

## ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ РОТОРНОГО БИЛЬНО-ВЫЧЕСЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБМОЛОТА ЛЬНА

М. В. ЦАЙЦ

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,  
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: maksimts@tut.by

(Поступила в редакцию 10.04.2023)

*В статье приводятся результаты теоретических и лабораторных исследований разработанного в УО БГСХА роторного бильно-вычесывающего устройства для обмолота льна при реализации комбайновой технологии уборки.*

*Качество работы обмолачивающего устройства определяется его геометрическими и кинематическими параметрами. Основными геометрическими параметрами предлагаемой конструкции обмолачивающего устройства является радиус ротора, радиус защитного кольца, параметры и количество устанавливаемых на роторе бичей.*

*Выполненные исследования позволили получить теоретико-эмпирические зависимости для определения радиуса ротора (0,35 м) и радиуса защитного кольца (0,12 м) роторного бильно-вычесывающего устройства.*

*Получены аналитические зависимости для определения параметров бичей как объемной фигуры, исходя из ширины основания бичей, диаметра ротора, поперечного угла подъема боковой поверхности бича, продольного угла подъема бича, поперечного угла подъема передней поверхности бича и количества установленных на роторе бичей.*

*Исследование параметров ленты стеблей льна, формируемой рабочими органами прицепного льноуборочного комбайна «Двина 4М» позволило установить, что величина относительного перекоса стеблей в ленте не превышает 0,188 рад (12 град). Разработана методика и установлена эмпирическая зависимость для определения коэффициента учитывающего удлинение стеблей в ленте льна под действием продольных сил, возникающих во время работы обмолачивающего устройства. По результатам однофакторных поисковых экспериментов обмолота лент льна роторным бильно-вычесывающим устройством установлены рациональные значения поперечного угла подъема боковой поверхности бича, поперечного угла подъема передней поверхности бича и ширины основания бича.*

*Получена аналитическая зависимость устанавливающая связь между интенсивностью воздействия на ленту льна с конструктивными параметрами роторного бильно-вычесывающего устройства (радиус ротора, ширина основания бича, количество установленных бичей на роторе) и его кинематическими параметрами (окружная скорость вращения периферийной части ротора и скорость движения зажимного транспортера).*

**Ключевые слова:** лен, обмолачивающее устройство, геометрические параметры, бичи, коробочки льна, семена льна, обмолот, очес, лента льна, комбайновая технология.

*The article presents the results of theoretical and laboratory studies of a rotary beater-combing device for flax threshing in the implementation of combine harvesting technology developed at the Belarusian State Agricultural Academy.*

*The quality of the threshing device is determined by its geometric and kinematic parameters. The main geometric parameters of the proposed design of the threshing device are the radius of the rotor, the radius of the protective ring, the parameters and the number of beaters installed on the rotor.*

*The performed studies allowed to obtain theoretical and empirical dependences for determining the radius of the rotor (0.35 m) and the radius of the protective ring (0.12 m) of the rotary beater-combing device.*

*Analytical dependencies were obtained to determine the parameters of the beaters as a three-dimensional figure, based on the width of the base of the beaters, the diameter of the rotor, the transverse angle of elevation of the side surface of the beater, the longitudinal angle of the rise of the beater, the transverse angle of elevation of the front surface of the beater and the number of beaters installed on the rotor.*

*The study of the parameters of the flax stem belt formed by the working bodies of the Dvina 4M trailed flax harvester made it possible to establish that the relative skew of the stems in the belt does not exceed 0.188 rad (12 degrees). A technique has been developed and an empirical dependence has been established to determine the coefficient that takes into account the elongation of the stems in the flax tape under the action of longitudinal forces that arise during the operation of the threshing device.*

*Based on the results of single-factor search experiments of threshing flax tapes with a rotary beater-combing device, rational values of the transverse angle of elevation of the side surface of the beater, the transverse angle of elevation of the front surface of the beater and the width of the base of the beater were established. An analytical dependence has been obtained that establishes a relationship between the intensity of the impact on the flax tape with the design parameters of the rotary beater-combing device (rotor radius, the width of the base of the beater, the number of installed beaters on the rotor) and its kinematic parameters (the circumferential speed of rotation of the peripheral part of the rotor and the speed of the clamping conveyor).*

**Key words:** flax, threshing device, geometric parameters, beaters, flax bolls, flax seeds, threshing, tow, flax ribbon, combine technology.

### Введение

Урожайность льнопродукции напрямую зависит от качества семенного материала. К основным проблемам семеноводства льна в Республике Беларусь относят: сокращение числа льносемянстанций, недостаток семян высоких посевных кондиций. Зачастую сеют семенами массовых репродукций, что недопустимо, т. к. использование семян низкой репродукции приводит к снижению урожайности и качества льнопродукции.

В условиях Республики Беларусь получение семенного материала осуществляется по комбайновой и раздельной технологиям при отделении семян в поле [1, 2]. Несмотря на внедрение раздельной технологии уборки, основной для получения семян льна, используемых в дальнейшем для посева, является комбайновая [3].

От уровня совершенства технологического процесса отделения семенной части урожая льна-долгунца от стеблей зависит величина урожая, качество льнопродукции, величина потерь, трудоемкость и энергоёмкость послеуборочной доработки вороха льна. Так как льносеющие хозяйства Республики Беларусь для получения посевного материала в основном используют льноуборочные комбайны ЛК-4А и «Двина 4М» [1, 4, 5] с гребневым очесывающим аппаратом, то получение семян сопровождается существенными материальными потерями и трудовыми затратами [1, 6, 7]. Работа гребневого очесывающего аппарата льноуборочного комбайна сопровождается повышенными повреждениями и отходом части стеблей в путанину, возникающую в результате прочесывания слоя спутанных и сцепленных между собой стеблей; защемлением стеблей в межзубовом пространстве, приводящим к обрыву стеблей и выдергиванию их из зажимного транспортера; снижением степени очеса семян при повышении растянутости ленты льна (особенно выражено при работе на полеглых посевах); низкой эффективностью при работе на короткостебельном льне.

В результате проведенного анализа устройств для отделения семян льна от стеблей [7], была предложена конструктивно-технологическая схема роторного бильно-вычесывающего устройства (рис. 1) [8, 9], отличающегося тем, что оно выполнено в виде ротора 2 с одной стороны которого установлены косые бичи 3, а с другой стороны – вычесывающе-транспортирующая щетка, что в сочетании с декой обеспечивает комбинированное ударное, вытирающее и вычесывающее воздействие на ленту льна.

Цель исследования – теоретически обосновать конструктивные параметры разрабатываемого устройства, исключая повреждение стеблей льна, а также обеспечивающие технологические параметры процесса обмолота; определить эмпирический коэффициент удлинения стеблей льна под действием рабочих органов обмолачивающего устройства; установить взаимосвязь между конструктивными и кинематическими параметрами обмолачивающего устройства.

#### Основная часть

Поступающая на обмолот лента содержит в верхушечной части растений семенные коробочки (рис. 1). Зона их расположения  $L_{ск}$  велика и имеет в стеблестое на корню высоту 0,25–0,45 м, а в ленте льна из-за растянутости и неодинаковой длины растений она составляет 0,35–0,56 м [10].

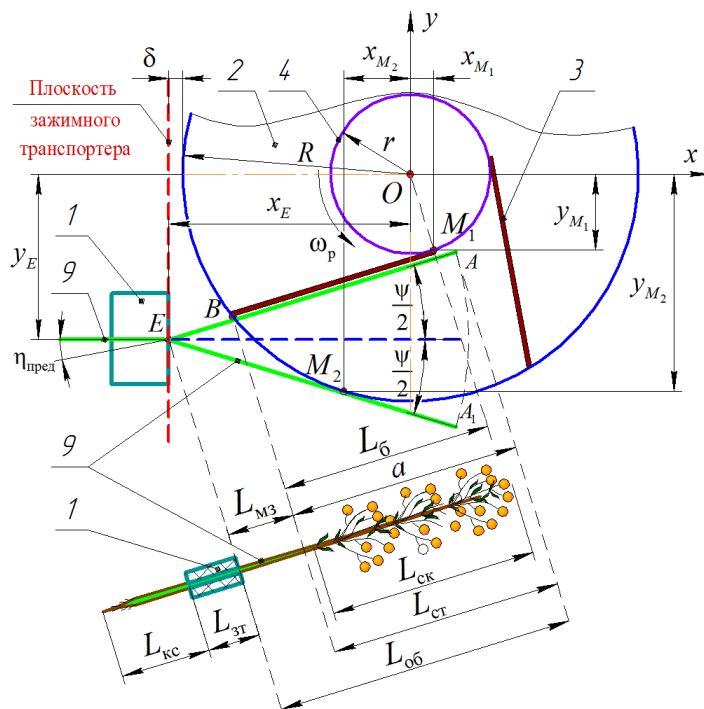


Рис. 1. Общая схема обмолота: 1 – зажимной транспортер; 2 – диск ротора; 3 – бич; 4 – защитное кольцо; 5 – стебли льна

Чистота отделения семенной части от стеблей должна составлять не менее 98 % на прямостоящем

и 95 % – на полеглом льне. При этом отход стеблей в путанину не должен превышать 3 % [11].

Отделение семенных коробочек от стеблей осуществляется в зоне очеса  $BA$ , длина которой равна  $a$ . Длина «мертвой» зоны  $L_{мз}$  равна расстоянию от передней границы ручья зажимного транспортера (точка  $E$ ) до точки  $B$  наиболее удаленной от оси вращения ротора  $O$ . Чем больше  $a$  и меньше  $L_{мз}$ , тем полнее будет обмолот, особенно короткостебельного льна. Длина зоны обмолота  $a$  должна быть больше или равна ширине зоны расположения семенных коробочек в ленте  $L_{ск}$ , то есть

$$a \geq L_{ск}. \quad (1)$$

Поскольку ротор 2 с бичами 3 в процессе работы осуществляет вращательное движение вокруг оси  $O$ , то при большом значении величины  $EA$ , соответствующей длине стеля льна от места зажима до вершины  $L_{об}$ , стебель может наматываться на защитное кольцо 4. Условие не наматывания можно записать как

$$L_{мз} + L_б + 2 \cdot \pi \cdot r \geq L_{об} \cdot \kappa, \quad (2)$$

где  $L_{мз}$  – длина «мертвой» зоны, расстояние от передней границы ручья зажимного транспортера (точка  $E$ ) до пересечения окружности ротора плоскостью подаваемой ленты льна (точка  $B$ ), м;  $L_б$  – длина рабочей поверхности бича, м;  $L_{об}$  – длина стеля льна от места зажима до вершины, м;  $r$  – радиус защитного кольца, м;  $\kappa$  – коэффициент учитывающий удлинение стеблей в ленте льна.

С целью определения параметра  $\kappa$  была изготовлена лабораторная установка, схема и общий вид которой представлены на рис. 2, а.

Установка представляет собой сплошную плиту 1. На плите 1 жестко закреплено зажимное устройство 3 имитирующее зажимной транспортер, в которое укладывалась лента льна 2. В нижней части плиты имеется линейная шкала 4 (ГОСТ 5094–74 с точностью до 1 мм). Плита устанавливалась в раму вертикальной конструкции шарнирно, с возможностью поворота на  $90^\circ$ . В качестве растягивающей силы использовался груз 5 массой исключающий обрыв стебля.

Опыты проводили следующим образом. На расположенную горизонтально плиту 1, в зажимное устройство 3 укладывался отрезок ленты льна 2 длиной 0,5 м полученный при работе теребивного аппарата льноуборочного комбайна «Двина 4М». За верхнюю часть стебля, ниже соцветия» фиксировался груз. С помощью шкалы 4 фиксировалось начальное положение стебля, а затем плита плавно переводилась в вертикальное положение, стебель под действием груза вытягивался, после чего фиксировалось значение длины стебля в вытянутом состоянии. Испытанию подвергалась лента стеблей льна шириной  $B_л$  0,69, 0,82, 0,96 и 1,09 м.

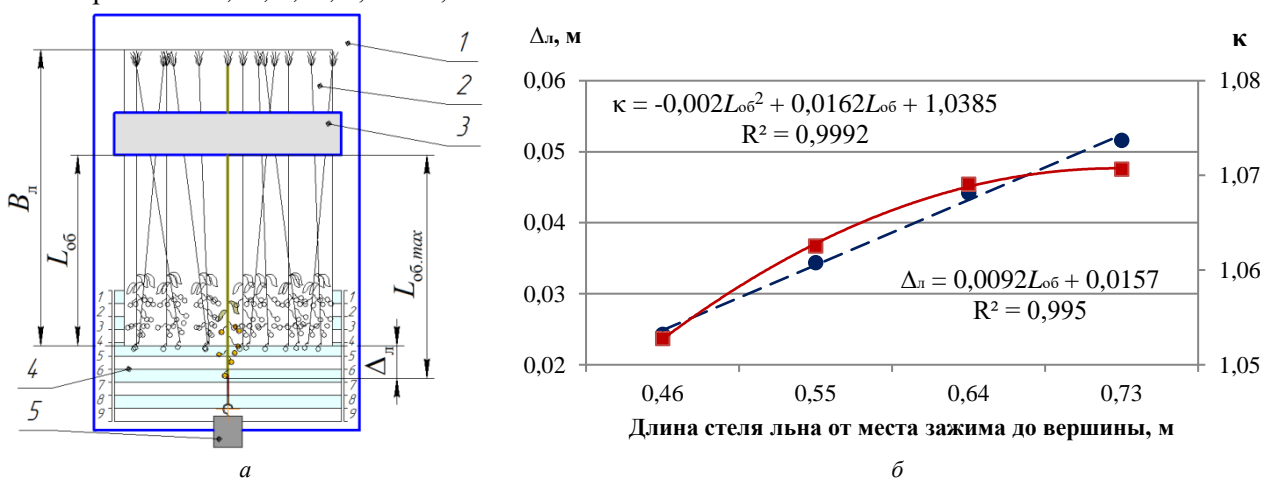


Рис. 2. Схема лабораторной установки для определения параметров  $\Delta_l$  и  $\kappa$  (а), графики зависимости  $\Delta_l$  и  $\kappa$  от  $L_{об}$  (б)

Для определения величины  $\kappa$  были заготовлены опытные образцы свежесобранного льна на полях льнозавода ОАО «Горкилен». Исследуемые образцы стеблей льна имели влажность 43–55 %, значения диаметров стеблей находились в пределах  $(0,48–2,37) \cdot 10^{-3}$  м, а их длина – 0,62–0,98 м.

В результате исследований получено 120 значений величины  $\Delta_l$  и 120 расчетных значений  $\kappa$  при различных значениях  $L_{об}$ .

Графики зависимостей длины участка  $\Delta_l$  и  $\kappa$  от длины стеля льна  $L_{об}$  от места зажима до вершины приведены на рисунке 2, б. Из графической зависимости видно, что параметр  $\Delta_l$  имеет линейную зависимость от длины  $L_{об}$ , описываемую уравнением:

$$\Delta_L = 0,0092 \cdot L_{об} + 0,0157, \quad (3)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,995$ .

В свою очередь коэффициент  $\kappa$  имеет зависимость от параметра  $L_{об}$  в виде степенной функции вида:

$$\kappa = -0,002 \cdot L_{об}^2 + 0,0162 \cdot L_{об} + 1,0385 \quad (4)$$

коэффициент детерминации составляет  $R^2 = 0,995$ .

Ранее нами была установлена зависимость безразмерного показателя  $R/r$  [12, 13]

$$\frac{-R}{r} = \frac{r \cdot \cos(\eta_{пред}) + \operatorname{tg}(\eta_{пред}) \cdot \left( R + \delta - \frac{r \cdot \cos(\eta_{пред})}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} + \eta_{пред}\right)} \right) + \operatorname{tg}(\eta_{пред}) \cdot (R + \delta)}{r \cdot \cos(\eta_{пред}) + \operatorname{tg}(\eta_{пред}) \cdot \left( R + \delta - \frac{r \cdot \cos(\eta_{пред})}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} + \eta_{пред}\right)} \right) - \operatorname{tg}(\eta_{пред}) \cdot (R + \delta)}, \quad (5)$$

где  $R$  – радиус ротора, м;

$\eta_{пред}$  – предельный угол изгиба стеблей льна, (для свежесвытербленных стеблей льна  $\eta_{пред} = 17...27^\circ$  [14]);

$\delta$  – расстояние между плоскостью зажимного транспортера и ротором, м (расстояние  $\delta$ , обеспечивающее свободное вращение ротора, с учетом конструктивных особенностей зажимного транспортера находится в пределах 0,03–0,04 м).

Радиус ротора можно определить по зависимости:

$$R = \frac{r \cdot \cos(\eta_{пред}) \cdot \operatorname{tg}(\eta_{пред})^2 + 2 \cdot \delta \cdot \operatorname{tg}(\eta_{пред}) + r \cdot \cos(\eta_{пред})}{\cos(\eta_{пред}) \cdot \operatorname{tg}(\eta_{пред})^2 - 2 \cdot \operatorname{tg}(\eta_{пред}) + \cos(\eta_{пред})} \quad (6)$$

Анализ зависимостей (5) и (6), с учетом неравенства (2) и выражения (4) для определения эмпирического коэффициента  $\kappa$ , с учетом возможных параметров подаваемой на обмолот ленты льна позволил установить наиболее рациональные значения радиуса ротора ( $R = 0,35$  м) и радиуса защитного кольца ( $r = 0,12$  м).

Для определения параметров бичей ротора была рассмотрена схема (рис. 3), отражающая взаимное расположение двух соседних бичей. Бич ротора представляет собой объемную фигуру сложной конфигурации: смещенный относительно радиальной оси ротора вниз на величину радиуса  $r$  защитного кольца, он расширяется на величину  $\beta_6$  по мере приближения к оси вращения  $O$ , передняя поверхность бича имеет угол установки  $\alpha_n$ , а боковая поверхность имеет угол наклона  $\alpha_6$ .

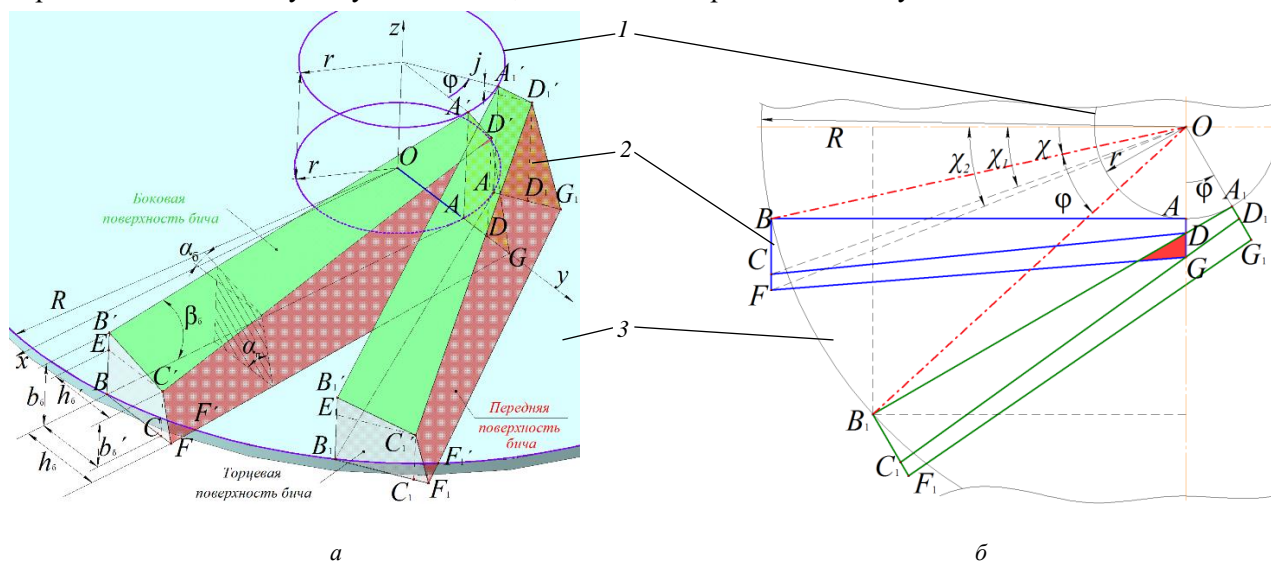


Рис. 3. Схема к определению параметров бича: *a* – пространственная схема расстановки бичей на роторе; *б* – элемент ротора – вид сверху; 1 – защитное кольцо; 2 – бич; 3 – ротор

Ширину бича  $b'_6$ , определяемую его передней поверхностью, найдем по зависимости

$$b'_6 = -\frac{b_6 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_n) - h_6 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_6) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_n)}{\operatorname{tg}(\alpha_6) - \operatorname{tg}(\alpha_n)}, \quad (7)$$

где  $b_6$  – ширина основания бича, м;  $\alpha_n$  – угол наклона передней поверхности бича, рад;  $h_6$  – высота основания бича, м;  $\alpha_6$  – угол наклона боковой поверхности бича, рад.

Высоту бича  $h'_6$ , определяемую его боковой поверхностью, найдем по зависимости:

$$h'_6 = h_6 - \frac{b'_6}{\operatorname{tg}(\alpha_n)}. \quad (8)$$

Величине подъема боковой поверхности бича  $j$  определим по зависимости:

$$j = \frac{b_6 + \operatorname{tg}(\beta_6) \cdot \sqrt{R^2 - r^2} - \frac{h_6 \cdot b'_6}{h_6 - h'_6}}{\frac{b'_6}{\operatorname{tg}(\alpha_6) \cdot (h_6 - h'_6)} - 1}. \quad (9)$$

Угол  $\chi$  между радиус-вектором точки  $B$  и его проекцией на ось  $Ox$  определим по зависимости:

$$\chi = \arccos\left(\frac{\sqrt{R^2 - r^2}}{R}\right). \quad (10)$$

Угол  $\chi_1$  между радиус-вектором точки  $C$  и его проекцией на ось  $Ox$  определим по зависимости:

$$\chi_1 = \arccos\left[\frac{\sqrt{R^2 - r^2}}{\sqrt{\sqrt{R^2 - r^2} + (r + h'_6)^2}}\right]. \quad (11)$$

Угол  $\chi_2$  между радиус-вектором точки  $F$  и его проекцией на ось  $Ox$  определим по зависимости:

$$\chi_2 = \arccos\left[\frac{\sqrt{R^2 - r^2}}{\sqrt{\sqrt{R^2 - r^2} + (r + h_6)^2}}\right]. \quad (12)$$

Высоту защитного кольца  $h_k$  определим как:

$$h_k = b_6 + \sqrt{R^2 - r^2} \cdot \operatorname{tg}(\beta_6). \quad (13)$$

Полученные теоретико-эмпирические зависимости для определения радиуса ротора и радиуса защитного кольца роторного бильно-вычесывающего устройства с учетом результатов исследований поперечного угла подъема боковой поверхности бича  $0,47$  рад ( $27^\circ$ ), поперечного угла подъема передней поверхности бича  $1,4$  рад ( $80^\circ$ ) и ширины основания бича  $0,055$  м [15], позволяют установить геометрические параметры устройства.

Кинематические характеристики работы обмолачивающего устройства определяются показателем интенсивности воздействия  $q$ .

$$q = \frac{v_p \cdot k_6 \cdot b_6 \cdot \lambda}{\pi \cdot v_{\text{тр}} \cdot R}, \quad (14)$$

где  $v_p$  – окружная скорость вращения периферийной части ротора, м/с;  $k_6$  – количество установленных на роторе бичей, шт;  $\lambda$  – коэффициент заполнения молотильного пространства,  $\lambda = 0,7 \dots 0,85$  [16];  $v_{\text{тр}}$  – скорость зажимного транспортера, м.

Из выражения (14) видно, что интенсивность воздействия на ленту льна зависит от соотношения окружной скорости вращения ротора и скорости зажимного транспортера, а также геометрических параметров ротора и коэффициента заполнения молотильного пространства.

### Заключение

По результатам проведенных исследований получены теоретико-эмпирические зависимости позволившие определить радиус ротора ( $0,35$  м) и радиус защитного кольца ( $0,12$  м) роторного бильно-вычесывающего устройства. Разработана методика определения зависимости для определения коэффициента учитывающего удлинение стеблей в ленте льна под действием продольных сил, возникающих во время работы обмолачивающего устройства и установлена его эмпирическая зависимость.

Получены аналитические зависимости для определения параметров бичей как объемной фигуры, исходя из ширины основания бичей, диаметра ротора, поперечного угла подъема боковой поверхности бича, продольного угла подъема бича, поперечного угла подъема передней поверхности бича и количества установленных на роторе бичей.

Исследование параметров ленты стеблей льна, формируемой рабочими органами прицепного льноуборочного комбайна «Двина 4М» позволило установить, что величина относительного перекоса стеблей в ленте не превышает 0,188 рад (12 град).

По результатам однофакторных поисковых экспериментов обмолота лент льна роторным бильно-вычесывающим устройством установлены рациональные значения параметров бича: поперечный угол подъема боковой поверхности бича 0,47 рад (27°); поперечный угол подъема передней поверхности бича 1,4 рад (80°); ширина основания бича 0,055 м.

Получена аналитическая зависимость, устанавливающая связь между интенсивностью воздействия на ленту льна с конструктивными параметрами роторного бильно-вычесывающего устройства (радиус ротора, ширина основания бича, количество установленных бичей на роторе) и его кинематическими параметрами (окружная скорость вращения периферийной части ротора и скорость движения зажимного транспортера).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ механизированных технологий уборки и первичной переработки льна / В. А. Шаршунов [и др.] // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 2. – С. 137–141.
2. Основы расчета рабочих органов машин и оборудования для производства семян льна / В. А. Шаршунов, В. Е. Круглень, А. Н. Кудрявцев [и др.]. – Горки: БГСХА, 2016. – 156 с.
3. Шаршунов, В. А. Анализ обеспеченности льносеющих хозяйств республики Беларусь техническими средствами для уборки льна-долгунца / В. А. Шаршунов, В. А. Кожановский, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 4. – С. 150–156.
4. Технические средства для уборки льна-долгунца в разрезе перспектив развития льноводческой отрасли / В. В. Азаренко, В. С. Астахов, С. В. Курзенков, О. В. Гордеенко // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 3. – С. 136–139.
5. Казакевич, П. П. Техничко-технологічныя асновы павышэння якасця ляннай трэсты / П. П. Казакевич // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2011. – № 1. – С. 89–93.
6. Ростовцев, Р. А. Повышение качества очеса стеблей льна путем совершенствования технологии и оптимизации параметров и режимов работы очесывающего аппарата: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Р. А. Ростовцев. – Санкт-Петербург-Павловск, 2003. – 19 с.
7. Анализ устройств для отделения семян льна от стеблей / В. А. Шаршунов, А. С. Алексеенко, М. В. Цайц, В. А. Левчук // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 4. – С. 174–180.
8. Патент 2788696 С1 РФ. Устройство для отделения семенных коробочек и семян льна от стеблей / М. В. Симонов, В. А. Шаршунов, Н. С. Сентюров, М. В. Цайц. заявл. 16.06.2022; опубл. 24.01.2023, Бюл. № 3.
9. Устройство для отделения семенных коробочек льна от стеблей: пат. 21293 Респ. Беларусь, МПК А 01D 45/06 (2006.01) / В. Е. Круглень, В. И. Коцуба, П. Д. Сентюров, А. Д. Сентюров, М. В. Цайц, Г. А. Райлян, И. Л. Подшиваленко; заявитель УО БГСХА. – № а 20130044; заявл. 14.01.2013; опубл. 25.05.2017 // Афіцыйны бюлетэнь / Нацыянальны цэнтр інтэлектуальнай уласнасці. – 2017. – № 4 (117). – С. 57.
10. Зинцов, А. Н. О взаимном расположении ленты растений льна-долгунца и очесывающего аппарата при отдельной уборке // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 3. С. 75–80.
11. Отраслевой регламент. Возделывание и уборка льна-долгунца. Типовые технологические процессы. – Минск: Ин-т системных исследований в АПК НАН Беларуси, 2019. – 12 с.
12. Обоснование рациональной схемы расположения элементов роторного устройства для отделения семенной части от стеблей льна и конструктивных его параметров / С. В. Курзенков, М. В. Симонов, М. В. Цайц, В. И. Коцуба // Вестник НГИЭИ. – 2022. – № 10(137). – С. 7–19. – DOI 10.24412/2227-9407-2022-10-7-19.
13. Обоснование рациональной схемы расположения элементов и конструктивных параметров роторного устройства для отделения семенной части от стеблей льна / М. В. Цайц, С. В. Курзенков, В. И. Коцуба, В. А. Левчук // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 3. – С. 166–173.
14. Ковалев, М. М. Исследование сопротивления стеблей льна отгибу / М. М. Ковалев, А. В. Галкин, В. И. Дмитриев // Проблемы повышения технологического качества льна-долгунца: Материалы Международной научно-технической конференции, Торжок, 02–03 ноября 2004 года. – Торжок: ООО «Фирма Вариант», 2005. – С. 224–229.
15. Цайц, М. В. Поисковые эксперименты процесса обмолота лент льна роторным бильно-вычесывающим устройством / М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2023. – № 1. – С. 156–164.
16. Хайлис, Г. А. Механика растительных материалов / Г. А. Хайлис. Киев: УААН, 2002. – 374 с.