

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ БИЧЕЙ РОТОРНО-БИЛЬНОГО ОБМОЛАЧИВАЮЩЕГО АППАРАТА

**В. А. ШАРШУНОВ, М. В. ЦАЙЦ, В. А. ЛЕВЧУК, С. В. КУРЗЕНКОВ,
А. В. ШИК, И. А. САВЧЕНКО**

*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 20.03.2024)

Обеспечение льносеющих хозяйств качественными семенами районированных сортов является залогом получения стабильных урожаев, важным фактором высокой эффективности хозяйственной деятельности льнозаводов. Льносеющие хозяйства северо-восточных областей Республики Беларусь получение семенного материала осуществляют по комбайновой технологии уборки и первичной переработки льна. Уборка посевов льна при этом осуществляется льноуборочными комбайнами. Для повышения эффективности льноуборочных комбайнов авторами предложено устройство для отделения семенной части льна роторно-бильного типа с радиальным расположением бичей. Бичи ротора, как основной рабочий элемент определяют характер воздействия на обрабатываемый материал и как следствие эффективность предложенного устройства.

В статье приведены аналитические зависимости, описывающие бич как объемной фигуры. Разработана программа расчета параметров бича в системе компьютерной алгебры MathCAD-15, где в качестве исходных данных выступают радиусы ротора и защитного кольца, ширина торцевой поверхности бича, поперечный угол наклона боковой поверхности бича, поперечный угол наклона передней поверхности бича, продольный угол наклона боковой поверхности к плоскости диска.

Приведена методика определения и результаты лабораторных исследований ширины торцевой поверхности бича, поперечного угла наклона боковой поверхности бича, поперечного угла наклона передней поверхности бича.

В результате исследований установлены рациональные значения ширина торцевой поверхности бича (0,05...0,07 м), поперечного угла наклона передней поверхности бича (1,3...1,45 рад) и поперечного угла наклона боковой поверхности бича (0,43...0,53 рад).

Ключевые слова: *лен, роторно-бильный аппарат, геометрические параметры, бич, угол наклона поверхности, обмо-лот, очес, лента льна, комбайновая технология.*

Providing flax-growing farms with high-quality seeds of zoned varieties is the key to obtaining stable yields, an important factor in the high efficiency of the economic activities of flax plants. Flax-growing farms in the north-eastern regions of the Republic of Belarus obtain seed material using combine technology for harvesting and primary processing of flax. Flax crops are harvested using flax harvesters. To increase the efficiency of flax harvesters, the authors proposed a device for separating the seed part of flax of a rotary beater type with a radial arrangement of beaters. The rotor beaters, as the main working element, determine the nature of the impact on the material being processed and, as a consequence, the effectiveness of the proposed device.

The article presents analytical dependencies that describe the beater as a three-dimensional figure. A program has been developed for calculating the parameters of the beater in the computer algebra system MathCAD-15, where the initial data are the radii of the rotor and the protective ring, the width of the end surface of the beater, the transverse angle of inclination of the side surface of the beater, the transverse angle of inclination of the front surface of the beater, the longitudinal angle of inclination of the side surface to disk plane.

We have presented methods for determining and results of laboratory studies of the width of the end surface of the beater, the transverse angle of inclination of the side surface of the beater, and the transverse angle of inclination of the front surface of the beater.

As a result of the research, rational values were established for the width of the end surface of the beater (0.05...0.07 m), the transverse angle of inclination of the front surface of the beater (1.3...1.45 rad) and the transverse angle of inclination of the side surface of the beater (0.43...0.53 rad).

Key words: *flax, rotary beater, geometric parameters, beater, surface inclination angle, threshing, stripping, flax band, combine technology.*

Введение

Уборка льна-долгунца – это цепочка взаимосвязанных операций. Уровень совершенства каждой операции определяет условия следующей за ней операции. Операция отделения семенной части урожая льна-долгунца от стеблей, определяет качество получаемых льносоломки и вороха льна. Предложенная авторами конструктивно-технологическая схема роторно-бильного аппарата [1, 2] в качестве рабочих органов, разрушающих и отделяющих семенную часть от стеблей, использует бичи сложной формы. При работе роторно-бильного аппарата захваченная бичом порция стеблей льна протаскивается в молотильное пространство, сформированное бичами ротора и боковой декой. Форма и размер бича определяют объем захватываемой порции стеблей льна, а также характер взаимодействия бича со стеблями [3, 4].

При разработке роторно-бильного аппарата следует принять во внимание, прямую зависимость толщины ленты льна от количества в ней стеблей, установленную Ростовцевым Р. А. [5]. В свою оче-

редь Ковалев М. А. установил, что число стеблей на одном погонном метре зажимного транспортера определяется густотой стеблестоя и кинематическим показателем работы агрегата [6].

Упругие свойства семенной коробочки льна исследовались В. В. Комаровым [7]. Им установлено, что семенные коробочки льна являются упруго-вязким материалом, и по мере их созревания и высыхания их упругие свойства изменяются в широком диапазоне. При этом усилие отрыва раздавленных коробочек на 0,5–2,5 Н меньше, чем нераздавленных. В работе [8] М. В. Цайцем установлено, что комбинированное воздействие на коробочку льна-долгунца снижает усилие (на 25...40 %) необходимое для ее разрушения, а также уменьшает (на 9...12,5 %) величину деформации.

Авторами С. В. Курзенковым, В. А. Левчуком, М. В. Цайцем получена модель деформации семенной коробочки льна при сжатии ее рабочими органами обмолачивающего аппарата [9], а также предложена зависимость для определения минимального молотильного зазора, образуемого между ними [10]. Также ими была предложена зависимость для определения объема слоя стеблей льна, находящегося под воздействием бича обмолачивающего устройства [11].

Приведенные свойства и характеристики объекта обработки предопределили сложную, многогранную форму бича ротора.

Цель исследований – установить зависимости геометрических параметров бичей роторно-бильного аппарата от физико-механических свойств стеблей льна и технологических параметров ленты льна, подаваемой на обмолот в льноуборочном комбайне. Разработать методику определения параметров бича ротора как объемной фигуры.

Основная часть

При работе роторно-бильного аппарата захваченная бичом порция стеблей льна протаскивается в молотильное пространство, сформированное бичами ротора и боковой декой. Форма и размер бича определяют объем захватываемой порции стеблей льна, а также характер взаимодействия бича со стеблями.

Бич ротора имеет сложную форму и несколько рабочих поверхностей, выполняющих разные функции [3, 4]. Он представляет собой объемную многогранную фигуру. Выделим основные (рабочие) поверхности (границы) бича. К ним следует отнести переднюю, боковую и торцевую поверхности (рис. 1). Передняя поверхность бича наклонена по отношению к плоскости диска на некоторый угол α_n , что позволит обеспечить гарантированный захват стеблей в начале взаимодействия с лентой льна, а по мере продвижения в подроторное пространство – их скольжение по поверхности. Боковая поверхность бича наклонена по отношению к плоскости вращения ротора на некоторый угол α_b , что обеспечивает вытирание семенных коробочек льна о боковую часть деки.

Поместим предполагаемую фигуру бича, установленного на роторе, согласно принятой схеме [12, 13], в систему координат таким образом, чтобы центр координат находился в центре вращения ротора O (рис. 1).

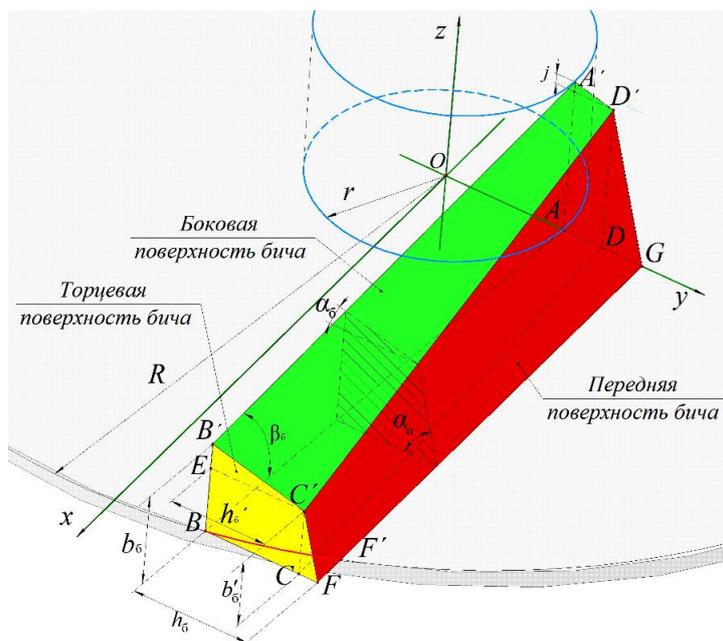


Рис. 1. Схема к определению основных параметров бича

При описании поверхностей и ребер бича использовались сведения из аналитической геометрии.

Плоскость, проходящую через три заданные точки $M_1(x_1; y_1; z_1)$, $M_2(x_2; y_2; z_2)$, $M_3(x_3; y_3; z_3)$, можно описать уравнением:

$$\begin{pmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{pmatrix} = 0, \quad (1)$$

где x, y, z – произвольные координаты текущей точки $M(x; y; z)$ этой плоскости.

Для описания ребер бича использовали уравнение для построения прямой по двум заданным точкам

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1}. \quad (2)$$

Координаты характерных точек бича можно определить как:

$$A = (0; r; 0); \quad (3)$$

$$A' = \left(0; r; \left(b_6 + \sqrt{R^2 - r^2} \operatorname{tg} \beta_6\right)\right); \quad (4)$$

$$B = \left(\sqrt{R^2 - r^2}; r; 0\right); \quad (5)$$

$$B' = \left(\sqrt{R^2 - r^2}; r; b_6\right); \quad (6)$$

$$C = \left(\sqrt{R^2 - r^2}; r + h_6'; 0\right); \quad (7)$$

$$C' = \left(\sqrt{R^2 - r^2}; r + h_6'; b_6'\right); \quad (8)$$

$$D = \left(0; \left(r + \frac{j}{\operatorname{tg} \alpha_6}\right); 0\right); \quad (9)$$

$$D' = \left(0; \left(r + \frac{j}{\operatorname{tg} \alpha_6}\right); \left(b_6 + \sqrt{R^2 - r^2} \operatorname{tg} \beta_6 - j\right)\right); \quad (10)$$

$$F = \left(\sqrt{R^2 - r^2}; r + h_6; 0\right); \quad (11)$$

$$G = (0; r + h_6; 0), \quad (12)$$

где r – радиус защитного кольца, м; b_6 – ширина торцевой поверхности бича, м; R – радиус ротора, м; β_6 – угол между ребрами задней поверхности бича (продольный угол наклона боковой поверхности к плоскости диска), рад; h_6' – высота прямоугольной части торцевой поверхности бича на пересечении передней и боковой поверхностей, м; b_6' – ширина прямоугольной части торцевой поверхности бича на пересечении передней и боковой поверхностей, м; j – разность высот концов ребер боковой поверхности возле защитного кольца, м; α_6 – угол между боковой поверхностью бича и плоскостью вращения ротора (поперечный угол наклона боковой поверхности бича к плоскости диска), рад; h_6 – высота торцевой поверхности бича, м.

Математическая модель передней грани $D'C'FG$ с учетом уравнений (1), (10), (11) и (12) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & (r^3 \operatorname{tg} \beta_6 - R^2 r \operatorname{tg} \beta_6 - R^2 h_6' \operatorname{tg} \beta_6 + r^2 h_6' \operatorname{tg} \beta_6 + jr \sqrt{R^2 - r^2} + j h_6' \sqrt{R^2 - r^2} - \\ & - r b_6' \sqrt{R^2 - r^2} - b_6' h_6' \sqrt{R^2 - r^2} + h_6' z \sqrt{R^2 - r^2} - j z \operatorname{ctg} \alpha_6 \sqrt{R^2 - r^2}) / \\ & / \left(R^2 \operatorname{tg} \beta_6 - r^2 \operatorname{tg} \beta_6 - j \sqrt{R^2 - r^2} + b_6' \sqrt{R^2 - r^2}\right) = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Математическая модель нижней грани $DGF'C$ с учетом уравнений (1), (7), (9) и (12) будет иметь вид:

$$-z\sqrt{R^2-r^2}(h_6-h'_6)=0. \quad (14)$$

Математическая модель боковой грани $A'B'C'D'$ с учетом выражений (1), (4), (6) и (8) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} r^2 h'_6 \operatorname{tg} \beta_6 - R^2 h'_6 \operatorname{tg} \beta_6 - r b_6 \sqrt{R^2-r^2} + r b'_6 \sqrt{R^2-r^2} - b_6 h'_6 \sqrt{R^2-r^2} + \\ + b_6 y \sqrt{R^2-r^2} - b'_6 y \sqrt{R^2-r^2} + h'_6 z \sqrt{R^2-r^2} + h'_6 x \operatorname{tg} \beta_6 \sqrt{R^2-r^2} = 0, \end{aligned} \quad (15)$$

а с учетом выражений (1), (4), (6) и (10) уравнение грани $A'B'C'D'$ будет иметь вид:

$$\begin{aligned} (jr^2 \operatorname{tg} \beta_6 - R^2 j \operatorname{tg} \beta_6 - j b_6 \sqrt{R^2-r^2} + jz \sqrt{R^2-r^2} - jr \operatorname{tg} \alpha_6 \sqrt{R^2-r^2} + \\ + jx \operatorname{tg} \beta_6 \sqrt{R^2-r^2} + jy \operatorname{tg} \alpha_6 \sqrt{R^2-r^2}) \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_6} = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Математическая модель задней грани $AA'B'B$ с учетом уравнений (1), (3), (4) и (5) будет иметь вид:

$$r^3 \operatorname{tg} \beta_6 - R^2 r \operatorname{tg} \beta_6 + R^2 y \operatorname{tg} \beta_6 - r^2 y \operatorname{tg} \beta_6 - r b_6 \sqrt{R^2-r^2} + b_6 y \sqrt{R^2-r^2} = 0. \quad (17)$$

Математическая модель внешней торцевой грани $B'BFC'$ с учетом уравнений (1), (5), (6) и (11) будет иметь вид:

$$b_6 h_6 x - b_6 h_6 \sqrt{R^2-r^2} = 0. \quad (18)$$

Торцевая грань, по сути, не является рабочей поверхностью, она в данном случае выполняет вспомогательную функцию. Она параллельна плоскости zOy и проходит через точку B (точка пересечения нижнего ребра задней поверхности бича и наружной окружности диска ротора). Формирование действительной торцевой поверхности выполним перемещением высоты BB' по кривой BF' .

Математическая модель внутренней торцевой грани $AA'D'G$ с учетом уравнений (1), (3), (4) и (12) будет иметь вид:

$$b_6 h_6 x + h_6 x \operatorname{tg} \beta_6 \sqrt{R^2-r^2} = 0. \quad (19)$$

Пересечение граней бича формируют его ребра. Уравнения ребер бича определим как прямые, проходящие через две заданные точки.

Уравнение ребра GD' будет иметь вид:

$$z = \frac{\operatorname{tg} \alpha_6 (b_6 - j + \operatorname{tg} \beta_6 \sqrt{R^2-r^2})}{j - h_6 \operatorname{tg} \alpha_6} y - \frac{(r + h_6) \operatorname{tg} \alpha_6 (b_6 - j + \operatorname{tg} \beta_6 \sqrt{R^2-r^2})}{j - h_6 \operatorname{tg} \alpha_6}. \quad (20)$$

Уравнение ребра $A'B'$

$$z = b_6 - \operatorname{tg} \beta_6 x + \sqrt{R^2-r^2} \operatorname{tg} \beta_6. \quad (21)$$

Уравнение ребра $B'C'$

$$z = \frac{(b_6 - b'_6)}{h'_6} (y - r) + b_6 \quad (22)$$

Уравнение ребра FC'

$$z = - \left(\frac{b'_6}{h_6 - h'_6} \right) [y - (r + h_6)] \quad (23)$$

Уравнение ребра $C'D'$

$$\frac{x}{\sqrt{R^2-r^2}} = \frac{r - y + \frac{j}{\operatorname{tg} \alpha_6}}{h'_6 - \frac{j}{\operatorname{tg} \alpha_6}} = \frac{j - b_6 + z - \operatorname{tg} \beta_6 \sqrt{R^2-r^2}}{j - b_6 + b'_6 - \operatorname{tg} \beta_6 \sqrt{R^2-r^2}}. \quad (24)$$

Поскольку символьное выражение получаемых уравнений граней бича громоздкое и данными формулами в приведенном виде пользоваться довольно проблематично, для определения параметров бичей была разработана программа расчета в системе компьютерной алгебры MathCAD-15 (рис. 2), где в качестве исходных данных выступают радиусы ротора и защитного кольца, ширина b_6 торцевой поверхности бича, поперечный угол α_6 наклона боковой поверхности бича, поперечный угол α_1 наклона передней поверхности бича, продольный угол β_6 наклона боковой поверхности к плоскости

диска. Для определения параметров бича как объемной фигуры необходимо определить параметры исходных данных.

На изготовленной лабораторной установке (описание лабораторной установки приведено в работе [14]) были проведены однофакторные эксперименты по уточнению рациональных значений: поперечного угла наклона боковой поверхности бича α_6 , поперечного угла наклона передней поверхности бича α_n , ширины торцевой поверхности бича b_6 . Для этого было изготовлено шесть комплектов бичей с поперечным углом наклона боковой поверхности $20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ и 45° и шесть комплектов бичей с поперечным углом наклона передней поверхности $60^\circ, 65^\circ, 70^\circ, 75^\circ, 80^\circ$ и 85° (рис. 3, а и б). Ширину торцевой части бича изменяли путем установки проставок бича различной толщины (рис. 3, в).

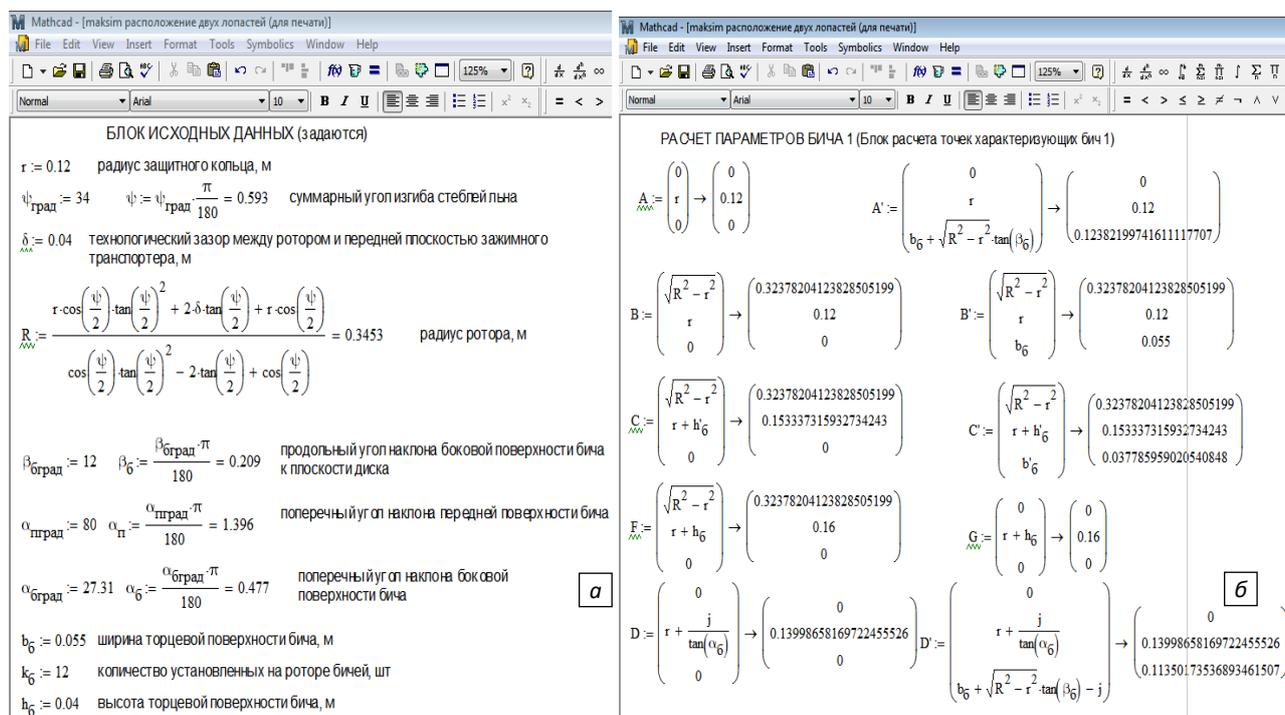


Рис. 2. Расчет параметров бичей ротора: а – блок исходных данных; б – блок расчета точек характеризующих параметры бича



Рис. 3. Бичи с поперечным углом наклона боковой поверхности $20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ и 45° (а), бичи с поперечным углом наклона передней поверхности $60^\circ, 65^\circ, 70^\circ, 75^\circ, 80^\circ$ и 85° (б), ротор с бичами и проставками (в): 1 – ротор; 2 – проставка; 3 – бич.

За функции отклика были приняты чистота обмолота $\text{Ч}_{об}$, т. е. количество семян, выделенных из ленты льна за один проход через молотильный аппарат и выраженное в долях ко всем семенам, находящимся в коробочках в подаваемой на обмолот ленте и степень повреждений стеблей $\text{П}_{ст}$ льна, т. е. отношение числа поврежденных стеблей к общему числу обмолоченных стеблей.

Интервалы варьирования факторов и их границы были определены на основании проведенных теоретических исследований процесса обмолота и априорной информации. Опыты проводились в

трехкратной повторности. По результатам проведенных исследований были получены графические зависимости (рис. 4).

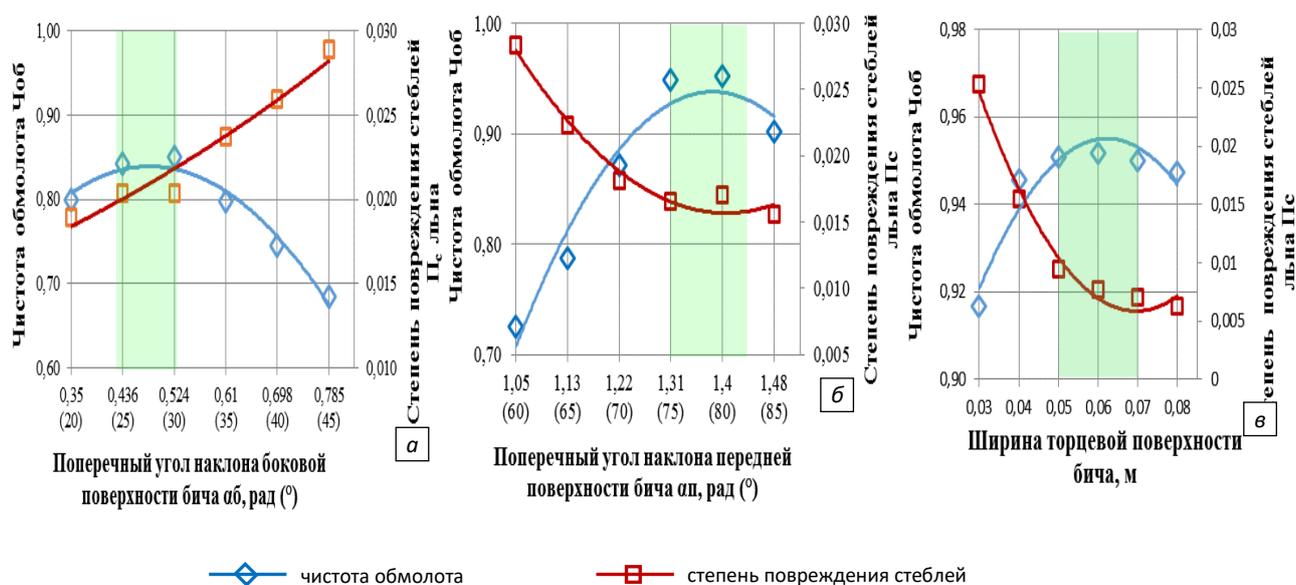


Рис. 4. Влияние поперечного угла наклона боковой поверхности бича (а), поперечного угла наклона передней поверхности бича (б), ширины торцевой поверхности бича (е) на чистоту обмолота и степень повреждения стеблей

Анализ результатов исследований и графической зависимости (рис. 4, а) позволяет сделать вывод о том, что рациональный поперечный угол α_b наклона боковой поверхности бича с учетом его влияния на чистоту обмолота и степень повреждения стеблей находится в диапазоне 0,43...0,53 рад (25°...30°).

Анализ зависимостей чистоты обмолота льна и степени повреждения стеблей от поперечного угла α_n наклона передней поверхности бича (рис. 4, б) показал, что диапазон рациональных значений угла находится в пределе 1,3...1,45 рад (74°...83°).

Анализ полученных результатов исследований влияния ширины торцевой поверхности бича b_b на функции отклика позволяет сделать вывод о том, что диапазон ее рациональных значений находится в пределах 0,05...0,07 м.

Заключение

Получены аналитические зависимости для определения параметров бича как объемной фигуры с учетом ширины торцевой части бича, диаметра ротора, поперечного угла наклона боковой поверхности бича, продольного угла наклона боковой поверхности бича, угла наклона передней поверхности бича к плоскости диска и количества установленных на роторе бичей.

Разработана методика и лабораторное оборудование для определения рациональных параметров ширины торцевой поверхности бича, поперечного угла наклона передней поверхности бича и поперечного угла наклона боковой поверхности бича. В результате проведенных лабораторных исследований установлены рациональные параметры: ширина торцевой поверхности бича – 0,05...0,07 м; поперечный угол наклона передней поверхности бича – 1,3...1,45 рад; поперечный угол наклона боковой поверхности бича – 0,43...0,53 рад.

Предложена методика расчета параметров бича, реализованная в системе компьютерной алгебры MathCAD-15.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Устройство для отделения семенных коробочек льна от стеблей: пат. 21293 Респ. Беларусь, МПК А 01D 45/06 (2006.01) / В. Е. Кругленья, 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 інтэлекту-альнай уласнасці. – 2017. – № 4 (117). – С. 57.
3. Обоснование продольного угла наклона боковой поверхности бича к плоскости диска роторно-бильного обмолочивающего аппарата / М. В. Цайц, В. А. Левчук, В. О. Коцуба и др. // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2024. – № 1. – С. 149–153.
4. Цайц, М. В. Обоснование параметров и режимов работы роторного бильно-вычесывающего устройства для обмолота льна // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2023. – № 2. – С. 167–172.

5. Ростовцев, Р. А. Повышение эффективности уборки льна-долгунца путем разработки технологических процессов и технических средств для их осуществления: дис. ... док. техн. наук: 05.20.01. – Санкт-Петербург-Павловск, 2010. – 444 с.
6. Ковалев, М. М. Плоскостные аппараты льноуборочных машин (конструкция, теория и расчет): Монография / М. М. Ковалев, В. П. Козлов. – Тверское областное книжно-журнальное издательство, 2002. – 208 с.
7. Комаров, В. В. Повышение эффективности процесса отделения семян от стеблей льна путем применения вальцово-гребневого аппарата: дис. ... канд. техн. наук 05.20.01. / В. В. Комаров. – Кострома, 2005. – 141 с.
8. Цайц, М. В. Определение усилия разрушения коробочек льна-долгунца / М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 4. – С. 93–99.
9. Курзенков, С. В. Моделирование деформации формы коробочки льна при ее сжатии между бичом и декой в процессе обмолота / С. В. Курзенков, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 1. – С. 142–147.
10. Курзенков, С. В. Теоретическое обоснование молотильного зазора обмолачивающего устройства линии первичной переработки льна / С. В. Курзенков, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 2. – С. 160–164.
11. Курзенков, С. В. Методика расчета параметров слоя стеблей льна в зоне обмолота / С. В. Курзенков, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 1. – С. 154–159.
12. Обоснование параметров установки зажимного транспортера и деки обмолачивающего устройства линии первичной переработки / В. А. Шаршунов, С. В. Курзенков, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 2. – С. 170–175.
13. 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.
14. Цайц, М. В. Поисквые эксперименты процесса обмолота лент льна роторным бильно-вычесывающим устройством // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2023. – № 1. – С. 156–164.