначається за залежністю [3]:

$$h = \delta / T^*, \quad (19)$$

де $\delta = \ln(A_i / A_{i+1})$ – логарифмічний декремент коливань; A_i , A_{i+1} – суміжні амплітуди, які відрізняються за часом на T^* .

Враховуючи залежність (17) та прийняті припущення, з виразу (19) отримаємо:

$$h = \frac{\delta\sqrt{g}}{2\pi\sqrt{\delta_c}}. \quad (20)$$

Після підстановки k^* та h у залежності (16) та перетворень, отримаємо:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{1}{\sqrt{\frac{\delta_c}{g} \frac{\dot{z}_0}{z_0} + \frac{\delta}{2\pi}}}\right) \text{ та } A = \sqrt{z_0^2 + \frac{(2\pi\sqrt{\delta_c}\dot{z}_0 + \sqrt{g}\delta z_0)^2}{4\pi^2 g}}. \quad (21)$$

Після підстановки α та A у вираз (14), отримаємо розв'язок диференціального рівняння руху (11) вільного кінця стебла:

$$z = \sqrt{z_0^2 + \frac{(2\pi\sqrt{\delta_c}\dot{z}_0 + \sqrt{g}\delta z_0)^2}{4\pi^2 g}} \cdot e^{-\frac{\sqrt{g}\delta t}{2\pi\sqrt{\delta_c}}} \cdot \sin\left(t\sqrt{\frac{g}{\delta_c}} + \arctg\left(\frac{1}{\sqrt{\frac{\delta_c}{g} \frac{\dot{z}_0}{z_0} + \frac{\delta}{2\pi}}}\right)\right), \quad (22)$$

де $z_0 = -l \sin \beta_{\max}$ – початкове положення вільного кінця стебла (точка D) вздовж осі z , м; $\dot{z}_0 = V_D \cos \varphi = \omega_{cm} r \cos \varphi_0$ – початкова швидкість вільного кінця стебла вздовж осі z , м/с; $\varphi_0 = \arcsin(l \sin \beta_{\max} / r)$ – кут повороту лопаті струшувача за якого лопать досягає вільного кінця стебла (точка D), рад.

Враховуючи отримані залежності та позначивши у рівняння (22) для спрощення запису $z = z^*$, рівняння руху вільного кінця стебла після того, як стебло звільняється від дії лопаті струшувача, мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} x &= l(1 - \sqrt{1 - \sin^2(\beta)}); \\ y &= V_{mp}t; \\ z &= z^*, \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

де $\sin \beta = z^* / l$; V_{mp} – швидкість руху затискного транспортера (швидкість руху стрічки вздовж осі y), м/с.

Траєкторія руху вільного кінця стебла після того, як стебло звільняється від дії лопаті струшувача, побудована за рівняннями (23), представлена на рис. 3 б.

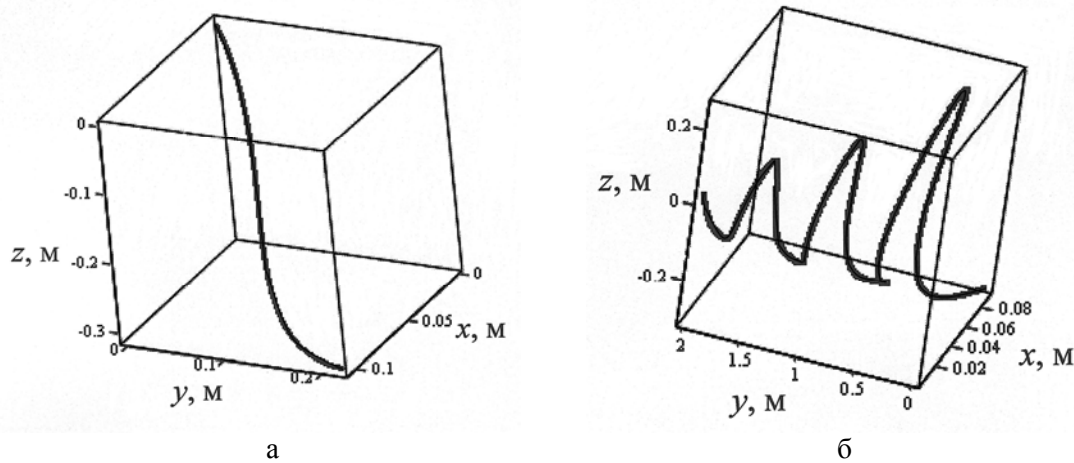


Рис. 3. Траєкторії руху вільного кінця стебла льону (при $r = 0,4$ м; $\omega_{cm} = 6$ с⁻¹; $l = 0,5$ м; $l_k = 0,25$ м; $V_{mp} = 1,5$ м/с; $m = 5 \cdot 10^{-4}$ кг; $EJ = 5 \cdot 10^{-3}$ Н·м²; $\delta = 0,4$): а – під час дії на нього лопаті струшувача ($t_D = 0,15$ с); б – після того, як стебло звільняється від дії лопаті ($t = 1,33$ с)

Встановимо залежності, що дозволяють описати траєкторію переміщення частинки насінневого вороху льону після її сходження зі стрічки внаслідок дії лопаті струшувача. Розмістимо початок відліку нерухомої системи координат $\varepsilon A \eta$ у точці A (рис. 4). Вісь ε спрямуємо перпендикулярно до напрямку руху стрічки затискним транспортером у горизонтальній площині. Вісь η спрямуємо вертикально вгору. На частинку насінневого вороху льону, що сходить із стрічки у точці D , діє сила ваги $m_n g$ (m_n – маса частинки насінневого вороху льону, кг), яка спрямована вертикально вниз; опором повітря нехтуємо. Рівняння, що описують політ частинки вороху після сходження зі стрічки, мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} m \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} &= 0; \\ m \frac{d^2 \eta}{dt^2} &= -m_n g. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Інтегруючи двічі рівняння системи (24) за початкових умов $t = 0$, $\dot{\varepsilon}(0) = V_D \sin \varphi_0$, $\dot{\eta}(0) = V_D \cos \varphi_0$, $\varepsilon(0) = l \cos \beta_{\max}$, $\eta(0) = -l \sin \beta_{\max}$ та враховуючи, що швидкість частинки вороху у точці D складає $V_D = r \omega_{cm}$, отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= l(\omega_{cm} t \sin \beta_{\max} + \cos \beta_{\max}); \\ \eta &= -\frac{gt^2}{2} + \omega_{cm} r t \sqrt{1 - \sin^2 \beta_{\max}} - l \sin \beta_{\max}. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Отримані залежності (25) дозволяють встановити траєкторію польоту частинки насінневого вороху льону, що дозволяє обґрунтувати параметри накопичувача та його розміщення відносно затискного транспортера.

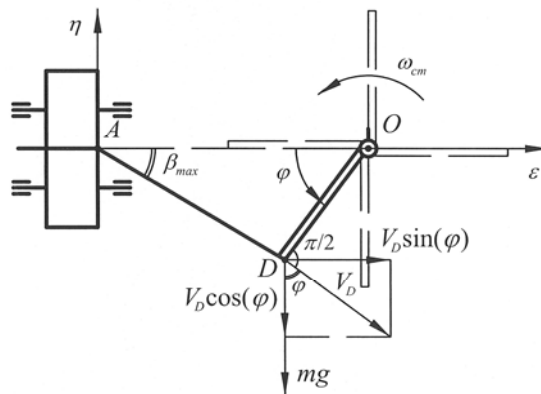


Рис. 4. Схема до визначення траєкторії переміщення частинки насінневого вороху льону

Висновки

У статті досліджено процес струшування стрічки стебел льону після обмолочування. Отримано аналітичні залежності, що дозволяють встановити траєкторії руху насінневого вороху льону та вільного кінця стебел у стрічці, а також обґрунтувати конструктивні параметри струшувача.

1. Круглень В.Е. Обоснование параметров билльного аппарата для усовершенствования процесса обмолота ленты льна / В.Е. Круглень, М.В. Левкин // Энергоресурсосберегающие технологии и технические средства для их обеспечения в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых – Минск, 2010. – С. 131-134.
2. Дударев І.М. Обґрунтування конструктивних параметрів пристрою для обмолочування стрічки льону / І.М. Дударев, А.В. Хомич // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст. – Вип. 21. – Том I. – Луцьк: Ред.-вид. відділ Луцького НТУ, 2011. – С. 123-130.
3. Бондаренко А.А. Теоретична механіка: Підручник: У 2 ч. – Ч. 2: Динаміка / А.А. Бондаренко, О.О. Дубінін, О.М. Переяславцев. – К.: Знання, 2004. – 590 с.
4. Писаренко Г.С. Опір матеріалів: Підручник / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський; За ред. Г.С. Писаренка. – 2-ге вид., допов. і переробл. – К.: Вища шк., 2004. – 655 с.
5. Хайліс Г.А. Механіка рослинних матеріалів: Навчальний посібник / Г.А. Хайліс, Ю.В. Федорусь. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛДТУ, 2004. – 302 с.