

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА КРАТНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ БИЧЕЙ РОТОРНО-БИЛЬНОГО АППАРАТА НА СТЕБЛИ ЛЬНА

В. А. ШАРШУНОВ, М. В. ЦАЙЦ, В. И. КОЦУБА, В. А. ЛЕВЧУК, И. А. САВЧЕНКО

*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 24.06.2025)

Среди операций уборочного цикла льна-долгунца на сохранение качества получаемой продукции существенное влияние оказывает отделение семенной части от стеблей. Наиболее распространенным способом осуществления данного процесса является отрыв. Применяемые при этом очесывающие аппараты имеют ряд недостатков, один из которых – формирование семенного вороха льна с большим количеством путанины, частичное повреждение стеблей льна, особенно при высоком уровне полегания стеблестоя. Наличие путанины в ворохе льна существенно затрудняет его дальнейшую переработку. Решением проблемы образования в льяном ворохе путанины может стать применение роторно-бильного аппарата, отличающегося тем, что выполнен в виде диска, с одной стороны которого установлены косые бичи, а с другой – вычесывающе-транспортирующая щетка, что в сочетании с декой обеспечивает комбинированное ударное, вытирающее и вычесывающее воздействие на ленту льна.

В статье рассмотрены теоретические основы работы роторно-бильного аппарата. В результате теоретических исследований кинематические параметры роторно-бильного аппарата и его конструктивные и кинематические параметры объединены показателем кратности воздействия на ленту льна. Полученный показатель характеризует процесс отделения семенной части урожая от стеблей. Для правильной работы аппарата значение полученного показателя должно быть не ниже единицы. Анализ полученной аналитической зависимости, в диапазоне рабочих скоростей зажимного транспортера, с учетом критической скорости удара по ленте льна, позволил установить минимальную окружную скорость вращения периферийной части ротора, рациональное значение количества установленных на ротор бичей и минимальное значение ширины основания бича.

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

Among the operations of the flax harvesting cycle, the separation of the seed part from the stems has a significant impact on maintaining the quality of the resulting product. The most common way to carry out this process is tearing. The stripping machines used in this case have a number of disadvantages, one of which is the formation of a flax seed heap with a large amount of tangle, partial damage to the flax stems, especially with a high level of lodging of the stalk. The presence of tangle in the flax heap significantly complicates its further processing. The solution to the problem of tangle formation in the flax heap can be the use of a rotary beater, which is distinguished by the fact that it is made in the form of a disk, on one side of which oblique beaters are installed, and on the other - a combing and transporting brush, which in combination with a deck provides a combined impact, wiping and combing effect on the flax tape. The article discusses the theoretical foundations of the rotary beater operation. As a result of theoretical studies, the kinematic parameters of the rotor-beater and its design and kinematic parameters are combined by the indicator of the multiplicity of impact on the flax belt. The obtained indicator characterizes the process of separating the seed part of the crop from the stems. For the correct operation of the device, the value of the obtained indicator should not be lower than one. Analysis of the obtained analytical dependence, in the range of operating speeds of the clamping conveyor, taking into account the critical speed of impact on the flax belt, made it possible to establish the minimum circumferential speed of rotation of the peripheral part of the rotor, the rational value of the number of beaters installed on the rotor and the minimum value of the width of the beater base.

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

Введение

Качество урожая как льнотресты, так и семян льна в значительной мере определяет уборочный цикл [1]. В Беларуси применяются три механизированные технологии уборки льна-долгунца [2]. Основным их отличием на наш взгляд является стадия уборки, при которой производится отделение семенного материала от стеблей [2, 3]. Обеспеченность льнозаводов льноуборочной техникой имеет перекос в сторону льноуборочных комбайнов, что определяет преимущественное применение комбайновой технологии уборки льна для получения посевного материала [4]. Используемые при этом льноуборочные комбайны оборудованы гребневыми очесывающими аппаратами. Сущность технологического процесса отрыва коробочек гребневым аппаратом заключается в проникновении зубьев в слой стеблей, разделении его на полосы, принудительном прочёсывании последних с исправлением дефектов ориентации и нарушением связей между стеблями и спутавшимися семенными коробочками [5, 6]. Жесткое принудительное прочёсывание приводит к недостаткам данного типа устройств [6, 7].

С целью повышения чистоты обмолота лент льна, снижение повреждения стеблей и отхода их в путанину по комбайновой технологии авторами предложена конструкция роторно-бильного аппарата для отделения семенной части урожая от стеблей [8, 9, 10]. Существенное влияние на качество отделения семенных коробочек и семян льна (чистота обмолота, степень травмирования семян и стеблей

при отделении семенной части урожая) предложенным роторно-бильным аппаратом имеют: скорость подачи стеблей зажимным транспортером $v_{тр}$, угловая скорость вращения ротора ω_r и их согласование, а также количество установленных на роторе бичей и их ширина. Степень повреждения семян и стеблей льна в основном зависит от частоты вращения ротора и типа рабочего органа [10, 11].

При исследовании отделения семенной части от стеблей льна, необходимо учитывать общие закономерности рабочего процесса разделения сформированной рабочими органами льноуборочного комбайна ленты льна на стебли и семенные коробочки, то есть кинематики процесса. Поскольку задача, в конечном счете, сводится к разделению массы льна на компоненты, а не просто к разрушению связей между ними [13]. В процессе исследований кинематических характеристик очесывающих аппаратов учеными были определены показатели их характеризующие. М. И. Шлыковым [5] получена формула для определения числа прочесов $n_{пр}$, характеризующая процесс отделения семенных коробочек. Б. П. Можаровым [14] впервые была введена новая характеристика процесса – удельное число прочесов, характеризующая чистоту очеса гребневого аппарата независимо от его конструкции. Работы П. Ф. Прибыткова [15] и П. К. Шрамко [16] посвящены выбору оптимального соотношения скорости зажимного транспортера и очесывающего барабана.

Целью данной работы является получение аналитических зависимостей, связывающих конструктивные параметры роторно-бильного аппарата с кинематическими параметрами его работы.

Основная часть

Рабочий процесс предлагаемого аппарата предполагает, что лента стеблей 5 льна в зажатом зажимным транспортером 1 состоянии перемещается через зону обмолота (рис. 1).

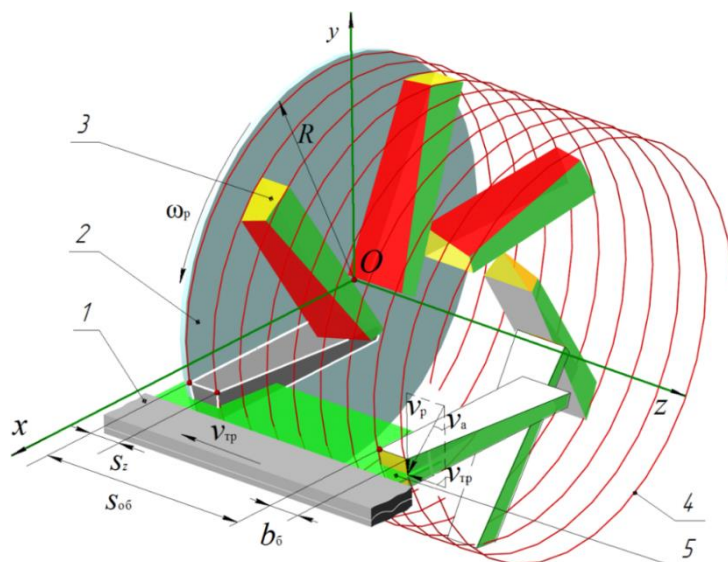


Рис. 1. Схема к определению кинематических параметров роторно-бильного аппарата.
1 – зажимной транспортер; 2 – ротор; 3 – бич; 4 – траектория движения бича; 5 – лента стеблей льна

Зона обмолота формируется на первом этапе поверхностью боковой деки и бичами ротора 3, а на втором этапе торцевой частью бичей 3, ребром ротора 2 и поверхностью нижней деки. Бич 3 увлекает порцию стеблей льна в молотильное пространство, а затем в подроторное пространство. При этом порция льна растаскивается в молотильном пространстве и утоняется, что положительно сказывается на процессе обмолота. Обмолоченная лента попадает под воздействие щетки, которая вычесывает семена и коробочки, и транспортирует их в выгрузной транспортер.

Обмолот происходит при рабочем ходе бича, который начинается с момента воздействия бича на ленту льна и заканчивается при проходе вершин стеблей. Зона взаимодействия рабочего органа со стеблями характеризуется площадью, размер которой зависит от геометрических параметров ротора и установленных на нем бичей, схемы расстановки элементов устройства, а также технологических параметров (зазоров).

При этом на фрагмент ленты льна бичи могут производить несколько воздействий, количество которых определяется соотношением скоростей движения ленты стеблей $v_{л}$, количества установленных бичей и ширины их основания, и скорости вращения ротора v_r . Производительность процесса обмолота и его качество зависят от размеров зоны взаимодействия и удельного числа воздействий бичей на материал.

При работе роторного-бильного аппарата, при установившемся режиме, его рабочие органы – бичи – равномерно вращаются вокруг оси Oz ротора с угловой скоростью ω_p и одновременно к ним подается зажатая в зажимном транспортере лента льна со скоростью $v_{тр}$. Если мысленно остановить зажимной транспортер, а роторному аппарату придать скорость $v_{тр}$, только с противоположным знаком, тогда траектория любой точки бича относительно зажатых в транспортере стеблей льна, будет представлять собой спираль, форма которой зависит от соотношения окружной и поступательной скоростей [0]. Путь $S_{тр}$, пройденный лентой льна, определяется по формуле:

$$S_{тр} = v_{тр} \cdot t, \quad (1)$$

где $v_{тр}$ – скорость зажимного транспортера, м/с; t – время, с.

Для определения пути, пройденного зажимным транспортером за один оборот ротора, определим время одного оборота. Угол поворота ротора φ_p , соответствующий одному его обороту, определяется как $\varphi_p = 2 \cdot \pi$. Так как при установившемся режиме работы ротор вращается с постоянной угловой скоростью, то угол поворота $\varphi_p = \omega_p \cdot t_{об}$. Приравняв левые части, получим:

$$\omega_p \cdot t_{об} = 2 \cdot \pi, \quad (2)$$

где ω_p – угловая скорость вращения ротора, c^{-1} ; $t_{об}$ – время одного оборота ротора, с.

Окружная скорость вращения периферийной части ротора имеет вид $v_p = \omega_p \cdot R$, откуда выразим угловую скорость вращения ротора:

$$\omega_p = \frac{v_p}{R}, \quad (3)$$

где v_p – окружная скорость вращения периферийной части ротора, м/с; R – радиус ротора, м.

Из выражения (2) с учетом (3) найдем время одного оборота ротора:

$$t_{об} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{v_p}. \quad (4)$$

Тогда из уравнения (1) с учетом (4) путь, пройденный зажимным транспортером за один оборот ротора, определим как

$$S_{тр} = v_{тр} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{v_p}. \quad (5)$$

Число воздействий рабочих органов на обрабатываемый материал оказывает большое влияние на процесс обмолота. Необходимо подобрать оптимальное число воздействий, чтобы обеспечить качественный обмолот и избежать травмирования семян и стеблей льна [0, 0]. Для обеспечения полноты обмолота бичи ротора должны воздействовать на каждую единицу длины ленты льна. Длина участка $s_{об}$ ленты стеблей льна, на котором ротор за один оборот воздействует бичами однократно, но без огрехов (без пропусков) можно представить в виде

$$s_{об} = k_6 \cdot b_6 \cdot \kappa_6. \quad (6)$$

где k_6 – количество установленных бичей на роторе, шт.; b_6 – ширина торцевой поверхности бича, м; κ_6 – коэффициент захвата бича, определяемый как b'_6 / b_6 .

Для обеспечения качественного обмолота роторно-бильным аппаратом необходимо кратность воздействий бичами на фрагмент ленты льна q соответствующую условию $q \geq 1$:

$$q = \frac{S_{об}}{S_{тр}}. \quad (7)$$

Данный показатель характеризует среднее количество воздействий бичами роторно-бильного аппарата на стебли обрабатываемой ленты льна.

С учетом выражений (4) и (5) кратность воздействий будет иметь вид:

$$q = \frac{v_p \cdot k_6 \cdot b_6 \cdot \kappa_6}{v_{тр} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R} = \frac{\lambda_p \cdot k_6 \cdot b_6 \cdot \kappa_6}{2 \cdot \pi \cdot R}, \quad (8)$$

где $v_p/v_{тр} = \lambda_p$ – кинематический показатель режима работы роторно-бильного аппарата.

Чтобы предотвратить повреждение стеблей и обеспечить более полное выделение семян, должно быть выдержано соотношение скорости подачи и частоты вращения ротора.

Проведем анализ зависимости (8) при фиксированных значениях ширины торцевой поверхности бича $b_6 = 0,05$ м, коэффициенте захвата бича $\kappa_6 = 0,68$ и радиуса ротора $R = 0,35$ м.

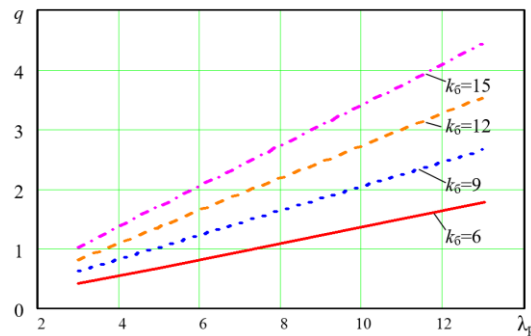


Рис. 2. Зависимость кратности воздействия от кинематического показателя режима работы роторно-бильного аппарата

Из графической зависимости (рис. 2) видно, что по мере уменьшения количества бичей интенсивность роста q при увеличении λ_p снижается. Достаточно для полного воздействия на стебли значению $q = 1$ соответствуют $\lambda_p = 3$ при $k_6 = 15$, $\lambda_p = 3,5$ при $k_6 = 12$, $\lambda_p = 4,8$ при $k_6 = 9$ и $\lambda_p = 7,5$ при $k_6 = 6$.

На рис. 3 представлены зависимости кинематического показателя режима работы от количества бичей при обеспечении воздействия их на все стебли обрабатываемой ленты ($q = 1$).

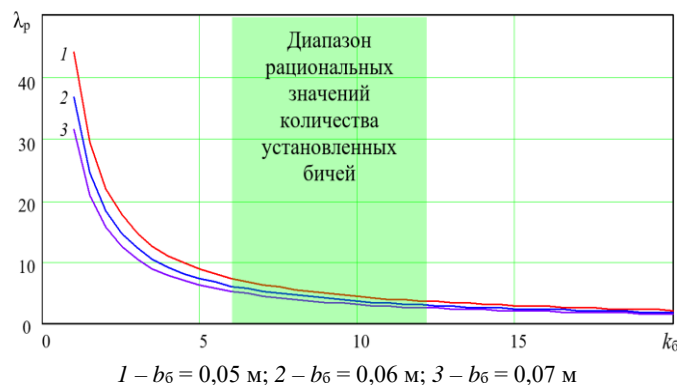


Рис. 3. Зависимости кинематического показателя режима работы от количества бичей ($q = 1$)

Как видно, для диапазона $k_6 \in [1; 5]$ требуется большое (от 37 до 7) значение λ_p , в 2...5 раза большее, чем в диапазоне $k_6 \in [6; 18]$. Для последнего диапазона достаточно небольшого значения кинематического показателя режима работы роторно-бильного аппарата. Следует отметить, что большое количество бичей усложняет конструкцию. С учетом этого при проведении экспериментальных исследований и проектировании роторно-бильного аппарата было принято решение, что установка менее 6 бичей неэффективна, поскольку качественный обмолот требует более высокой частоты вращения ротора, сопровождаемой повышенным повреждением стеблей и семян льна, а более 12 нецелесообразна из-за усложнения конструкции.

Прицепной льноуборочный комбайн «Двина-4М» работает в составе агрегатов на базе тракторов «Беларус» тягового класса 1,4. Частота вращения вала отбора мощности, соответствующая номинальным оборотам двигателя, находится в диапазоне 535...565 об/мин, а скорость зажимного транспортера льноуборочного комбайна – 1,5 м/с.

Согласно принятой схеме, взаимного расположения рабочих органов роторно-бильного аппарата [18] в начале взаимодействия бича с лентой касание его стеблей происходит всей передней по-

верхностью, а направления движения ленты льна и бича ротора взаимно перпендикулярны. В таком случае наибольшей скоростью движения обладают точки ротора, удаленные на расстояние R , – $v_p = \omega_p R$. Абсолютная скорость точки бича, наиболее удаленной от оси O вращения, в начале его взаимодействия со стеблями определяется выражением $v_a = \sqrt{v_6^2 + v_{tp}^2}$.

Эта скорость не должна превышать критической скорости удара по ленте:

$$v_a < v_{кр}, \quad (9)$$

где $v_{кр}$ – критическая скорость удара, при которой начинается разрушение семян (находится в пределах 17–28 м/с [19]), м/с. Уравнение (8) с учетом $v_a = \sqrt{v_6^2 + v_{tp}^2}$ будет иметь вид:

$$q = \frac{\sqrt{v_a^2 - v_{tp}^2} \cdot k_6 \cdot b_6 \cdot \kappa_6}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot v_{tp}}. \quad (10)$$

Проведем анализ полученной зависимости (10) при фиксированных параметрах: радиусе ротора $R = 0,35$ м, скорости движения точки бича, наиболее удаленной от оси вращения $v_a = 17$ м/с (соответствует наименьшему значению критической скорости $v_{кр}$), средней скорости зажимного транспортера льноуборочного комбайна «Двина-4М» $v_{tp} = 1,5$ м/с. Зависимости кратности воздействий бичей ротора на ленту стеблей льна от числа бичей и ширины торцевой поверхности представлены на рис. 4.

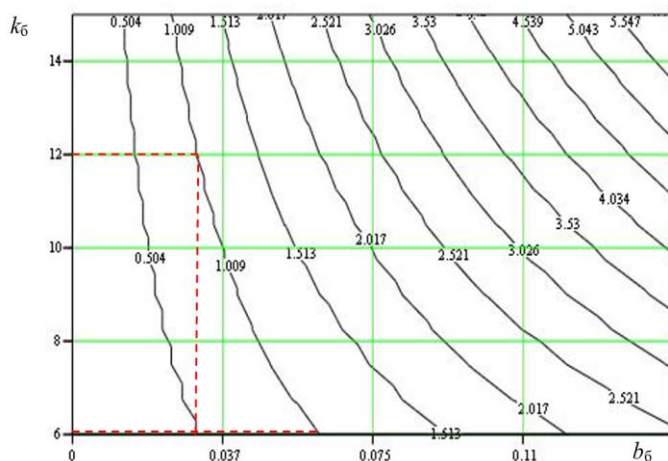


Рис. 4. Зависимости кратности q воздействия от количества k_6 бичей и ширины b_6 торцевой поверхности бича

Анализ зависимостей (рис. 4) показывает, что при критической скорости $v_{кр} = v_a = 17$ м/с для качественной работы роторно-бильного аппарата, удовлетворяющей минимальному требованию $q = 1$, ширина k_6 торцевой поверхности бича должна находиться в пределах от 0,03 м (при установке 12 бичей) до 0,06 м (при установке 6 бичей).

Проанализируем изменение абсолютной скорости v_a движения точки бича, наиболее удаленной от оси вращения, в пределах рабочего диапазона скоростей зажимного транспортера $v_{tp} = 1,3 \dots 2,5$ м/с [20] при установке 12-ти бичей шириной торцевой части 0,03 и 0,06 м (рис. 5).

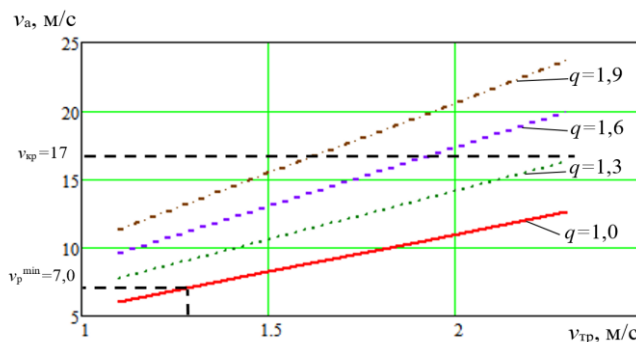


Рис. 5. Зависимости изменения абсолютной скорости v_a движения бича с лентой льна от скорости v_{tp} зажимного транспортера при ширине торцевой поверхности бича $b_6 = 0,03$ м.

Анализ графической зависимости (рис. 5) показывает, что наименьшее значение скорости, удовлетворяющее условию $q = 1$, составляет $v_a = 7,13$ м/с. Такому значению абсолютной скорости v_a и минимальной скорости зажимного транспортера $v_{тр} = 1,3$ м/с соответствует окружная скорость ротора $v_p = 7,0$ м/с.

Заключение

Получена аналитическая зависимость (8), устанавливающая связь кратности воздействий бичей на фрагмент ленты льна с конструктивными параметрами роторно-бильного аппарата (радиусом ротора, шириной торцевой поверхности бича, количеством установленных на роторе бичей) и его кинематическими параметрами (окружной скоростью ротора и скоростью движения зажимного транспортера), что позволило установить минимальную окружную скорость вращения ротора $v_p = 7,0$ м/с, рациональное значение количества бичей $k_b = 6...12$ шт. и минимальное значение ширины торцевой поверхности бича $b_b = 0,03$ м.

Аналитические зависимости, рассмотренные в данной статье, войдут в основу методики обоснования параметров и режима работы предложенной конструкции роторно-бильного аппарата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шаршунов, В. А. Состояние льноводческой отрасли Республики Беларусь и пути повышения ее эффективности / В. А. Шаршунов, А. С. Алексеев, М. В. Цайц // Вестник БГСХА. – 2019. – № 2. – С. 267–271.
2. Шаршунов, В. А. Анализ механизированных технологий уборки и первичной переработки льна / В. А. Шаршунов, А. С. Алексеев, М. В. Цайц, В. А. Левчук. – Вестник БГСХА. – 2017. – № 2. – С. 137–141.
3. Основы расчета рабочих органов машин и оборудования для производства семян льна: монография / В. А. Шаршунов [и др.]. – Горки: БГСХА, 2016. – 156 с.
4. 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.
5. Шлыков, М. И. Льноуборочный комбайн (теория, расчет, конструкция) / М. И. Шлыков. – М.: Машгиз, 1949. – 300 с.
6. Анализ устройств для отделения семян льна от стеблей / В. А. Шаршунов, А. С. Алексеев, М. В. Цайц, В. А. Левчук // Вестник БГСХА. – 2017. – № 4. – С. 174–180.
7. Результаты отсеивающего эксперимента по обмолоту лент льнотресты в линии первичной переработки устройством с эластичным рабочим органом / В. А. Левчук, М. В. Симонов, С. В. Курзенков, М. В. Цайц // Вестник НГИЭИ. – 2022. – № 12(139). – С. 18–30. – DOI 10.24412/2227-9407-2022-12-18-30.
8. Устройство для отделения семенных коробочек и семян льна от стеблей: патент 2788696 С1 РФ / 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 Белорус. гос. с.-х. акад. – № а 20130044; заявл. 14.01.13; опубл. 25.05.17 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2017. – № 4 (117). – С. 57.
10. Сентюров, П. Д. Обоснование кинематических параметров роторного очесывающего аппарата / П. Д. Сентюров, М. В. Цайц, В. Е. Круглень // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2013. – № 1(12). – С. 74–78.
11. 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.
12. 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 / Ростовцев Р. А. – Санкт-Петербург-Павловск, 2003. – 19 с.
13. Черников, В. Г. Исследования параметров и режимов работы аппарата для очеса льна на корню / В. Г. Черников, Р. А. Ростовцев, С. В. Соловьев // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2021. – Т. 15, № 2. – С. 13–18. – DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-2-13-18.
14. Можаров, Б. П. Исследование, обоснование и разработка аппаратов для обмолота льна-долгунца: дис. ... канд. техн. наук / Б. П. Можаров. – М.: ВИСХОМ, 1968. – 128 с.
15. Прибытков, П. Ф. Экспериментальные исследования процесса очеса льна у комбайна ЛК-7: дис. ... канд. техн. наук / П. Ф. Прибытков. – Л.: Пушкин, 1952. – 177 с.
16. Шрамко П. К. Изыскание способов снижения выхода путанины в работе очесывающего аппарата в системе льнокомбайна ЛК-7: дис. ... канд. техн. наук. – Л.: Пушкин, 1955. – 167 с.
17. Ростовцев, Р. А. Повышение эффективности уборки льна-долгунца путем разработки технологических процессов и технических средств для их осуществления: дис. докт. техн. наук / Р. А. Ростовцев. – Тверь, 2010. – 539 с.
18. Курзенков, С. В. Теоретическое обоснование молотильного зазора обмолачивающего устройства линии первичной переработки льна / С. В. Курзенков, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2022. – № 2. – С. 160–164.
19. Пугачев, А. Н. Влияние повышения производительности молотильного аппарата на механические повреждения зерна пшеницы и ржи / А. Н. Пугачев // Тр. Челябин. ин-та механизации и электрификации сел. хоз-ва. – Челябинск, 1973. – Вып. 62. – С. 19–24.
20. Ростовцев, Р. А. Расчет частоты вращения барабана динамически активного очесывающего аппарата монощелевого типа / Р. А. Ростовцев // Достижения науки и техники в АПК. – 2003. – № 4. – С. 25–27.