

МЕХАНИЗАЦИЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 631.3.022:633.521

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЕРЕДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ БИЧА РОТОРНО-БИЛЬНОГО ОБМОЛАЧИВАЮЩЕГО АППАРАТА С ЛЕНТОЙ ЛЬНА

М. В. ЦАЙЦ, В. А. ЛЕВЧУК, С. В. КУРЗЕНКОВ, В. И. КОЦУБА, В. Г. КОВАЛЕВ,
И. А. САВЧЕНКО, Д. Ю. СИМОНЕНКО

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: maksim.caic@gmail.com

(Поступила в редакцию 12.08.2024)

Уборка льна является технологической операцией, от которой зависит качество и объем сбора выращенной продукции. Современный уровень развития уборочной техники не в полной мере отвечает параметрам получаемого урожая и высоким требованиям, предъявляемым к качеству убираемой продукции. Из-за совмещения ответственных операций (одна из которых отделение семенной части от стеблей), особое требование предъявляется к уборке льна льноуборочным комбайном. Применяемые в настоящее время прицепные льноуборочные комбайны Двина-4М и ЛК-4А построены по концепции сформулированной учеными в 1980-х годах и не отвечают современному уровню развития техники, а разработанные в ОАО «Гомсельмаш» самоходные льноуборочные комбайны КЛС-3,5 не нашли широкого применения в льносеющих хозяйствах Республики Беларусь. С целью повышения качества отделения семян от стеблей льна семенных посевов авторами был предложен обмолачивающий аппарат роторного типа.

В статье проведен теоретический анализ взаимодействия передней поверхности бичей роторного аппарата с лентой стеблей льна, получена аналитическая зависимость поперечного угла наклона передней поверхности бича от коэффициента трения стеблей исходя из обеспечения гарантированного захвата порции стеблей. Анализ полученной зависимости при значении влажности стеблей льна 50–60 % позволил установить минимальное значение поперечного угла наклона передней поверхности бича 1,05 рад.

Приведен алгоритм однофакторных анализов зависимости чистоты обмолота и степени повреждения стеблей от поперечного угла наклона передней поверхности бича, а также данные статистической обработки полученных результатов. По результатам проведенных однофакторных экспериментов по критериям степень повреждения стеблей и чистота обмолота установлен диапазон рациональных значения угла наклона передней поверхности бича 1,3...1,4 рад. Установлена высокая обратная корреляционная связь (–0,97) зависимости чистоты обмолота и степени повреждения стеблей от поперечного угла наклона передней поверхности бича.

Ключевые слова: лен, семенная часть, обмолот, очес, роторно-бильный аппарат, геометрические параметры, бичи, комбайновая технология.

Flax harvesting is a technological operation on which the quality and volume of harvested products depend. The current level of development of harvesting equipment does not fully meet the parameters of the resulting harvest and high requirements for the quality of the harvested products. Due to the combination of important operations (one of which is the separation of the seed part from the stems), a special requirement is imposed on the harvesting of flax by a flax harvester. The currently used trailed flax harvesters Dvina-4M and LK-4A are built according to the concept formulated by scientists in the 1980s and do not meet the current level of technology, and the self-propelled flax harvesters KLS-3.5 developed at Gomselmash OJSC have not found wide application in flax-growing farms of the Republic of Belarus. In order to improve the quality of separation of seeds from the stems of flax seed crops, the authors proposed a rotary threshing machine.

The article presents a theoretical analysis of the interaction between the front surface of the rotor beaters and the flax stalk belt, and an analytical dependence of the transverse angle of the front surface of the beater on the coefficient of friction of the stalks based on the guaranteed capture of a portion of the stalks. The analysis of the obtained dependence at a moisture content of flax stalks of 50–60% allowed us to establish the minimum value of the transverse angle of the front surface of the beater of 1.05 rad.

An algorithm for single-factor analysis of the dependence of the purity of threshing and the degree of damage to the stalks on the transverse angle of inclination of the front surface of the beater is presented, as well as the data of statistical processing of the obtained results. Based on the results of single-factor experiments, according to the criteria of the degree of damage to the stalks and the purity of threshing, a range of rational values for the angle of inclination of the front surface of the beater of 1.3...1.4 rad was established. A high inverse correlation (–0.97) was found between the dependence of the purity of threshing and the degree of damage to the stalks on the transverse angle of inclination of the front surface of the beater.

Key words: flax, seed part, threshing, stripping, rotary beater, geometric parameters, beaters, combine technology.

Введение

Уборка льна является технологической операцией, от которой зависит качество и объем сбора выращенной продукции. Резервом в повышении производительности и качества уборки льна-долгунца является развитие технологического процесса отделения семенной части от стеблей льна льноуборочным комбайном. С целью повышения качества обмолота при комбайновой уборке авторами предложен обмолочивающий аппарат роторно-бильного типа [1, 2].

Технологические параметры стеблей и лент льна влияют на протекание процессов, осуществляемых при уборке льна. Исследованием двухосного сжатия одиночного стебля занимались М. М. Ибрагим и Г. А. Аверьянова [3]. Сопротивление стеблей, расположенных в ряд, исследовалось Г. А. Хайлисом [4, 5, 6], Б. П. Можаровым [7], Г. А. Аверьяновой [3], В. С. Брик, В. Е. Логиновым, А. В. Писарчиком. Поперечное сжатие слоя стеблей было рассмотрено Н. Н. Быковым [8].

В процессе отделения семенной части от стеблей льна обмолочивающим устройством, согласно принятой схеме [9], лента стеблей льна подвержена сжатию под действием рабочего органа. Исследования повторных сжатий стеблей льна с чередующимися ослаблениями проводились Г. А. Хайлисом [4]. Им было установлено, что изменения свойств ленты стеблей после прекращения воздействия на нее необратимы. Это обусловлено тем, что стебли не обладают достаточной упругостью [10].

Цель исследований – провести теоретический анализ взаимодействия передней поверхности бича роторно-бильного аппарата с порцией стеблей льна, установить границы варьирования поперечного угла наклона передней поверхности бича. Провести лабораторные исследования и установить диапазон рациональных значений поперечного угла наклона передней поверхности бича.

Основная часть

Угол α_{Π} наклона передней поверхности бича должен быть таким, чтобы в начале его взаимодействия со стеблями льна, бич 2 гарантировано захватывал порцию стеблей 3 и увлекал ее в пространство между ротором 1 и боковой декой (рис. 1) [11, 12].

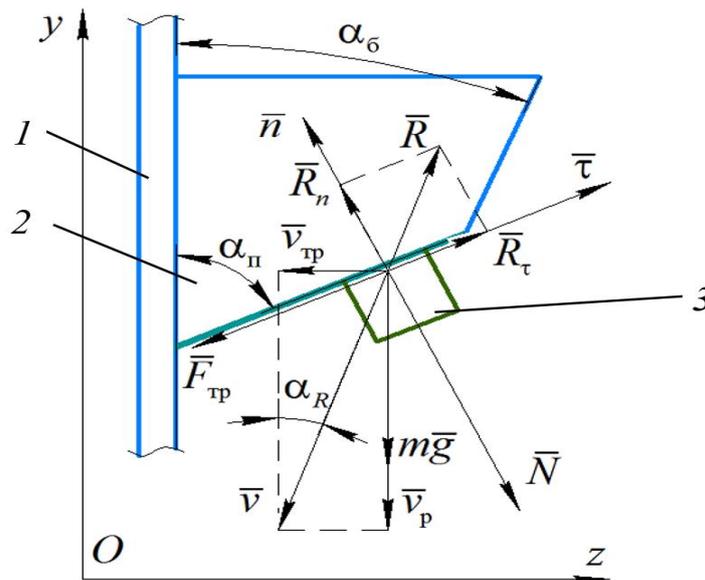


Рис. 1. Поперечное сечение горизонтально-ориентированного бича:
1 – ротор; 2 – бич; 3 – элемент стеблевой массы

Движение порции стеблей массой m вверх по боковой поверхности бича описывается уравнением:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{g} + \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{N} + \vec{R}, \quad (1)$$

где m – масса порции стеблей, кг; \vec{v} – вектор скорости элемента стеблевой массы; t – текущий момент времени, с; g – ускорение свободного падения, м/с²; $\vec{F}_{\text{тр}}$ – сила трения стеблевой массы о наклонную поверхность бича, Н; \vec{N} – сила нормальной реакции бича, Н; \vec{R} – результирующая сила, Н.

В проекции на направление движения стеблевой массы, задаваемое единичным вектором $\vec{\tau}$, векторное уравнение (1) принимает вид:

$$m \frac{dv}{dt} = -mg \cdot \cos(\alpha_n) - F_{\text{тр}} + R_{\tau}, \quad (2)$$

где v – скорость движения стеблевой массы, м/с; α_n – угол наклона передней поверхности бича, рад.

В проекции на направление внешней нормали к бичу, задаваемой единичным вектором \vec{n} (рис.1) уравнение (1) дает:

$$0 = mg \cdot \sin(\alpha_n) - N - |R_n|, \quad (3)$$

$$N = mg \cdot \sin(\alpha_n) - |R_n| = mg \cdot \sin(\alpha_n) + m \frac{dv_n}{dt}, \quad (4)$$

где v_n – проекция абсолютной скорости стеблевой массы на внешнюю нормаль к бичу, м/с.

$$v_n = v_a \cdot \sin(\alpha_n - \alpha), \quad (5)$$

где v_a – абсолютная скорость взаимодействия стеблевой массы с бичом, м/с; α_n – направления вектора абсолютной скорости, рад.

Поскольку скорость бича и ленты стеблей льна взаимно перпендикулярны, то абсолютную скорость можно определить по формуле:

$$v_a = \sqrt{v_6^2 + v_n^2}, \quad (6)$$

а угол α направления вектора абсолютной скорости зависит от соотношения скоростей бича v_6 и ленты льна v_n :

$$\alpha = \arctg\left(\frac{v_n}{v_6}\right). \quad (7)$$

Следовательно, силу трения с учетом уравнений (4), (5) и (6) можно определить по формуле:

$$F_{\text{тр}} = \mu \left(mg \cdot \sin(\alpha_n) + m \frac{d\left(\sqrt{v_6^2 + v_n^2} \cdot \sin(\alpha_n - \alpha_R)\right)}{dt} \right), \quad (8)$$

где μ – коэффициент трения стеблевой массы о поверхность бича.

Тангенциальную составляющую силы R_{τ} , определим как

$$R_{\tau} = m \cdot \frac{dv_{\tau}}{dt}, \quad (9)$$

где v_{τ} – проекция абсолютной скорости на направление движения стеблевой массы, м/с.

$$v_{\tau} = v_a \cdot \cos(\alpha_n - \alpha_R). \quad (10)$$

$$R_{\tau} = m \cdot \frac{d\left(\sqrt{v_6^2 + v_n^2} \cdot \cos(\alpha_n - \alpha_R)\right)}{dt}. \quad (11)$$

Уравнение (2) с учетом (8) и (11) примет вид:

$$m \frac{dv}{dt} = -mg \cdot \cos(\alpha_n) - \mu \left(mg \cdot \sin(\alpha_n) + m \frac{d\left(\sqrt{v_6^2 + v_n^2} \cdot \sin(\alpha_n - \alpha_R)\right)}{dt} \right) + m \cdot \frac{d\left(\sqrt{v_6^2 + v_n^2} \cdot \cos(\alpha_n - \alpha_R)\right)}{dt}. \quad (12)$$

Для обеспечения движения стеблевой массы по боковой поверхности бича:

$$m \frac{dv}{dt} > 0.$$

Уравнение (12) преобразуем, сократив массу, и запишем в виде неравенства

$$0 < -g \cdot \cos(\alpha_n) - \mu g \cdot \sin(\alpha_n) + \mu \frac{d\left(\sqrt{v_6^2 + v_n^2} \cdot \sin(\alpha_n - \alpha_R)\right)}{dt} + \frac{d\left(\sqrt{v_6^2 + v_n^2} \cdot \cos(\alpha_n - \alpha_R)\right)}{dt} \quad (13)$$

Из уравнения (13) получим:

$$\operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\mu}\right) \leq \alpha_n. \quad (14)$$

Неравенство (14) представим в виде графической зависимости (рис. 2).

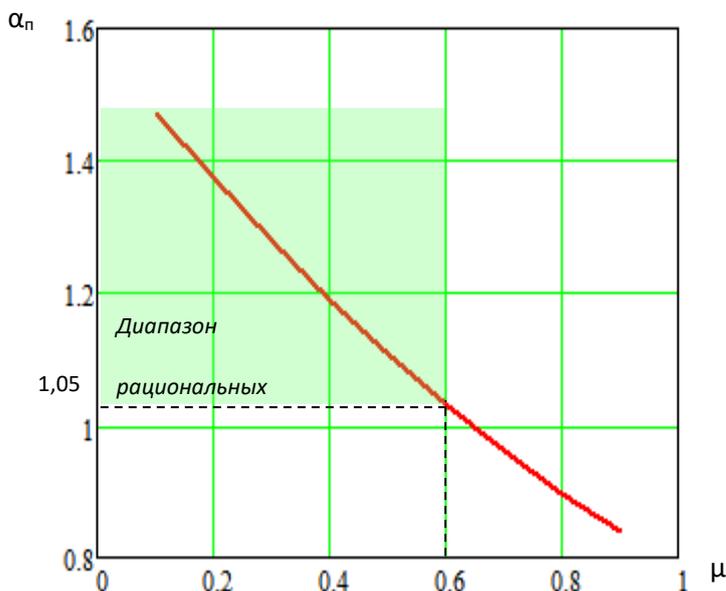


Рис. 2. Зависимость поперечного угла α_n наклона передней поверхности бича от коэффициента трения μ

Анализ зависимости (рис. 2) показал, что для обеспечения захвата стеблей льна (влажностью 50 %...60 % и коэффициентом трения $\mu = 0,6$) бичом минимальное значение угла α_n оставляет 1,05 рад (60°) [13, 14]. Рациональное значение угла α_n наклона передней поверхности бича необходимо уточнить экспериментально.

С целью проверки теоретической зависимости и определения диапазона рациональных значений поперечного угла наклона передней поверхности бича были проведены однофакторные эксперименты. Для этого было изготовлено шесть комплектов бичей с поперечным углом α_n наклона передней поверхности 60° , 65° , 70° , 75° , 80° и 85° . Исследования проводились на специально изготовленной лабораторной установке описание которой приведено в источнике [15].

В качестве результирующих параметров были приняты чистота обмолота ($\mathcal{C}_{об}$) [13, 15]:

$$\mathcal{C}_{об} = 1 - \frac{m_{с.н}}{m_o}, \quad (15)$$

где $m_{с.н}$ – масса семян из неотделенных коробочек, кг; m_o – общая масса семян, прошедшая через обмолачивающий аппарат за опыт, кг;

и степень повреждения стеблей (Π_c) [13, 15]:

$$\Pi_c = \frac{n_{п.ст.}}{n_o}, \quad (16)$$

где $n_{п.ст.}$ – количество поврежденных стеблей льна, шт; n_o – общее число обмолоченных стеблей, шт.

Анализ полученных результатов (табл. 1–2) позволяет сделать вывод о том, что поперечный угол наклона передней поверхности бича α_n оказывает значительное влияние на функции отклика (расчетное значение критерия Фишера зависимости чистоты обмолота от поперечного угла наклона передней поверхности бича ($F_p = 191,7$) больше табличного его значения ($F_T = 3,1$), а для зависимости степени повреждения стеблей от поперечного угла наклона передней поверхности бича ($F_p = 29,9$), что также больше табличного его значения ($F_T = 3,1$)).

Таблица 1. Алгоритм однофакторного анализа зависимости чистоты обмолота от поперечного угла наклона передней поверхности бича α_n , рад

Показатели	Уровни варьирования фактора (поперечный угол наклона передней поверхности бича)						Число уровней $n_{ур} = 6$
	1,05 (60°)	1,13 (65°)	1,22 (70°)	1,31 (75°)	1,4 (80°)	1,48 (85°)	
$\text{Ч}_{об}$	0,732	0,796	0,885	0,936	0,959	0,889	$\Phi = (\sum \Sigma E)^2 / N = 13,45$
	0,712	0,779	0,866	0,946	0,953	0,901	
	0,730	0,787	0,864	0,965	0,944	0,916	
n	3	3	3	3	3	3	$N = 18$
ΣE	2,174	2,362	2,615	2,847	2,856	2,705	$\Sigma \Sigma E = 15,559$
ΣE^2	1,57574	1,85977	2,27910	2,70239	2,71826	2,44010	$\Sigma \Sigma E^2 = 13,575$
$L = (\Sigma E^2) / n$	1,57548	1,85962	2,27885	2,70195	2,71815	2,43973	$\Sigma L = 13,574$
$\Phi = \Sigma E / n$	0,7247	0,7873	0,8716	0,9490	0,9519	0,9018	$F_p = 191,7 > F_T = 3,1$
S	0,0113	0,0086	0,0113	0,0147	0,0075	0,0135	
Δx	0,0162	0,0124	0,0162	0,0211	0,0108	0,0194	

Таблица 2. Алгоритм однофакторного анализа зависимости степени повреждения стеблей от поперечного угла наклона передней поверхности бича α_n , рад

Показатели	Уровни варьирования фактора (угол скоса бича)						Число уровней $n_{ур} = 6$
	1,05 (60°)	1,13 (65°)	1,22 (70°)	1,31 (75°)	1,4 (80°)	1,48 (85°)	
П_c	0,0269	0,022	0,019	0,0168	0,017	0,0155	$\Phi = (\sum \Sigma E)^2 / N = 0,0069$
	0,027	0,02	0,0175	0,017	0,016	0,015	
	0,031	0,025	0,0178	0,0159	0,018	0,0162	
n	3	3	3	3	3	3	$N = 18$
ΣE	0,0849	0,067	0,0543	0,0497	0,051	0,0467	$\Sigma \Sigma E = 0,3536$
ΣE^2	0,002414	0,001509	0,000984	0,000824	0,000869	0,000728	$\Sigma \Sigma E^2 = 0,0073$
$L = (\Sigma E^2) / n$	0,002403	0,001496	0,000983	0,000823	0,000867	0,000727	$\Sigma L = 0,0073$
$\Phi = \Sigma E / n$	0,0283	0,0223	0,0181	0,0166	0,0170	0,0156	$F_p = 29,95 > F_T = 3,1$
S	0,0023	0,0025	0,0008	0,0006	0,0010	0,0006	
Δx	0,0034	0,0036	0,0011	0,0008	0,0014	0,0009	

Зависимость чистоты обмолота льна от угла α_n (рис. 3) представляет собой выпуклую полиномиальную кривую с эксцессом в диапазоне угла α_n 1,35–1,4 рад (77°–80°) и хорошо описывается степенной функцией ($\text{Ч}_{об} = -0,0159 \alpha_n^2 + 0,153 \alpha_n + 0,57$) с коэффициентом детерминации 0,95. При угле α_n , большем 1,4 рад, снижается растаскиваемость ленты льна бичом вдоль боковой деки, что понижает чистоту обмолота. Уменьшение угла α_n от 1,31 до 1,05 приводит к снижению чистоты обмолота от 0,95 до 0,72 по причине некачественного захвата бичом порции ленты льна, вследствие чего происходит сгуживание ленты перед ротором, накопление массы с последующим захватом бичом переуплотненной порции стеблей.

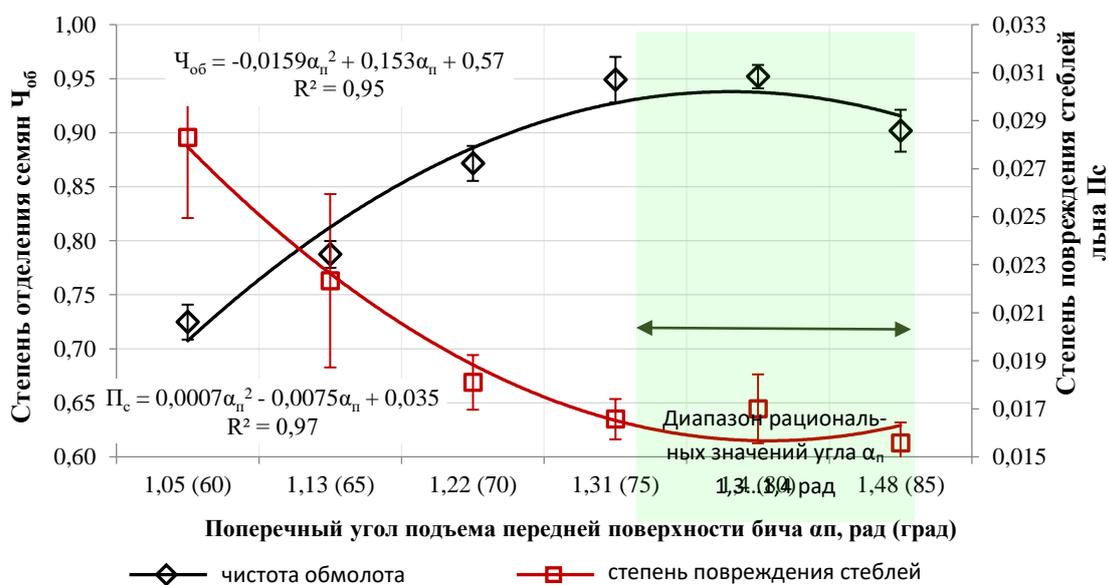


Рис. 3. Влияние поперечного угла наклона боковой поверхности бича на чистоту обмолота и степень повреждения стеблей

Зависимость степени повреждения стеблей от угла α_n представляет собой вогнутую полиномиальную кривую с эксцессом в диапазоне значений 1,3–1,4 рад (74°–80°). Полученная зависимость доста-

точно точно описывается степенной функцией ($P_c = 0,0007\alpha_n^2 - 0,0075\alpha_n + 0,035$) коэффициент детерминации при этом составляет 0,97. С увеличением угла ухудшается захват стеблей бичом, так как формируется более уплотненная порция стеблей и происходит дополнительное сжатие стеблей между бичом и жестко установленной декой. Воздействием на уплотненную порцию стеблей обусловлена и возрастающая степень их повреждения в диапазоне значений угла α_n 1,36–1,05 рад. В дальнейших исследованиях угол α_n фиксировался на уровне 1,4 рад (80°).

Анализ графических зависимостей степени повреждения и чистоты обмолота в исследуемом диапазоне значений поперечного угла наклона передней поверхности бича свидетельствует о асимметричности полученных данных. Корреляционный анализ данных для средних значений степени повреждения стеблей и чистоты обмолота показал высокую обратную связь (коэффициент корреляции –0,97) исследуемых параметров. Из чего следует, что в дальнейших исследованиях можно опираться на значения одного из параметров.

Заключение

В результате теоретического анализа взаимодействия передней поверхности бича роторно-бильного аппарата со стеблями льна была получена аналитическая зависимость для определения поперечного угла наклона передней поверхности бича исходя из условия гарантированного захвата порции стеблей при обмолоте. Анализ полученной зависимости при значении влажности льна 50...60% позволил установить минимальное значение поперечного угла наклона передней поверхности бича $\alpha_n = 1,05$ рад (60°).

Проведенная серия экспериментов на специально изготовленной лабораторной установке с бичами, имеющими поперечный угол наклона передней поверхности 60°, 65°, 70°, 75°, 80° и 85°, позволила определить диапазон рациональных значение угла наклона передней поверхности бича $\alpha_n = 1,3...1,4$ рад (74°–80°).

Установлена высокая обратная корреляционная связь (–0,97) зависимостей чистоты обмолота и степени повреждения стеблей от поперечного угла наклона передней поверхности бича, что позволяет в дальнейших исследованиях опираться на значения одного из параметров.

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. 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.
3. Аверьянова, Г. А. Некоторые закономерности сжатия массы стеблей / Г. А. Аверьянова // Сб. науч. работ аспирантов ЦНИИМЭСХ НЗ СССР. – Минск, 1978. – С. 85–88.
4. Хайлис, Г. А. Механика растительных материалов / Г. А. Хайлис. – К., 1994. – 332 с.
5. Хайлис, Г. А. Механика растительных материалов / Г. А. Хайлис. – К.: УААН, 2002. – С. 160–167.
6. Механико-технологичны властивості сельськогосподарських матеріалів: навч. посібник / Г. А. Хайлис, А. Ю. Горбовий, З. О. Гошко [та ін.]. – Луцьк: Ред.-вид. видш ЛДГУ, 1998. – 268 с.
7. Можаров, Б. П. Исследование, обоснование и разработка аппаратов для обмолота льна-долгунца: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Б. П. Можаров. – М.: ВИС-ХОМ, 1968. – 128 л.
9. Быков, Н. Н. Исследование технологического процесса и устройств для зажима стеблей в льноуборочных комбайнах: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Н. Н. Быков. – Торжок, 1969. – 163 с.
10. 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 [и др.] // Вестник НГИЭИ. – 2022. – № 10(137). – С. 7–19. – DOI 10.24412/2227-9407-2022-10-7-19.
11. Хайлис, Г. А. Теория и расчет льноуборочных машин / Г. А. Хайлис // Труды Великолукского сельхозинститута. Выпуск XXVI. – Елгава, 1973. – 334 с.
12. Обоснование конструкционных параметров бичей роторно-бильного обмолачивающего аппарата / В. А. Шаршунов, М. В. Цайц, В. А. Левчук [и др.] // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2024. – № 2. – С. 147–153.
13. Повышение эффективности уборки льна-долгунца методом обмола семян коробочек на стеблях / С. В. Курзенков, М. В. Цайц, В. А. Левчук [и др.] // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2024. – № 1(23). – С. 276–281.
14. Результаты производственных испытаний и экономическая оценка применения роторного бильно-вычесывающего устройства на льноуборочном комбайне / В. А. Шаршунов, В. Н. Босак, М. В. Цайц [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2023. – Т. 61, № 4. – С. 324–336. – DOI 10.29235/1817-7204-2023-61-4-324-336.
15. Повышение эффективности получения семян льна-долгунца при комбайновой уборке / В. А. Шаршунов, М. В. Цайц, С. В. Курзенков [и др.] // Вестник НГИЭИ. – 2023. – № 7(146). – С. 44–59. – DOI 10.24412/2227-9407-2023-7-44-59.
16. Цайц, М. В. Результаты экспериментальных исследований процесса обмола лент льна роторным бильно-вычесывающим устройством / М. В. Цайц // Вестник НГИЭИ. – 2023. – № 2(141). – С. 19–34. – DOI 10.24412/2227-9407-2023-2-19-34.