

УДК 633.521:631.172  
© 2014

**А.С. ЛІМОНТ,**  
кандидат технічних наук

**Т.Л. КОВАЛЬ,**  
кандидат фізико-математичних наук

Житомирський національний  
агроєкологічний університет  
E-mail: ecos@znau.edu.ua

## МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ СТЕБЕЛ ЛЬОНУ-ДОВГУНЦЮ ПО РОЗСТИЛАЛЬНОМУ ЩИТУ ЛЬОНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА

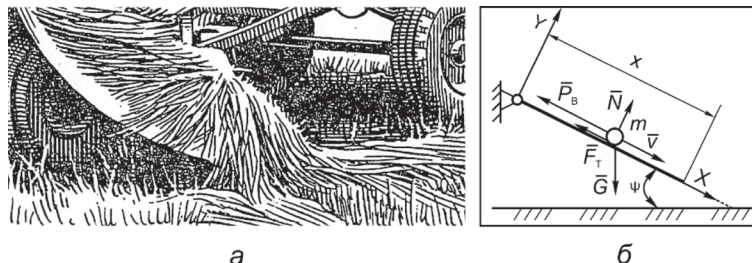
*Готування льонотрести росіяним мочінням за комбайнового збирання пов'язано з розстиланням соломи в стрічку відповідної щільності та дотриманням інших якісних показників. Якісні показники такої стрічки, крім інших регульовально-режимних параметрів комбайна і його робочих органів, залежать від швидкості сходу стебел з розстиляльного щита. Скориставшись методом Даламбера і склавши диференціальне рівняння руху стебла по площині щита та розв'язавши це рівняння, одержали залежність для розрахунку швидкості переміщення стебел по розстиляльному щиту. Для усереднених умов використання льонозбирального комбайнового агрегату визначена швидкість сходу стебел з розстиляльного щита.*

**Ключові слова:** льонозбиральний комбайн, розстиляльний щит, стебло, рух, швидкість.

Серед способів оброблення льняної соломи екологічно безпечнішим вважають росіяне мочіння. За комбайнового збирання таке мочіння відбувається в розстелених комбайном стрічках соломи на льонищі. Розстелена стрічка має відповідати певним вимогам; її якість визначають регульовальні параметри та швидкість робочих органів і поступальна швидкість комбайна. **Метою наших досліджень** передбачено з'ясувати деякі з питань формування розстеленої комбайном стрічки в проблемі механізованого збирання льону-довгунцю.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розстелена стрічка соломи має відповідати вимогам щодо щільності укладених стебел, яку переважно оцінюють їх кількістю в розрахунку на один погонний метр довжини стрічки. Для забезпечення рівномірного вилежування трести за росіяного мочіння соломи розстелена стрічка по можливості має бути однакової щільності, з відсутніми в ній розривами. Щоб належно використати машини в технологічному процесі готування рошенцевої трести і її збирання, розстелену

стрічку укладають з мінімальними розтягуванням і перекосом стебел в ній та за відсутності їх перехреснування. При цьому відповідні вимоги пред'являються й до якості очісування стебел, оскільки в противному разі це спричинить втрати насіння при бранні льону-довгунцю комбайнами, викличе низьку незручностей під час піднімання стрічки трести, формування її упаковок і первинної переробки льоносировини. Такі питання вивчали, наприклад, І.В. Баранов, М.Н. Биков, Л.П. Волков, А.Ю. Горбовий, О.Я. Дюртеєва, В.М. Климчук, М.Н. Летошнев, А.С. Маят, О.О. Налобіна, В.І. Сизов, Л.А. Сулима, Г.А. Хайліс, В.О. Шейченко, М.Н. Шрейдер, автори цього повідомлення та ін. З'ясовані вже деякі конструктивні і регульовальні параметри льонозбиральних комбайнів та узагальнені пропозиції щодо вибору їх швидкості руху. У льонозбиральних комбайнах ЛК-4Т швидкість бральних пасів становить 3,08 м/с, верхнього і середнього ланцюгів поперечного транспортера 2,25 та нижньої вітки цього ж транспортера 2,42 м/с, а швидкість пасів затискного конвеєра дорівнює 1,54 м/с [1].



**Розстилення очісаних стебел льону-довгунцю розстиляльним щитом льонозбирального комбайна:** а – реальні умови збирання;  
б – схема руху стебел по розстиляльному щиту

Приблизно з такими самими швидкостями рухаються вибрані стебла, що взаємодіють із вказаними елементами конструкції комбайнів. Поки що залишилася нез'ясованою швидкість руху стебел по розстиляльному щиту комбайна (рисунок).

Дослідження Ю.С. Ситникова [2, 3] показали, що швидкість сходу стебел зі щита  $v_{\text{щ}}$  має дорівнювати  $v_{\text{щ}} = 0,4 v_{\text{зк}}$ , де  $v_{\text{зк}}$  – швидкість виходу стебел із затискного конвеєра.

Забезпечення такого співвідношення автор вважає необхідною умовою якісної роботи розстиляльного щита (прямолинійність стрічки, перекид і перехрещування стебел, розриви в стрічці, розтягнутість і рівномірність розстилення) [2]. Найкраще розташування стебел в стрічці спостерігається за швидкості їх сходу 0,6–1,0 м/с, яка відповідає куту нахилу розстиляльного щита 20–25° щодо затискного конвеєра [3].

М.М. Ковальов і його співавтори [4] досліджували переміщення стрічки льону-довгунцю по розстиляльному щиту збиральних машин. Дослідники вказують, що переміщення рослин по розстиляльному щиту відбувається за дії сил інерції і тяжіння. Початкова швидкість стебел дорівнює швидкості, з якою вони попадають на розстиляльний щит. Щодо льонозбиральних комбайнів, то ця швидкість дорівнює швидкості пасів затискного конвеєра. У дослідях вивчали переміщення стебел, які мали початкову швидкість 2,7 м/с, що дорівнювала швидкості брального і вивідного пасів льонобралки ТЛ-1,9М [4]. Якщо швидкість збирального агрегату перевищує швидкість руху стрічки по роз-

стиляльному щиту, то сили зчеплення стебел між собою разом зі силами тертя стебел об поверхню поля “стягують” стрічку з розстиляльного щита. Якщо ж швидкість агрегату менша за швидкість стрічки льону по розстиляльному щиту, то сила тертя стебел об поверхню розстиляльного щита і сила опору повітря утримують стрічку на щиту [4]. Для збереження цілісності стрічки на полі та інших оцінних показників якості розстилення стебел швидкість у момент сходу з розстиляльного щита має приблизно дорівнювати швидкості руху збирального агрегату [4]. За рекламною інформацією виробника робоча швидкість льонозбиральних комбайнів коливається в межах 6–10–12 км/год, а за даними спостережень в реальних умовах збирання льону-довгунцю – 5–10 км/год.

Отже, з аналізу наукових літературних джерел випливає, що переміщення стебел по розстиляльному щиту комбайнів вимагає подальших досліджень.

**Мета наших досліджень** полягала у підвищенні ефективності використання льонозбиральних комбайнів шляхом з'ясування можливості поліпшення формування стрічки льоносолами для її росяного мочіння. Завдання: 1) дослідити рух стебел та отримати математичну залежність для визначення їх швидкості по розстиляльному щиту; 2) визначити для конкретних умов використання льонозбиральних агрегатів швидкість сходу стебел з розстиляльного щита.

Об'єктом дослідження був технологічний процес збирання льону-довгунцю комбайнами з оцінюванням швидкості руху вибраних і очісаних стебел по розстиляльному щиту

машини. В основу методики досліджень покладені механіко-математичні методи опису явищ, що супроводжують функціонування машин відповідного технологічного призначення, які були опрацьовані акад. П.М. Василенком [5]. Згідно з його теорією, поставлене завдання можна вирішити, зі застосуванням методу Даламбера, тобто прирівнюючи суму проєкцій прикладених до частинки переміщуваних стебел сил добутку маси досліджуваної частинки на її прискорення. У розрахунках використані результати раніше виконаних досліджень [4, 6–8].

**Результати досліджень та їх обговорення.** Розглянемо рух стебел льону-довгунцю по розстильному щиту комбайна (рисунок). На позиції *a* показаний фрагмент руху стрічки стебел по розстильному щиту комбайна в реальних умовах збирання льону-довгунцю, а на *b* зображено рух окремого стебла у вигляді матеріальної частинки, що має масу *m*. Початкова швидкість руху частинки  $v_0$  і на неї діють сили: тяжіння  $\vec{G}$ , що спрямована вертикально униз; нормальна реакція  $\vec{N}$ , що спрямована перпендикулярно до похилої площини розстильного щита; тертя ковзання  $\vec{F}_T$  – проти напрямку руху частинки; опір повітря  $\vec{P}_B$  – проти напрямку руху тієї ж частинки. Оскільки розглядати рух очисаних стебел, то силу зчеплення стебел між собою за відсутності насінних коробочок на рослинах не враховуватимемо [4]. Проведемо осі координат: вісь *X* уздовж похилої площини в напрямку руху частинки, а вісь *Y* – перпендикулярно до вказаної площини вгору. За початок координат взято точку на поздовжній осі труби розстильного щита, за допомогою якої останній встановлюють на рамі комбайна у відповідних цапфах і закріплюють хомутами.

Сила тяжіння, що діє на матеріальну частинку,  $G = mg$ , де  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння.

Спроектували сили, що діють на матеріальну частинку, на вісь *Y* одержали  $N = mg \cos \psi$ , де  $N$  – нормальна реакція;  $\psi$  – кут нахилу розстильного щита до горизонту, град.

Сила тертя ковзання матеріальної частинки по поверхні розстильного щита, що

спрямована проти напрямку руху частинки, становитиме,  $F_T = fmg \cos \psi$ , де  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання свіжовибраних стебел льону-довгунцю по матеріалу розстильного щита.

Сила опору повітря руху стебел по розстильному щиту залежить від щільності повітря, площі міделевого перерізу (площі перерізу стебла чи пучка або групи стебел, що перпендикулярна до напрямку руху стрічки), швидкості повітряного потоку, що набігає на стебла [6] (швидкості руху агрегату [7], стебел по розстильному щиту чи повітря [8]). У літературних джерелах зустрічаємо, що міделевий переріз пучка стебел при їх розстиланні браками коливається в межах  $0,002\text{--}0,009 \text{ м}^2$  [7]. В умовах досліду свіжовибрані стебла середнього діаметра  $1,0 \text{ мм}$  без коробочок характеризувалися як такі, що мали діаметр міделевого перерізу  $70 \text{ мм}$  [8]. Опір повітря, який виражають залежно від швидкості, визначають за формулою [4, 5]

$$P_B = k v_x^2,$$

де  $k$  – коефіцієнт опору повітря;  $k = 0,41\text{--}0,52 \text{ кг/м}$  [4];

$v_x$  – швидкість руху стебел льону-довгунцю.

Після проєктування діючих на частинку сил на вісь *X* одержали диференціальне рівняння її руху вздовж похилої площини, яка імітує розстильний щит,

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = m v_x \frac{dv_x}{dx} = mg \sin \psi - f mg \cos \psi - k v_x^2, \quad (1)$$

де  $x$  – відстань матеріальної частинки від початку координат;

$t$  – час руху матеріальної частинки вздовж похилої площини.

Позначимо  $v_x = v$ , і рівняння (1) запишемо так:

$$m v \frac{dv}{dx} = mg \sin \psi - f mg \cos \psi - k v^2. \quad (2)$$

Розділимо праву і ліву частини рівняння (2) на  $m$ :

$$v \frac{dv}{dx} = g \sin \psi - f g \cos \psi - \frac{k}{m} v^2. \quad (3)$$

Позначимо  $g \sin \psi - f g \cos \psi = \tau$ , і запишемо рівняння (3) у такому вигляді:

$$v \frac{dv}{dx} = \tau - \frac{k}{m} v^2. \quad (4)$$

Рівняння (4) – це диференціальне рівняння першого порядку з відокремлюваними змінними. Відокремимо змінні і отримаємо рівняння

$$v/\tau - \frac{k}{m} v^2 \cdot dv = dx. \quad (5)$$

Рівняння (5) – це вже рівняння з відокремленими змінними. Проінтегруємо ліву і праву частини цього рівняння

$$\int v dv / \tau - \frac{k}{m} v^2 = \int dx + C,$$

де  $\int dx = x$ , а  $C$  – стала інтегрування.

Для інтегрування виразу

$$\int v dv / \tau - \frac{k}{m} v^2 \quad (6)$$

зробимо заміну. Позначимо:  $\tau - k/m \cdot v^2 = S$ ; тоді  $-2kv/m \cdot dv = ds$ .

Знаходимо, що  $v dv = -m/2k \cdot ds$ .

Тоді інтеграл (6) можна переписати так:

$$\int v dv / \tau - \frac{k}{m} v^2 = -\frac{m}{2k} \int \frac{ds}{s}.$$

Останній інтеграл є табличним і

$$\int ds/s = \ln|s|.$$

Тому

$$-\frac{m}{2k} \ln|s| = -\frac{m}{2k} \ln|\tau - \frac{k}{m} v^2|.$$

Таким чином, одержано загальний інтеграл диференціального рівняння (4), а саме:

$$-\frac{m}{2k} \ln|\tau - \frac{k}{m} v^2| = x + C. \quad (7)$$

Використаємо початкову умову  $v(0) = v_0$ , тобто  $x_0 = 0$ . Підставимо ці значення в загальний інтеграл (7)

$$-\frac{m}{2k} \ln|\tau - \frac{k}{m} v_0^2| = 0 + C.$$

Звідки

$$C = -\frac{m}{2k} \ln|\tau - \frac{k}{m} v_0^2|. \quad (8)$$

Підставимо отриманий вираз (8) у розв'язок (7)

$$\frac{m}{2k} \ln|\tau - \frac{k}{m} v_0^2| - \frac{m}{2k} \ln|\tau - \frac{k}{m} v^2| = x.$$

Винесемо спільний множник  $(-\frac{m}{2k})$  за дужки

$$-\frac{m}{2k} \left( -\ln|\tau - \frac{k}{m} v_0^2| + \ln|\tau - \frac{k}{m} v^2| \right) = x.$$

Враховуючи властивості логарифмічної функції, останній вираз подамо так:

$$\frac{m}{2k} \ln|\tau - \frac{k}{m} v^2 / \tau - \frac{k}{m} v_0^2| = -x. \quad (9)$$

Вираз (9) запишемо таким чином:

$$\ln|\tau - \frac{k}{m} v^2 / \tau - \frac{k}{m} v_0^2| = -\frac{2kx}{m}. \quad (10)$$

Виходячи з визначення логарифмічної функції, рівність (10) представимо як

$$\tau - \frac{k}{m} v^2 / \tau - \frac{k}{m} v_0^2 = e^{-\frac{2kx}{m}}, \quad (11)$$

де  $e$  – основа натурального логарифма.

Розв'яжемо рівняння (11) відносно  $v$ . Для цього подамо його у вигляді

$$\tau - \frac{k}{m} v^2 = \left( \tau - \frac{k}{m} v_0^2 \right) e^{-\frac{2kx}{m}}.$$

$$\text{І далі } \frac{k}{m} v^2 = \tau - \left( \tau - \frac{k}{m} v_0^2 \right) e^{-\frac{2kx}{m}}.$$

$$\text{Тоді } v^2 = \frac{m}{k} \left[ \tau - \left( \tau - \frac{k}{m} v_0^2 \right) e^{-\frac{2kx}{m}} \right]. \quad (12)$$

Далі послідовно робимо низку перетворень залежності (12)

$$v^2 = \frac{m}{k} \left[ \tau \left( 1 - e^{-\frac{2kx}{m}} \right) \right] + v_0^2 e^{-\frac{2kx}{m}}. \quad (13)$$

Щоб одержати залежність для визначення швидкості руху стебел по розстиальному щиту, слід взяти корінь квадратний з виразу (13). З урахуванням складових  $\tau$  одержуємо залежність, що визначає зміну швидкості переміщення стебел льону-довгунцю по розстиальному щиту комбайна,

$$v = \sqrt{\frac{mg}{k} (\sin\psi - f \cos\psi) \left( 1 - e^{-\frac{2kx}{m}} \right) + v_0^2 e^{-\frac{2kx}{m}}}. \quad (14)$$

Залежність (14) подібна до формули, що наведена в роботі [4], в якій науковці вивчали рух неочісаних стебел по аналогічній поверхні досліджуваної складової льонозбиральних машин.

За маси стебла 0,00045 кг, їх кількості на одному погонному метрі стрічки 3000 шт., коефіцієнта тертя свіжовибраних стебел об поверхню розстиального щита 0,55, коефіцієнта опору повітря 0,5, довжини розстиального щита 1,2 м та початкової швидкості стебел на розстиальному щиту 1,54 м/с зі зміною кута розміщення останнього щодо поверхні поля від 28 до 50° швидкість сходу стебел з розстиального щита зростає від 1,0 до 2,72 м/с.

Отже, для забезпечення швидкості сходу стебел з розстильного щита комбайна в межах 0,6–1,0 м/с кут розміщення його до поверхні поля не повинен перевищувати 30°. Із збільшенням кута розміщення швидкість зростає і наближається до швидкості руху комбайна, що спри-

ятиме цілісності розстеленої стрічки соломи.

Подальші дослідження, на нашу думку, мають бути спрямовані на з'ясування параметрів розстеленої стрічки соломи з урахуванням можливості механізованого збирання льонотрести.

## Бібліографія

1. Азовцев Н.Г. Учебник машиниста льноуборочных машин / Азовцев Н.Г. – М.: Высш. шк., 1972. – 288 с.

2. Ситников Ю.А. Исследование работы расстильного щита льнокомбайна / Ю.А. Ситников // Труды Всесоюзного ордена Трудового Красного Знамени НИИ льна: экономика, механизация льноводства, первичная обработка льна. – Торжок, 1972. – Вып. 10. – С. 80–83.

3. Ситников Ю.А. Разработка и исследование технологического процесса и рабочих органов двухпоточного льнокомбайна повышенной производительности: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.410 “Механизация с.-х. производства” / Ю.А. Ситников. – Горки, 1972. – 25 с.

4. Ковалев М.М. Исследование процесса расстила вытеребленных растений льноуборочными машинами / М.М. Ковалев, Р.А. Ростовцев, С.В. Просолов // Аграрная наука. – 2009. – № 3. – С. 30–32.

5. Василенко П.М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин / Василенко П.М. – К.: Изд-во УАСХН, 1960. – 284 с.

6. Баранов И.В. Некоторые вопросы теории пневмотранспорта компонентов льняного вороха / И. В. Баранов // Труды Всесоюзного ордена Трудового Красного Знамени НИИ льна. – М.: Моск. рабочий, 1969. – Вып. 7. – С. 376–391.

7. Логинов С.И. Исследование расстила стеблей при уборке льна теребилками / С.И. Логинов, А.Ф. Еругин // Труды Всесоюзного ордена Трудового Красного Знамени НИИ льна: экономика, механизация льноводства, первичная обработка льна. – Торжок, 1974. – Вып. 12. – С. 121–128.

8. Нікольчук С.С. Результати досліджень опору повітря руху стебел льону-довгунця / С.С. Нікольчук // Сільськогосподарські машини: зб. наук. ст. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2010. – Вип. 20. – С. 218–222.

**Рецензенти** – доктори технічних наук,  
професори Л.В. Лось, Ю.О. Чурсінов