

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРУТИЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПЛОДОНОЖКИ ПОЧАТКА КУКУРУЗЫ

*Александр Ракул, Владимир Пилип*

*Николаевский национальный аграрный университет*

*54020, г. Николаев, ул. Парижской коммуны, 9*

*Olexander Rakul, Vladimir Pilip*

*Nikolaev National Agrarian University*

*54020, Nikolaev, st. Paris Commune, 9*

**Аннотация.** В работе разработана математическая модель процесса отделения початков кукурузы от стеблей при крутильных деформациях плодоножки, которая дает возможность установить закономерности изменения основных кинематических параметров початкоотделительного аппарата многофакторного действия. На основании полученных уравнений определены пути дальнейшего развития кукурузоуборочной техники.

**Ключевые слова:** крутильные деформации, початок, плодоножка, угол закручивания.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Основными показателями качественного выполнения технологического процесса уборки кукурузы являются полнота уборного урожая и соответствие агротехническим требованиям. Они должны отображать наивысший, соответствующий современному этапу развития кукурузоуборочной техники, практически достигаемый уровень [17]. Лишь в таком случае кукурузоуборочную машину можно называть современной и эффективной.

На сегодняшний день по показателям потерь и травмирования початков ни одна из существующих конструкций как отечественного так и заграничного производства, даже при максимальном приближении, такого уровня не достигла. Так в процессе эксплуатации установлено, что средние полевые потери урожая за кукурузоуборочной техникой, разных стран-производителей, превышают допустимые агротехнические нормы в 4,5 и больше раз [5, 15].

Данный факт объясняется несовершенством основных рабочих органов кукурузоуборочных машин, которые не отвечают показателям качественного выполнения заданных технологических операций, поскольку

при их проектировании конструктивно-кинематические параметры теоретически не подтверждались, а уточнялись при проведении экспериментальных и полевых испытаниях [10]. В первую очередь это касается початкоотделительного аппарата, именно от его работы зависит как полнота уборки, так и степень травмирования початков.

К сожалению поставленные на производство пиккерно-стрипперные початкоотделительные аппараты, которые установлены на большинстве кукурузоуборочных машин мира, по качественным показателям работы находятся на неподобающем уровне. В значительной степени неудовлетворительное качество отделения початков объясняется тем, что в основу их работы положен принцип отделения за счет лишь одной силы – силы продольного растяжения плодоножки, которая приводит к ее разрыву. Однако в некоторых случаях сопротивление разрыву стебля может быть меньше, чем у плодоножки, что приведет к потере урожая свободными початками [3]. К тому же за счет натяжения плодоножки и резкому ее разрушению не исключена возможность вылета початка после отделения за пределы жатки.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Большой объем работ по совершенствованию початкоотделительного аппарата проведен учеными различных научно-исследовательских учреждений бывшего СССР. Отдельные элементы этого вопроса решались в КБ Херсонского комбайнового завода, но к сожалению основная часть исследований была приостановлена в начале 90-х годов прошлого века.

Большой вклад в развитие данной отрасли сделали ряд ученых. Прежде всего следует вспомнить работы П.П. Карпуши, Н.Ф.

Туделя, Л.И. Анисимовой, К.В. Шатилова, М.И. Конопельцева, К.И. Шмата [1, 2, 9, 13, 16] в которых освещенные вопросы протекания технологических процессов, а также кинематических зависимостей в разрабатываемых конструкциях.

На основе их исследований появилось общее мнение, что наиболее перспективным путем совершенствования початкоотделительных аппаратов является стабилизация параметров процесса отделения початков. То есть переход от конструкций, в которых отделение початков носит случайный, хаотичный характер, к конструкциям, в которых эти процессы прогнозируемые на основании определенных закономерностей [6].

Наиболее простым способом решения поставленной задачи является введение в зону отделения початков дополнительные силы, а именно силу резания, кручения, изгиба и других или их комбинацию. При этом процесс отделения будет происходить при сложной деформации плодоножки, которая позволит снизить необходимое усилие для отделения початков, а следовательно и общие потери урожая.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАНИЯ

Целью работы является теоретическое обоснование работы пиккерно-стрипперного початкоотделительного аппарата многофакторного действия, путем разработки математической модели процесса отделения початков при крутильных деформациях плодоножки.

#### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Если рассматривать сочетание нескольких сил в процессе початкоотделения, то одним из перспективных путей интенсификации данного процесса есть комплексное использование растяжения плодоножки вместе с ее закручиванием. При этом кручение будет выступать в роли дополнительного разрушающего усилия.

Рассмотрим технологическую схему (рис. 1) в которой кручение тела плодоножки 1 осуществляется закручиванием початка 4 прорезиненной лентой 5, которая движется со скоростью  $v_1$ , а прижимное устройство 6 устраняет проскальзывание початка. Одновременно вращением протягивающих вал-

цев 2 осуществляется перемещение початка в сторону стрипперных пластин 3 со скоростью  $v_0$ , после достижения которых происходит его отделение.

Время действия закручивания равно промежутку между моментом входа початка в контакт с лентой и моментом удара початка о стрипперные пластины, то есть:

$$t_1 = \frac{h}{v_0}, \quad (1)$$

где:  $v_0$  – скорость продольного движения початка с плодоножкой;

$h$  – путь, пройденный початком за время контакта с лентой.

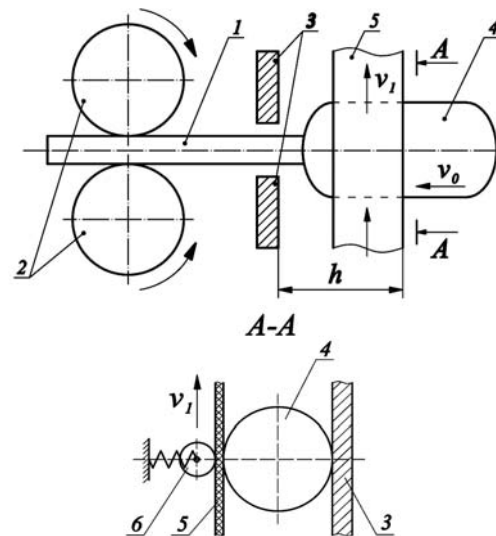


Рис. 1. Технологическая схема крутильных деформаций:

1 – плодоножка; 2 – протягивающие вальцы; 3 – стрипперные пластины; 4 – початок; 5 – прорезиненная лента; 6 – прижимной механизм

Fig. 1. Technological scheme torsional deformations:

1 – stalk; 2 – piker rollers; 3 – stripper plate; 4 – ear; 5 – rubberized tape; 6 – the presser mechanism

Что касается взаимодействия початка с подвижной лентой, то возможны два варианта моделирования процесса закручивания.

Первый вариант закручивания початка без проскальзывания. Тогда угол закручивания определится как [11, 12]:

$$\varphi_{\max} = \frac{v_1 t_1}{R}, \quad (2)$$

где:  $R$  – средний радиус початка.

Из (2) с учетом (1) найдем:

$$\varphi_{\max} = \frac{v_1}{v_0} \frac{h}{R}. \quad (3)$$

Второй вариант определения угла закручивания из уравнения крутильного маятника (рис. 2):

$$I_o \ddot{\varphi} + \frac{I_p G}{l} \varphi = M(t), \quad (3)$$

где:  $I_p$  – полярный момент инерции для круглого вала (как модели плодоножки);

$I_o$  – момент инерции початка относительно оси симметрии;

$G$  – модуль сдвига (модуль упругости II рода) для материала вала (плодоножки);

$l$  – длина вала (плодоножки);

$M(t)$  – крутящий момент от действия силы трения между початком и прорезиненной лентой.

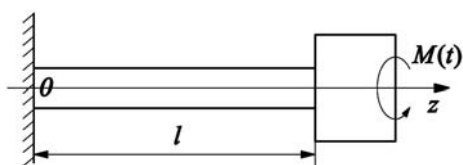


Рис. 2. Расчетная схема крутильных деформаций

Fig. 2. Design scheme torsional deformations

Крутящий момент представлен следующим выражением:

$$M(t) = M_0 1_+(t), \quad (4)$$

где:  $1_+(t)$  – единичная функция Хевисайда:

$$1_+(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } t > 0 \\ 0 & \text{при } t \leq 0 \end{cases};$$

$M_0$  – амплитуда момента.

В свою очередь:

$$M_0 = F_0 R, \quad (5)$$

где:  $F_0$  – сила трения боковой поверхности початка о ленту:

$$F_0 = N_0 f, \quad (6)$$

где:  $N_0$  – сила прижима ленты к початку;

$f$  – коэффициент трения.

Через нулевые начальные условия:

$$t = 0; \quad \varphi(0) = 0; \quad \dot{\varphi}(0) = 0 \quad (7)$$

решение уравнения (3), после удовлетворения начальным условиям (7), имеет вид:

$$\varphi(t) = \frac{M_0}{I_o \omega^2} \cdot (1 - \cos \omega t), \quad (8)$$

где:

$$\omega^2 = \frac{GI_p}{I_o l}. \quad (9)$$

Заметим, что при  $\omega t \ll 1$  выражение (8) можно записать как:

$$\varphi(t) \approx \frac{M_0}{I_o} \cdot \frac{t^2}{2}. \quad (10)$$

По выражению (8) при  $t = t_1$  найдем максимальный угол закрутки:

$$\varphi_{\max} = \varphi(t_1) \approx \frac{M_0}{I_o} \cdot \frac{1 - \cos \omega t_1}{\omega^2}, \quad (11)$$

где:  $t_1$  определено по (1).

Теперь найдем крутящий момент в сечении крепления початка к плодоножке:

$$M_{кр} = \varphi(t_1) \frac{GI_p}{l}, \quad (12)$$

или с учетом (9):

$$M_{кр\max} = \frac{M_0}{I_o} \frac{GI_p}{l} \frac{1 - \cos \omega t_1}{\omega^2} = M_0 (1 - \cos \omega t_1). \quad (13)$$

Максимального значения момент (13) достигает при  $\cos \omega t_1 = -1$  или при:

$$\omega t_1 = \pi. \quad (14)$$

Тогда  $M_{кр\max} = 2M_0$ .

Наибольшее касательное напряжение кручения определим как [11, 12]:

$$\tau_{\max} = \frac{M_{кр\max}}{W_p}, \quad (15)$$

где:  $W_p$  – момент сопротивления вала при кручении.

Для круглого сечения вала:

$$W_p = \frac{I_p}{R} = \frac{\pi R^3}{2}. \quad (16)$$

Мы рассмотрели математические модели деформации кручения плодоножки как объекта с сосредоточенными параметрами. Однако при определенных сочетаниях параметров следует рассмотреть модель кручения плодоножки как объект с распределенными параметрами.

В этом случае считаем, что динамика крутильных деформаций описывается волновым уравнением вида [4, 7]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - a_0^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (17)$$

где:  $z$  – продольная координата ( $0 \leq z \leq l$ );

$t$  – время ( $0 \leq t < t_1$ );

$\varphi$  – функция деформаций кручения ( $\varphi = \varphi(z, t)$ );

$a_0$  – скорость распространения волн кручения:

$$a_0^2 = \frac{G}{\rho}, \quad (18)$$

где:  $G$  – модуль упругости II рода;

$\rho$  – плотность материала вала (плодоножки).

Начальные условия считаем нулевыми:

$$t = 0; \quad \varphi(0, z) = 0; \quad \dot{\varphi}(0, z) = 0. \quad (19)$$

Граничные условия на левом крае плодоножки, зажатой вальцами:

$$z = 0; \quad \varphi(0, t) = 0. \quad (20)$$

К правому концу вала приложен момент инерции диска (початка) и внешний крутящий момент от подвижной ленты:

$$z = l: \quad GI_p \left( \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = M(t) - I_0 \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \right), \quad (21)$$

или используя принятые ранее обозначения:

$$\left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \right) + \omega^2 l \left( \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = \frac{M_0}{I_0} 1_+(t). \quad (22)$$

Для решения поставленной начально-краевой задачи кручения вала (17)-(22) воспользуемся методом операционного исчисления:

$$\varphi^2(p, z) = \int_0^{\infty} e^{-pt} \varphi(t, z) dt, \quad (23)$$

где:  $p$  – параметр преобразования;

$\varphi^2(p, z)$  – трансформанта (изображение) по Лапласу функции-оригинала  $\varphi(t, z)$ .

Тогда, с учетом нулевых начальных условий в области изображений, по Лапласу получим:

$$\frac{\partial^2 \varphi^2}{\partial z^2} - \left( \frac{p}{a_0} \right)^2 \varphi^2 = 0; \quad (24)$$

$$\varphi^2(0, p) = 0; \quad (25)$$

$$p^2 \varphi^2(p, l) + \omega^2 l \frac{d\varphi^2}{dz} = \frac{M_0}{I_0} \cdot \frac{1}{p}. \quad (26)$$

Решение обычного дифференциального уравнения (24) запишем в виде:

$$\varphi^2(p, z) = c_1 \cdot sh \frac{pz}{a_0} + c_2 \cdot ch \frac{pz}{a_0}. \quad (27)$$

где:  $c_1, c_2$  – постоянные интегрирования;

$sh, ch$  – функции гиперболического синуса и косинуса.

Удовлетворим решение (27) граничным условиям (25) и (26), получим:

$$c_1 \cdot 0 + c_2 \cdot 1 = 0; \quad (28)$$

$$p^2 c_1 \cdot sh \frac{pl}{a_0} + \frac{\omega^2 l}{a_0} p \cdot c_1 \cdot ch \frac{pl}{a_0} = \frac{M_0}{I_0} \cdot \frac{1}{p}. \quad (29)$$

Из уравнения (28) следует, что  $c_2 = 0$ . Постоянную  $c_1$  найдем из уравнения (29):

$$c_1 = \frac{M_0}{I_0} \cdot \frac{1}{p^2} \cdot \left( p \cdot sh \frac{pl}{a_0} + \frac{\omega^2 l}{a_0} ch \frac{pl}{a_0} \right)^{-1}. \quad (30)$$

Теперь с учетом найденных значений постоянных интегрирования решения (27) принимает вид:

$$\varphi^2(p, z) = \frac{M_0}{I_0} \cdot \frac{1}{p^2} \cdot \frac{sh \frac{pz}{a_0}}{p \cdot sh \frac{pl}{a_0} + \frac{\omega^2 l}{a_0} ch \frac{pl}{a_0}}. \quad (31)$$

Примем в (31)  $z = l$ , найдем:

$$\varphi^2(p, l) = \frac{M_0}{I_0} \cdot \frac{1}{p^2} \cdot \frac{sh \frac{pl}{a_0}}{p \cdot sh \frac{pl}{a_0} + \frac{\omega^2 l}{a_0} ch \frac{pl}{a_0}}. \quad (32)$$

Такое нахождение оригинала  $\varphi(t, l)$  для трансформанты (32) представляет определенные трудности. Однако импульсный характер процесса позволяет получить функцию-оригинал для трансформанты (32) приближенно. Заметим [8], что предельное представление трансформанты для  $p \rightarrow \infty$  соответствует предельному значению функции-оригинала  $\varphi(t, l)$  при  $t \rightarrow 0$ . Тогда приближенно принимаем:

$$\varphi^2(p, l) \approx \frac{M_0}{I_0} \cdot \frac{1}{p^2} \cdot \frac{1}{p + \left( \frac{\omega^2 l}{a_0} \right)}. \quad (33)$$

При переходе от (32) к (33) использовано предельное соотношение:

$$\lim_{p \rightarrow \infty} sh \frac{pl}{a_0} = \lim_{p \rightarrow \infty} ch \frac{pl}{a_0} = \frac{1}{2} \lim_{p \rightarrow \infty} e^{\frac{pl}{a_0}}. \quad (34)$$

Переходя в (32) к оригиналу по [14], получим:

$$\varphi(t, l) \approx \frac{M_0}{I_0} \cdot \left( \frac{a_0}{\omega^2 l} \right)^2 \cdot (e^{-\beta t} - 1 - \beta t), \quad (35)$$

где:  $\beta = \omega^2 l / a_0$

При  $\beta t \rightarrow 0$  (35) имеет вид:

$$\varphi(t, l) = \frac{M_0}{I_0} \cdot \frac{1}{\beta} \cdot \frac{(\beta t)^2}{2} = \frac{M_0}{2I_0} t^2. \quad (36)$$

Принимаем в (35) или (36)  $t = t_l$ , получим максимальный угол закручивания:

$$\varphi_{\max} = \frac{M_0}{2I_0} t_1^2, \quad (37)$$

что совпадает из (10):

$$\varphi_{\max} = \frac{M_0}{2I_0} \cdot \frac{1}{\beta^2} (e^{-\beta t_1} - 1 + \beta t_1). \quad (38)$$

### ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований разработана математическая модель процесса отделения початков от стеблей при крутильных деформациях плодоножки, которая дает возможность установить закономерности изменения основных параметров и сформулировать основные принципы создания кукурузоуборочных машин нового поколения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Anisimova L. 1966. Teoreticheskie i yeksperimentalnye issledovaniya zakonomernostey dvizheniya stebley spochatkootdelyayuschih apparatah ruhevogo tipa // VISKHOM. – Moskva – Vip. 47. – 259-280.
- Anisimova L. 1963. Tehnologicheskie svoystva kukuruzy, opredelyayushchie protsess pochatkootdeleniya // VISKHOM. – Moskva – Vyp. 41. – 3-15.
- Bondarenko O. 2010. Theoretical study of mechanical separation technology of corn stalks inertial forces // Motrol, – Motorization and power industry in agriculture. – Lublin. Tom 12A. – 84-92.
- Bursian V. 1927. Volnovaya mehanika Shredingera. Osnovaniya novoy kvantovoy mehaniki // M.-L.: Gosizdat. – 53-82.
- Goldschmidt O., Bondarenko O. 2001. Analiz tehnicnoho protsesu vidokremlennya kachaniv kukurudzy // Mehanizatsiya silskohospodarskoho vyrobnytstva. – Harkiv – Vip. 7. – 239-245.
- Hrebeniuk G., Kuzenko D., Bondarenko O. 1999. Konstruktyvno-tehnologichni peredumovy vdoskonalennya kachanovidokremlyuvalnyh prystroyiv kukurudzozbyralnyh mashyn // Visnyk ahrarnoyi nauky Prychornomor'ya – Vip. 7. – 32-36.
- Davis R. 1961. Volny napryazheny v tverdyh telah // M.: Inostrannaya literatura. – 102.
- Erofeev V., Kazhayev V., Semerikova N. 2002. Volny v sterzhnyah. Dispersiya. Dissipatsiya. Nelineynost // M.: Fizmatlit – 208.
- Karpusha P., Konopeltsev M. 1970. Optymalni parametry kachanovidokremlyuvachiv ochisvalnoho typu // Visnyk silskohospodarskoyi nauky. – Kyiv, - № 6. – 40-43.
- Kuzenko D., Bondarenko O., Tymoshchuk V. 2000. Teoretychnyy analiz pidvyschennya yakisnyh pokaznykiv kachanovidokremlyuvalnyh aparativ kukurudzozbyralnyh mashyn // Visnyk ahrarnoyi nauky Prychornomor'ya. – Vip. 9. – 136-203.
- Panovko Y. 1985. Mehanika deformiruemogo tverdogo tela: sovremennye kontseptsii, oshibki i paradoksy // M.: Nauka. – 288.
- Pisarenko G., Flower A., Umansky E. 1993. Opir materialiv // K. Vyscha shkola. – 655.
- Reznichenko I. 1983. Issledovanie kinemacheskogo rezhima raboty pochatkootdelyayuschego apparata pikkernostrippernogo tipa // Traktory i selhozmashyny, – № 4. – 19-20.
- Sachenko A. 2003. Opisanie uskorennoho dvizheniya deformiruemogo tverdogo tela na osnove volnovykh protsessov, vznikayuschih pri vozdeystvii postoyannoy sily na ego poverhnost (torets) // Vestnik SevKavGTU. – Stavropol, – № 1 (7). – 64-72.
- Sidorenko A., Senchuk S., Lub P., Tatomyr A., Burylko A. 2005. The method of determining loss of crops due to delayed implementation of mechanized processes of plant // Motrol, – Motorization and power industry in agriculture. – Lublin. Tom T7. – 86-91.
- Tyudel N. 1967. Issledovanie protsesa pitaniya pochatkootdelyayuschih apparatov. Zemledelcheskaya mehanika // Sbornik trudov pod redaktsiey akademika VASKHNIL V.A. Zheligovskaya. – Tom 7. – M., Mashinostroenie. – 300-305.
- Shatilov K., Kozachok B., Nuts A. and dr. 1981. Kukuruzouborochnye mashyny // M.: Mashinostroenie. – 224.

## **THEORETICAL STUDIES TORSIONAL DEFORMATIONS STALK EAR OF CORN**

**Summary.** In this paper, developed a mathematical model of the process of separation from ears of corn stalks with torsional deformations stalk, which makes it possible to establish patterns of change basic kinematic parameters corn picker multifactor action. Based on the obtained equations the ways of further development of corn-harvesting technical.

**Key words:** torsional deformation, ear of corn, stalk, twisting angle.