

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ЭКСЦЕНТРИКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СЕТЧАТУЮ ЛЕНТУ ТРАНСПОРТЕРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОРОХА ЛЬНОКОСТРЫ

В. А. ШАРШУНОВ, С. В. КУРЗЕНКОВ, М. В. ЦАЙЦ, Н. С. СЕНТЮРОВ

*УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: nikolay_senturov@rambler.ru*

(Поступила в редакцию 05.01.2026)

Посевные площади льна в Республике Беларусь варьируются в пределах от 41,9 до 52 тыс. га, что при урожайности 2,9...4,4 т/га льняной тресты обеспечивает от 70 до 110 тыс. т валового сбора льняной костры. Одним из направлений переработки вороха льняной костры является производство прессованного материала в виде пеллет, брикетов или плит. Наличие в ворохе льняной костры минеральных и механических примесей существенно увеличивает износ прессовального оборудования. Данное обстоятельство обуславливает выполнение предварительной очистки вороха перед прессованием.

Поскольку ворох льняной костры является многокомпонентным материалом, включающим разноразмерные элементы, в том числе волокнистые, то его можно отнести к малосыпучему и трудно разделимому материалу. Выделить из такой массы механические включения и обеспечить низкие потери полезного материала сельскохозяйственными машинами массового потребления не представляется возможным. Для достижения высокого качества сепарации авторами предложена конструкция сепаратора, обеспечивающего комбинированное воздействие, сочетающее колебательные воздействия с поступательным перемещением вороха льнокостры, сопровождающимся знакопеременными возмущениями в слое.

В работе рассмотрена кинематическая модель взаимодействия эксцентрикового привода с сетчатой лентой транспортера, предназначенного для очистки вороха льнокостры от минеральных примесей. Представлены зависимости амплитуды воздействия и угла вращения точки эксцентрика от времени и угла поворота, а также показано их применение для управления динамическим воздействием на слой материала. Выполнено теоретическое обоснование режима асимметричных колебаний рабочей поверхности транспортера как ключевого фактора повышения эффективности выделения примесей при сохранении волокнистой структуры материала. Сформулированы теоретические гипотезы, проверка которых должна быть включена в экспериментальные исследования.

Ключевые слова: *льнокостра, очистка, эксцентриковый привод, колебательное воздействие, сетчатая лента транспортера, кинематическая модель, амплитуда колебаний.*

Flax cultivation areas in the Republic of Belarus range from 41,900 to 52,000 hectares, which, with a yield of 2.9 to 4.4 t/ha of flax straw, provides 70,000 to 110,000 tons of gross flax shive harvest. One of the ways of flax shive processing is the production of pressed material in the form of pellets, briquettes, or slabs. The presence of mineral and mechanical impurities in flax shives significantly increases the wear of pressing equipment. This circumstance necessitates preliminary cleaning of the flax shive pile before pressing.

Since flax shive pile is a multi-component material containing elements of various sizes, including fibrous ones, it can be classified as a poorly flowing and difficult-to-separate material. It is impossible to separate mechanical impurities from such a mass and ensure low losses of useful material using mass-market agricultural machinery. To achieve high-quality separation, the authors proposed a separator design that provides a combined action combining oscillatory forces with the progressive movement of the flax shive pile, accompanied by alternating disturbances in the layer.

This paper examines a kinematic model of the interaction between an eccentric drive and a mesh conveyor belt designed to remove mineral impurities from flax shive pile. The dependences of the amplitude of the force and the rotation angle of the eccentric point on time and rotation angle are presented, and their application to controlling the dynamic action on the material layer is demonstrated. A theoretical justification for asymmetric oscillations of the conveyor's working surface has been developed as a key factor in increasing the efficiency of impurity removal while maintaining the material's fibrous structure. Theoretical hypotheses have been formulated, and their testing should be included in experimental studies.

Key words: *flax shive, cleaning, eccentric drive, oscillatory action, mesh conveyor belt, kinematic model, oscillation amplitude.*

Введение

На сегодняшний день в Беларуси около 50–60 % образующегося вороха льнокостры используется для отопления льнозаводов, а также на хозяйственные нужды населения. И все-таки значительная часть ее остается невостребованной, скапливается на территориях предприятий и является источником пожароопасности и экологического загрязнения. Переработка отходов позволяет не только получать различного рода материалы и изделия, но и повысить эффективность производства, а также решить возникающие на льнозаводах экологические проблемы [1]. За последние десять лет посевные площади льна в Республике Беларусь колебались в пределах от 41,9 до 52 тыс. га (рис. 1). При урожайности, примерно 2,9–4,4 т/га льняной тресты валовый сбор льняной костры составлял от 70 до 110 тыс. т.

Существует ряд направлений использования вороха льнокостры, одним из которых является производство пеллет [2]. Однако при производстве пеллет из вороха льнокостры существует проблема

наличия засоренности минеральными примесями, которые как абразив приводят к быстрому износу основных рабочих органов пресса, одних из самых дорогостоящих узлов агрегата прессования [3, 4].

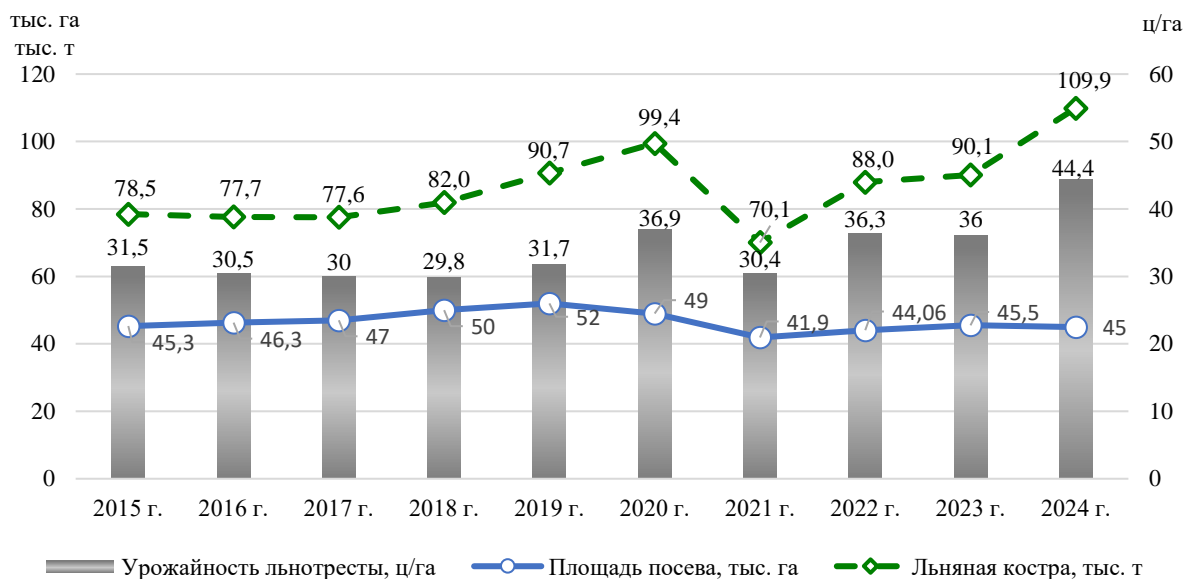


Рис. 1. Динамика изменения посевных площадей, урожайности льностресы и валовых сборов льняной костры в Республике Беларусь

Для повышения качества готовой продукции, снижения скорости изнашивания рабочих органов прессования в устройствах для производства пеллет и сокращения эксплуатационных издержек, необходимо сократить до минимума или исключить из состава вороха льнокостры, компоненты, обладающие абразивными свойствами [3, 5]. К таким компонентам относятся: минеральные примеси, металлические частицы и другие посторонние предметы, а их наличие в составе вороха льнокостры достигает до 30 % [6].

Одним из критических этапов переработки льнокостры является удаление минеральных примесей, нарушающих качество получаемой продукции и создающих дополнительные затраты при производстве. Эффективность процесса очистки во многом определяется характером механического воздействия на материал при его транспортировании. Наиболее перспективным является совмещение транспортирования и очистки, что позволяет снизить затраты энергии и площади оборудования.

Существующие конструкции очистных машин для льнокостры основаны на барабанных, вибрационных и аэродинамических принципах очистки. Несмотря на определенную эффективность, значительная часть устройств характеризуется высокой энергоемкостью, недостаточным разделением загрязнений различной фракционности и частичным разрушением волокнистой структуры. Применение транспортеров с сетчатой лентой позволяет совмещать транспортирование и очистку, однако эффективность таких систем зависит от характера создаваемых колебаний. Наиболее результативным представляется эксцентриковое воздействие, обеспечивающее комбинированный режим подъема, растяжения и резкого встряхивания материала [7, 8].

Исследованиями сепарации трудноразделимых, малосыпучих смесей занимались многие отечественные и зарубежные ученые. основоположниками данного исследования являются работы В. П. Горячкина [9], М. Н. Летошнева [10]. С. А. Маркарян исследовал влияние вибрации транспортной ленты на сепарацию по плотности подаваемого материала, им сделано заключение о том, что применение вибрации транспортной ленты для сепарации по плотности является эффективным и гибким методом разделения материалов [11]. Группа авторов [12] исследовали диапазон частот осуществляющие колебание ленты транспортера, в котором возможны резонансные явления. Влияние комбинированного воздействия сочетания колебательных воздействий с поступательным перемещением вороха льнокостры, сопровождающимся знакопеременными возмущениями в слое, на выделение минеральных и механических примесей из слоя не исследовалось.

Целью исследования является обоснование кинематических зависимостей, определяющих эффективное эксцентриковое воздействие на сетчатую ленту транспортера, обеспечивающее выделение минеральных включений из вороха льнокостры. Для достижения цели решены следующие задачи:

- анализ кинематики работы эксцентрика при противоположном взаимодействии с лентой;

- получение зависимостей амплитудного и углового воздействия от времени и положения эксцентрика;
- выявление закономерностей, обеспечивающих асимметричный характер динамического воздействия на материал;
- формирование рекомендаций по выбору конструктивно-режимных параметров.

Основная часть

Одним из вариантов выделения минеральных и механических примесей из вороха льнокостры представляется сочетание колебательных воздействий с поступательным перемещением вороха льнокостры сопровождающимся знакопеременными возмущениями в слое. Такое воздействие может быть обеспечено предложенной авторами конструкцией в виде транспортера с волнообразной колеблющейся сетчатой лентой [13].

Устройство (рис. 2) состоит из приемного бункера 2, оснащенного дозирующим устройством 3 и ворошилками 1, сетчатого транспортера, состоящего из приводного 7 и натяжного 11 барабанов, сетчатой ленты транспортера 6, вращающихся прутков 5 и эксцентриковых валов 10. Над транспортером установлена система аспирации 4, а под транспортером – скатная доска 9. Нижняя ветвь транспортера оборудована чистиками 8.

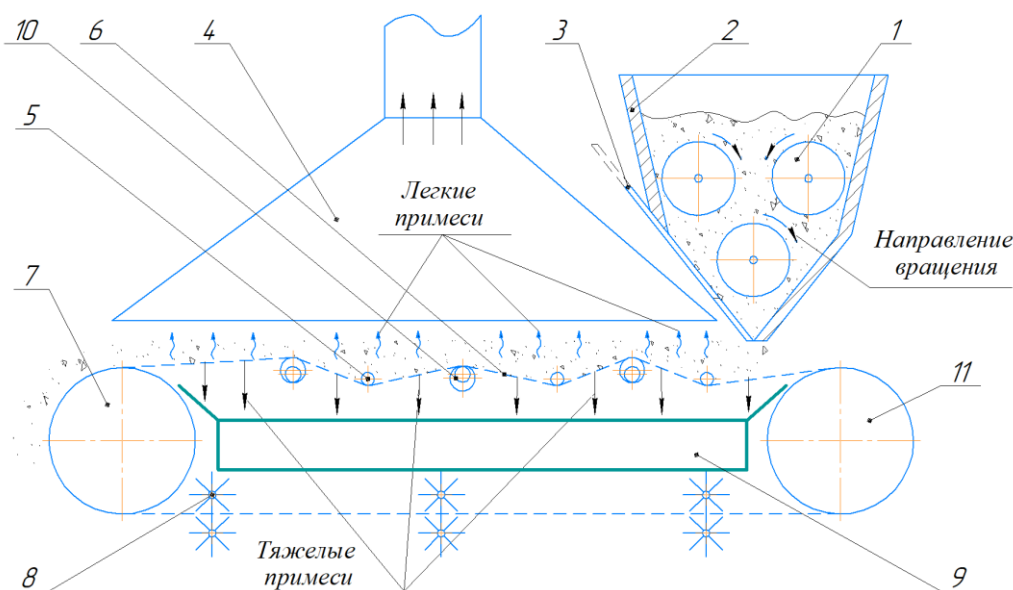


Рис. 2. Схема транспортера с волнообразной колеблющейся сетчатой лентой

В приемный бункер 2 подается ворох льнокостры, который перемешивается ворошилками 1 предотвращающими сводообразование. Дозирующей заслонкой 3 регулируется подача вороха льнокостры на сетчатую ленту транспортера 6. Сетчатая лента транспортера 6 приводится в движение с помощью приводного барабана транспортера 7. За счет эксцентриковых валов 10 сетчатая лента транспортера 6 с ворохом льнокостры приводится в колебательное движение, тем самым разделяя минеральные примеси на тяжелые и легкие. Тяжелые примеси просеиваются через сетчатую ленту транспортера 6, попадают на скатную доску 9 и выводятся из устройства. Легкие примеси выводятся из устройства системой аспирации 4. Очищенный ворох льнокостры, сходящий с сетчатой ленты транспортера 6, готов к дальнейшему использованию. Для предотвращения забивания ячеек сетчатой ленты транспортера 6 на его холостой ветви установлены чистики 8.

Характер воздействия рабочей поверхности сетчатого транспортера на ворох льнокостры по ходу движения материала в рабочей зоне различен и определяется кинематикой движения сетчатой ленты. Исследование выполнено на основе аналитического моделирования движения точки контакта эксцентрика и сетчатой ленты. Принята система координат xOy с началом в точке вращения эксцентрика (рис. 3). Вращение осуществляется с угловой скоростью ω , противоположной направлению движения ленты, движущейся с линейной скоростью v_l . В расчетах принимались во внимание: радиус эксцентрика r , эксцентриситет e , и межосевое расстояние между вращающимися прутками $2 \cdot l_p$. На основе геометрии обкатки ленты по вращающимся пруткам и эксцентриковому профилю сформированы зависимости перемещения ленты, угла поворота эксцентрика и амплитуды воздействия на ленту.

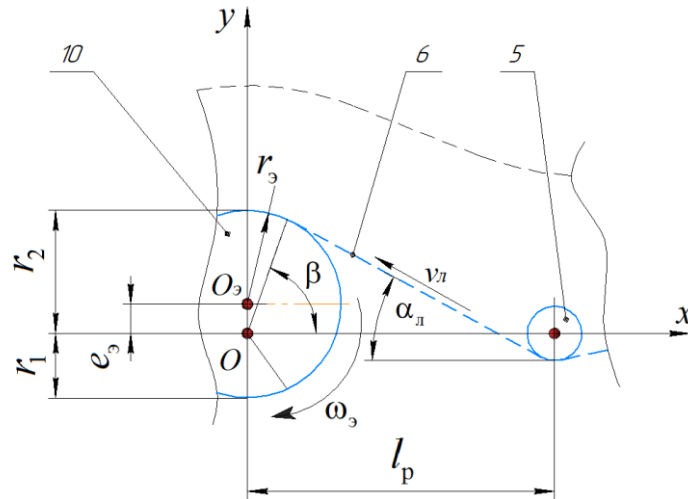


Рис. 3. Схема рабочей зоны эксцентрика

Воздействие эксцентрикового вала на сетчатую ленту, а через нее на слой вороха льнокостры, характеризуется преобразованием вращательного движения в возвратно-поступательное через эксцентричную шейку. Характер такого воздействия определяет скорость вращения вала и геометрия его поверхности, задающая амплитуду. Минимальную r_1 и максимальную r_2 амплитуды воздействия эксцентрикового вала на сетчатую ленту можно представить следующим образом:

$$r_1 = r_3 - e_3, \quad (1)$$

$$r_2 = r_3 + e_3. \quad (2)$$

где r_3 – радиус эксцентрика, м; e_3 – эксцентриситет, м.

Уравнение оснований цилиндрического эксцентрика с учетом его вертикального смещения может быть представлено следующим образом:

$$x^2 + (y - e_3)^2 = r_3^2. \quad (3)$$

Для того, чтобы иметь возможность моделировать процесс взаимодействия эксцентрикового вала с сетчатой лентой и через нее на слой вороха льнокостры, целесообразно проследить связь между кинематическими параметрами движения эксцентрикового вала: временем вращения, углом поворота ее периферийной точки и соответствующей амплитудой передаваемой этой точкой ленте.

При этом зависимости углов поворота периферийной точки эксцентрикового вала (β и β_1) в верхней и нижней частях плоскости xOy от времени вращения можно представить в следующих видах соответственно:

$$\beta(t) = \arctg\left(\frac{Y_B(t)}{t}\right) \cdot \frac{180}{\pi}, \quad (4)$$

$$\beta_1(t) = \arctg\left(\frac{Y_H(t)}{t}\right) \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (5)$$

где $\beta(t)$ и $\beta_1(t)$ – зависимости изменения угла поворота точки эксцентрикового вала, рад;

$Y_B(t) = \sqrt{r_3^2 - t^2} + e_3$ и $Y_H(t) = -\sqrt{r_3^2 - t^2} + e_3$ – зависимости изменений ординаты точки на поверхности эксцентрикового вала, м; t – время, с.

Соответствующие связи амплитуды передаваемой этой точкой ленте со временем ее вращения запишем в виде:

$$\rho(t) = \sqrt{(Y_B(t))^2 + t^2}, \quad (6)$$

$$\rho_1(t) = \sqrt{(Y_H(t))^2 + t^2}, \quad (7)$$

где ρ и ρ_1 – зависимости изменения передаваемых ленте амплитуд, м.

Проведем анализ зависимостей (4–5) и (6–7) при заданных параметрах $r_3 = 0,035$ м, $e_3 = 0,002$ м, $r_1 = 0,033$ м, $r_2 = 0,037$ м и изменяемом времени вращения эксцентрикового вала.

Полученные зависимости (рис. 3) демонстрируют асимметричный характер колебаний: плавный подъем поверхности ленты сменяется ускоренным спадом. В положительной области углового поворота формируется зона предварительного растяжения и рыхления слоя, обеспечивающая ослабление внутренних связей между волокном и минеральными частицами. В отрицательной области углов достигается ударно-встряивающий эффект, вызывающий просыпание примесей на основании разности инерции волокнистых и минеральных частиц. Нелинейная зависимость амплитуды воздействия от угла поворота эксцентрика подтверждает возможность управления интенсивностью очистки за счет конструктивных параметров.

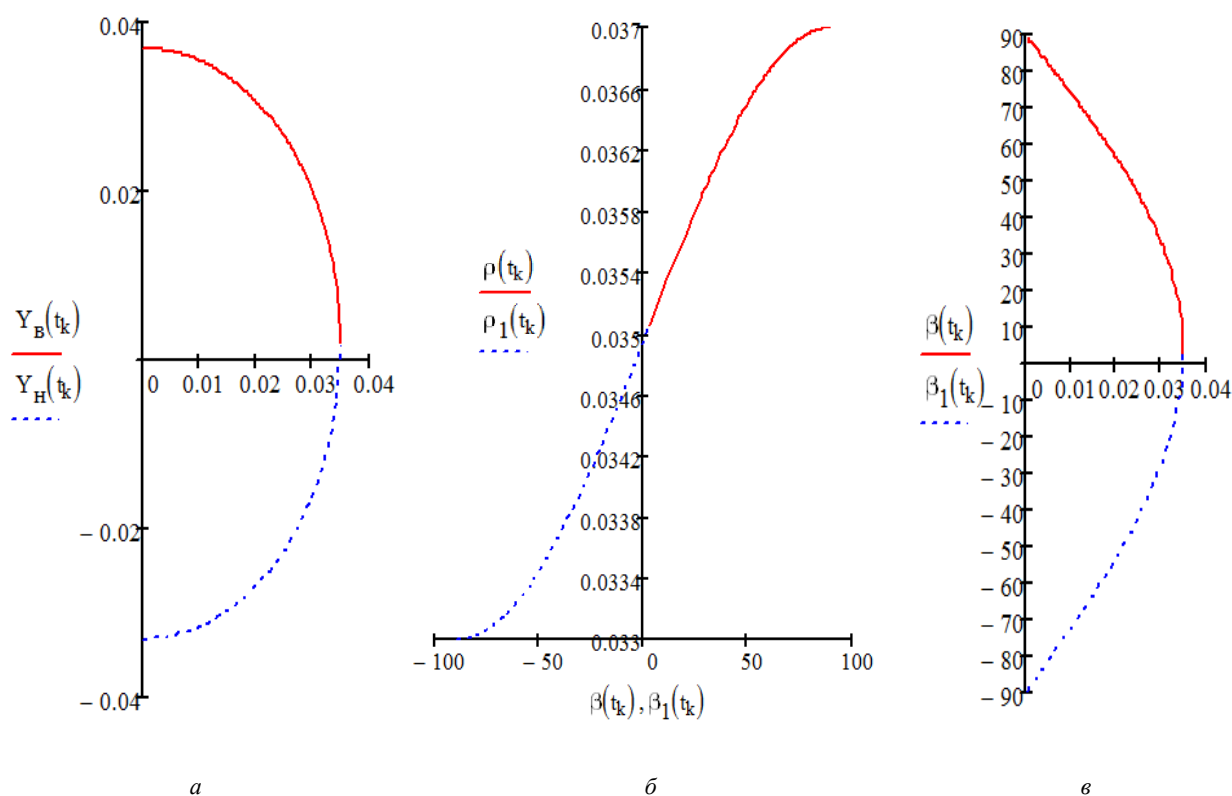


Рис. 4. Графическая интерпретация изменения амплитуды воздействия на ленту (а) в зависимости от времени движения, (б) в зависимости от угла поворота эксцентрика, (в) изменение угла вращения точки эксцентрика в зависимости от времени движения

Асимметричная форма колебаний, обусловленная кинематикой эксцентрика, является целесообразной и функционально необходимой. Равномерные синусоидальные колебания не обеспечивают достаточного выделения загрязнений, тогда как чередование «растяжение – ударное встряхивание» вызывает направленное внутреннее перемешивание слоя льнокостры, минимизируя механическую деструкцию волокон. Таким образом, кинематика эксцентрика выполняет роль селективного воздействия, направленного преимущественно на примеси.

Заключение

В результате выполненного теоретического исследования установлено, что эксцентриковый привод сетчатой ленты транспортера формирует асимметричное колебательное воздействие, функционально целесообразное для очистки вороха льнокостры от минеральных примесей. Чередование фаз разрыхления и ударного встряхивания обеспечивает избирательное воздействие преимущественно на примеси при минимальном нарушении волокнистой структуры материала. Максимальная эффективность процесса достигается при согласовании геометрических параметров эксцентрика, частоты его вращения и кинематики транспортирования.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации очистных устройств для переработки льнокостры и аналогичных трудноразделимых волокнистых материалов. Теоретические выводы требуют дальнейшей экспериментальной проверки в производственных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стош, Е. В. Эколого-экономическая эффективность организации производства топливных брикетов из льнокостры / Е. В. Стош, И. А. Басалай // Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Промышленная экология» / под общ. ред. Басалай И. А.; БНТУ. – Минск, 2015. – С. 385–391.
2. Сентюров, Н. С. Стадии производства пеллет из растительных остатков / Н. С. Сентюров // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сборник научных трудов. – Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2024. – С. 144–147.
3. Шаршунов, В. А. Определение засоренности льнокостры минеральными примесями и способы их выделения / В. А. Шаршунов, В. Е. Круглень, Н. С. Сентюров // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 2. – С. 120–124.
4. Сентюров, Н. С. Выбор рационального способа выделения минеральных примесей из вороха льнокостры / Н. С. Сентюров // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: Сборник научных трудов / Редколлегия: В. В. Гусаров (гл. ред.) [и др.]. Том Выпуск 7. – Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2022. – С. 226–229.
5. Основы расчета рабочих органов машин и оборудования для производства семян льна / В. А. Шаршунов, В. Е. Круглень, А. Н. Кудрявцев [и др.]. – Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2016. – 156 с.
6. Шаршунов, В. А. Определение размерных характеристик компонентов вороха льнокостры / В. А. Шаршунов, Н. С. Сентюров, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2020. – № 3. – С. 169–175.
7. Машины и оборудование для переработки лубяных культур: монография / Под ред. А. И. Иванова. – М.: Агропромиздат, 2018. – 113 с.
8. Петров, Н. П. Динамика очистных машин для льнопроизводства / Н. П. Петров, С. В. Карпов // Техника АПК. – 2021. – №4. – С. 22–29.
9. Горячкин, В. П. Собрание сочинений: в 3 т. / В. П. Горячкин. – М.: Колос, 1965. – Т. 3. – 384 с.
10. Летошнев, М. Н. Сельскохозяйственные машины. Теория, расчет, проектирование и испытание / М. Н. Летошнев. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Сельхозиздат, 1955. – 764 с.
11. Маркарян, С. А. Применение вибрации транспортерной ленты для сепарации по плотности подаваемого материала / С. А. Маркарян // Стандартизация и управление качеством в агропромышленном комплексе: сборник научных статей Всероссийской научно-технической конференции, Курск, 27 октября 2023 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2023. – С. 167–169.
12. Юдаев, Ю. А. Математическое моделирование вибрации ленты транспортера / Ю. А. Юдаев, Ю. Н. Абрамов, Н. В. Цыганов, И. В. Холоден // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева. – 2024. – Т.16, №4. – С. 183–191.
13. Патент № 2752475 С1 Российская Федерация, МПК В07В 4/08, В07В 9/00, D01В 1/10. Устройство для очистки льнокостры: № 2021100782: заявл. 15.01.2021; опубл. 28.07.2021 / М. В. Симонов, В. А. Шаршунов, Н. С. Сентюров, М. В. Цайц; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет».