

## АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ЭКСЦЕНТРИКА В УСТРОЙСТВЕ ОЧИСТКИ ЛЬНОКОСТРЫ С КОЛЕБЛЮЩЕЙСЯ СЕТЧАТОЙ ЛЕНТОЙ

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 14.01.2026)

*В работе исследован рабочий процесс устройства для очистки вороха льнокостры, основанный на колебательном воздействии эксцентрикового вала на сетчатую ленту транспортера. Представлена структурно-функциональная схема транспортирующего узла с выделением зон загрузки, выгрузки и рабочей зоны, последняя из которых включает чередующиеся локальные зоны действия эксцентрика. Разработана математическая модель взаимодействия сетчатой ленты с эксцентриковым валом и прижимными прутками на основе определения общих касательных к окружностям, описывающим элементы механизма. Получены аналитические зависимости, связывающие амплитуду колебаний и угол наклона ленты с конструктивными параметрами рабочего узла и частотой вращения эксцентрика. Установлено, что чередование зон «А» – предэксцентриковой и «В» – постэксцентриковой в предлагаемом оборудовании вызывает внутреннее перемещение слоя льнокостры и способствует более интенсивному выделению минеральных примесей без увеличения потерь основного материала. Полученные результаты формируют основу методического обоснования параметров рабочей зоны эксцентрика и могут быть использованы при разработке и оптимизации оборудования для очистки льнокостры.*

**Ключевые слова:** эксцентриковый механизм, сетчатый транспортер, льнокостра, процесс очистки, минеральные примеси, колебательное воздействие, математическое моделирование, оптимизация конструкции, эффективность разделения, сельскохозяйственное оборудование.

*This paper examines the working process of a flax-shive cleaning device based on the oscillating action of an eccentric shaft on a mesh conveyor belt. A structural and functional diagram of the conveying unit is presented, identifying the loading, unloading, and working zones, the latter of which includes alternating local zones of action of the eccentric. A mathematical model of the interaction between the mesh belt, the eccentric shaft, and the pressure rods is developed based on determining common tangents to the circles describing the mechanism elements. Analytical relationships were obtained linking the vibration amplitude and belt inclination angle with the design parameters of the working unit and the rotational speed of the eccentric. It was found that the alternation of zones "A" (pre-eccentric) and "B" (post-eccentric) in the proposed equipment causes internal displacement of the flax husk layer and promotes more intensive separation of mineral impurities without increasing losses of the main material. The obtained results form the basis for a methodological justification of the parameters of the eccentric working zone and can be used in the development and optimization of flax husk cleaning equipment.*

**Key words:** eccentric mechanism, mesh conveyor, flax husk, cleaning process, mineral impurities, vibrational action, mathematical modeling, design optimization, separation efficiency, agricultural equipment.

### Введение

Одним из важных этапов технологической переработки льняного сырья является очистка льнокостры от минеральных и механических примесей, влияющих на качество конечного продукта и износ оборудования последующих стадий [1, 2, 3]. Ворох льнокостры является многокомпонентным и несыпучим материалом. Традиционные методы очистки основываются на пневмосепарации, гравитационном разделении либо ударно-инерционном воздействии [4, 5, 6]. Однако эффективность существующих устройств нередко ограничивается необходимостью увеличения продолжительности обработки или габаритов машин при повышении степени отделения примесей, что снижает производительность и энергоэффективность технологического процесса [6].

В последние годы возрастает интерес к механическим способам интенсификации процессов очистки посредством контролируемого колебательного воздействия на слой материала. Перспективным направлением является применение эксцентриковых механизмов, которые позволяют формировать переменный режим контактного взаимодействия транспортирующей поверхности с материалом и способствуют нарушению адгезионных связей между льнокострой и минеральными примесями [6]. Несмотря на наличие конструкций, использующих эксцентрики в системах очистки, вопросы обоснования их параметров, величины эксцентриситета, амплитуды и направления колебаний, а также влияния геометрии рабочей зоны на интенсивность отделения примесей остаются недостаточно изученными.

Разработка моделей, описывающих взаимодействие сетчатой ленты с эксцентриковым валом и прижимными элементами, представляет собой основу для создания методики рационального проектирования рабочих органов очистительных устройств. Научная гипотеза исследования заключается в предположении, что последовательное чередование локальных зон эксцентрикового воздействия

вдоль транспортирующей поверхности может вызвать внутреннее перемещение слоя льнокостры и тем самым повысить интенсивность отделения минеральных примесей без увеличения потерь полезного материала.

Исследованиями сепарации трудноразделимых, малосыпучих смесей занимались многие отечественные и зарубежные ученые. Основоположниками данного исследования являются работы В. П. Горячкина [7], М. Н. Летошнева [8]. В работах Гапонюк О. И. утверждается, что для очистки трудноразделимых смесей наиболее рациональным является использование вибропневматического способа сепарирования [9]. А. С. Погореловой получены математические модели сепарирования трудно разделяемых сыпучих смесей с учетом силы воздушного потока [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 возможность различия льняного волокна и льняной костры по биохимическим и морфологическим характеристикам. Для достоверного определения содержания костры необходимо комбинировать различные методы. Биохимический анализ содержания лигнина в сочетании с инфракрасными спектрами и множественной линейной регрессией в сочетании с данными о лигнине и диаметре частиц, дает стабильные результаты. Вместе с тем реализация предложенных методов в промышленных объемах требуют специального оборудования и определенного уровня знаний.

Целью настоящей работы является теоретическое обоснование параметров рабочей зоны эксцентрика в устройстве для очистки вороха льнокостры путем анализа кинематических и конструктивных характеристик механизма и определения их связи с амплитудой колебаний и геометрией транспортирующей поверхности.

#### **Основная часть**

Приняв за основу предложенную схему устройства очистки вороха льнокостры [13], произведем теоретические исследования рабочего процесса.

Из приемного бункера 1 (рис. 1) ворох льнокостры подается на колеблющуюся за счет эксцентрикового вала 2 сетчатую ленту транспортера 3. При расположении осей вращающихся прутков 4 и эксцентрикового вала 2 в одной плоскости, из-за разницы их диаметров образуется наклон сетчатой ленты транспортера 3 под углом  $\alpha_n$  к горизонту.

В предложенной схеме устройства для выделения механических примесей можно выделить условные зоны (рис. 1.), ширина которых определяется технологической шириной транспортера, а длина соответствующими участками:

- зона загрузки – длина участка находится между горизонтальной проекцией оси приводного барабана 5 и оси ближайшего к ней вращающегося прутка;
- рабочая зона – длина участка, ограниченная осями крайних (по обе стороны) вращающихся прутков;
- зона выгрузки – длина участка транспортера, следующая за рабочей зоной, включающая элемент участка сетчатой ленты и натяжной барабан 6.

Рабочая зона, состоит из  $n$ -го количества «рабочих зон эксцентрика». В свою очередь, рабочая зона эксцентрика – это зона действия эксцентрикового вала, ограниченная вращающимися прутками по его обе стороны и включает в себя предэксцентриковую зону «А» и постэксцентриковую зону «В». Зона «А» расположена перед эксцентриковым валом, а зона «В» – за ним.

Зона загрузки должна удовлетворять требованию достаточной и равномерной подачи вороха льнокостры на транспортер. Рабочая зона должна обеспечивать эффективное выделение механических примесей из вороха льнокостры при минимальных ее потерях, при этом не нарушая технологический процесс и иметь минимальные габаритные размеры. Зона выгрузки выполняет функцию отвода и выгрузки очищенного материала.

Последовательное чередование зон «А» и «В» приводит к внутреннему движению слоя льнокостры на сетчатой ленте транспортера 3, что способствует лучшему выделению минеральных примесей.

При вхождении вороха льнокостры в рабочую зону устройства, за счет «противоудара» эксцентрикового вала, происходит выделение механических примесей из вороха льнокостры, которые просыпаются через отверстия сетчатой ленты транспортера 3 на скатную доску. При этом изменение амплитуды колебаний за счет воздействия эксцентрикового вала на сетчатую ленту транспортера 3 обеспечивает широкий диапазон ее колебаний. Это способствует выделению из слоя льнокостры раз-

личных по физико-механическим свойствам примесей. Очищенный ворох льнокостры, сходящий с сетчатой ленты транспортера 3 готов к дальнейшему использованию.

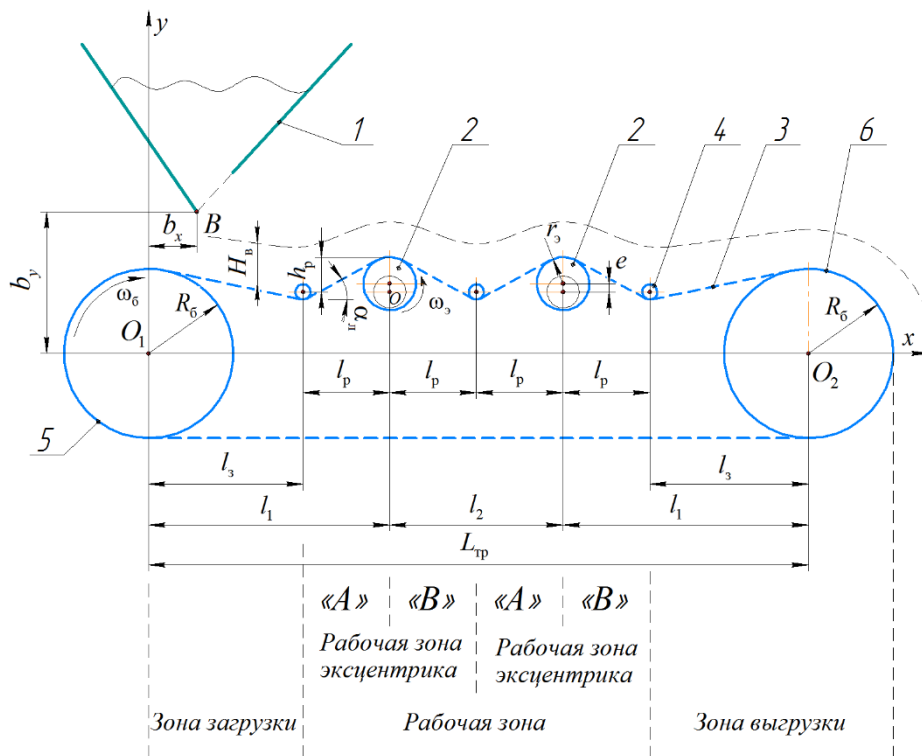


Рис. 1. Схема установки

Характер воздействия рабочей поверхности сетчатого транспортера на ворох льнокостры по ходу движения материала в рабочей зоне различен и определяется кинематикой движения сетчатой ленты. Поскольку рабочая зона состоит из  $n$ -го количества рабочих зон эксцентрика, то рассмотрим один условный элемент данной зоны. Для этого привяжем этот элемент рабочей зоны транспортера к системе координат  $xOy$ . Начало координат системы поместим в точку  $O$ , которая является точкой основания эксцентрикового вала, через которую проходит ось его вращения (рис. 2).

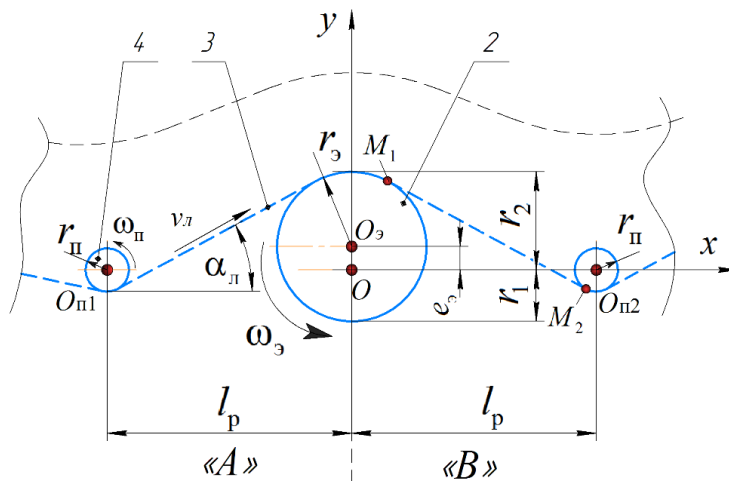


Рис. 2. Схема рабочей зоны эксцентрика

На схеме (рис. 2) прижимные прутки 4 и эксцентриковый вал 2 будем представлять в виде цилиндров с радиусами  $r_{п}$  и  $r_3$  соответственно. Пусть ось вращения эксцентрикового вала и прижимных прутков перпендикулярны плоскости  $xOy$ , а их основания – точки  $O$ ,  $O_{п1}$  и  $O_{п2}$  расположены на оси  $Ox$  так, что точка  $O$  помещена в центре системы координат  $xOy$ , а две другие –  $O_{п1}$  и  $O_{п2}$  равноудалены от  $O$  на величину  $l_p$ . Для организации колебательного воздействия эксцентрикового вала на ленту сместим ось его симметрии вверх по оси  $Oy$  на величину  $e_3$ .

Представим (рис. 1), что сетчатая лента за счет вращения приводного барабана 5 с угловой скоростью  $\omega_6$  и ее натяжения, обеспечиваемого взаимодействием прижимных прутков 4 с эксцентриковыми валами 2, движется по направлению оси  $Ox$  с линейной скоростью  $v_n$ . При этом лента в движении огибает прижимные прутки в нижней их части, а эксцентриковые валы – в верхней их части. Вращение эксцентрикового вала с угловой скоростью  $\omega_n$  осуществляется за счет индивидуального привода в противоход движению ленты. Вращение прижимных прутков происходит за счет взаимодействия с лентой по направлению ее движения.

Поставим перед собой задачу – разработать методику расчета и обоснования предложенного технического решения и его элементов. Эффективность работы предложенного устройства будет определяться соотношением конструктивных параметров: длины участка  $l_p$  (м); угла подъема сетчатой ленты в зоне «А»  $\alpha_n$  (рад); радиуса эксцентрикового вала  $r_3$  (м); величины его эксцентриситета  $e_3$  (м).

Рассмотрим эти параметры во взаимодействии друг с другом.

Минимальную  $r_1$  и максимальную  $r_2$  амплитуды воздействия эксцентрикового вала на сетчатую ленту можно представить следующим образом:

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

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

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

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

Уравнения левого и правого прижимных прутков можно записать соответственно:

$$(x - l_p)^2 + y^2 = r_n^2; \quad (4)$$

$$(x + l_p)^2 + y^2 = r_n^2. \quad (5)$$

Условие взаимодействия сетчатой ленты с эксцентриковым валом и прижимным прутком опишем согласно теории нахождения общей касательной для двух окружностей, заданных в плоскости. В данных условиях можно составить 4 уравнения касательных, отличающихся тем, с какой стороны они касаются окружностей. Их уравнения можно представить в виде:

$$ax_1 + by_1 + c = \pm r_3; \quad (6)$$

$$ax_2 + by_2 + c = \pm r_n, \quad (7)$$

где  $(x_1; y_1)$  и  $(x_2; y_2)$  – координаты центров рассматриваемых окружностей;  $\pm$  – характеризует вид касательных (внешние или внутренние).

Неизвестные параметры  $a, b, c$ , входящие в уравнение касательной можно определить из системы уравнений:

$$\begin{cases} ax_1 + by_1 + c = \pm r_3, \\ ax_2 + by_2 + c = \pm r_n, \\ a^2 + b^2 = 1. \end{cases} \quad (8)$$

Для интересующего нас случая решение данной системы будет иметь вид:

$$a = -\frac{D}{l_p}; \quad b = -\frac{\Delta}{l_p}; \quad c = \delta, \quad (9)$$

где  $\delta$  – амплитуда воздействия эксцентрикового вала на ленту, м;

$$D = \delta + r_n;$$

$$\Delta = \sqrt{l_p^2 - D^2}.$$

Уравнение искомой касательной примет вид:

$$y = -\frac{a}{b}x - \frac{c}{b}, \quad (10)$$

образуя угол  $\alpha_n$  с положительным направлением оси  $Ox$ :

$$\alpha_n = \pi - \operatorname{arctg}\left(\frac{a}{b}\right). \quad (11)$$

Координаты точек касания  $M_1(x_3; y_3)$  и  $M_2(x_n; y_n)$  сетчатой ленты во взаимодействии с эксцентриковым валом и прижимным прутком определяются по соответствующим формулам:

$$x_3 = -a \cdot \delta; y_3 = -b \cdot \delta; x_n = l_p + a \cdot r_n; y_n = b \cdot r_n. \quad (12)$$

Для определенности положим, что взаимодействие сетчатой ленты происходит справа от эксцентрикового вала при минимальной амплитуде колебаний. Тогда моделирование такой ситуации рассмотрено в специализированном пакете MathCad на рис. 3.

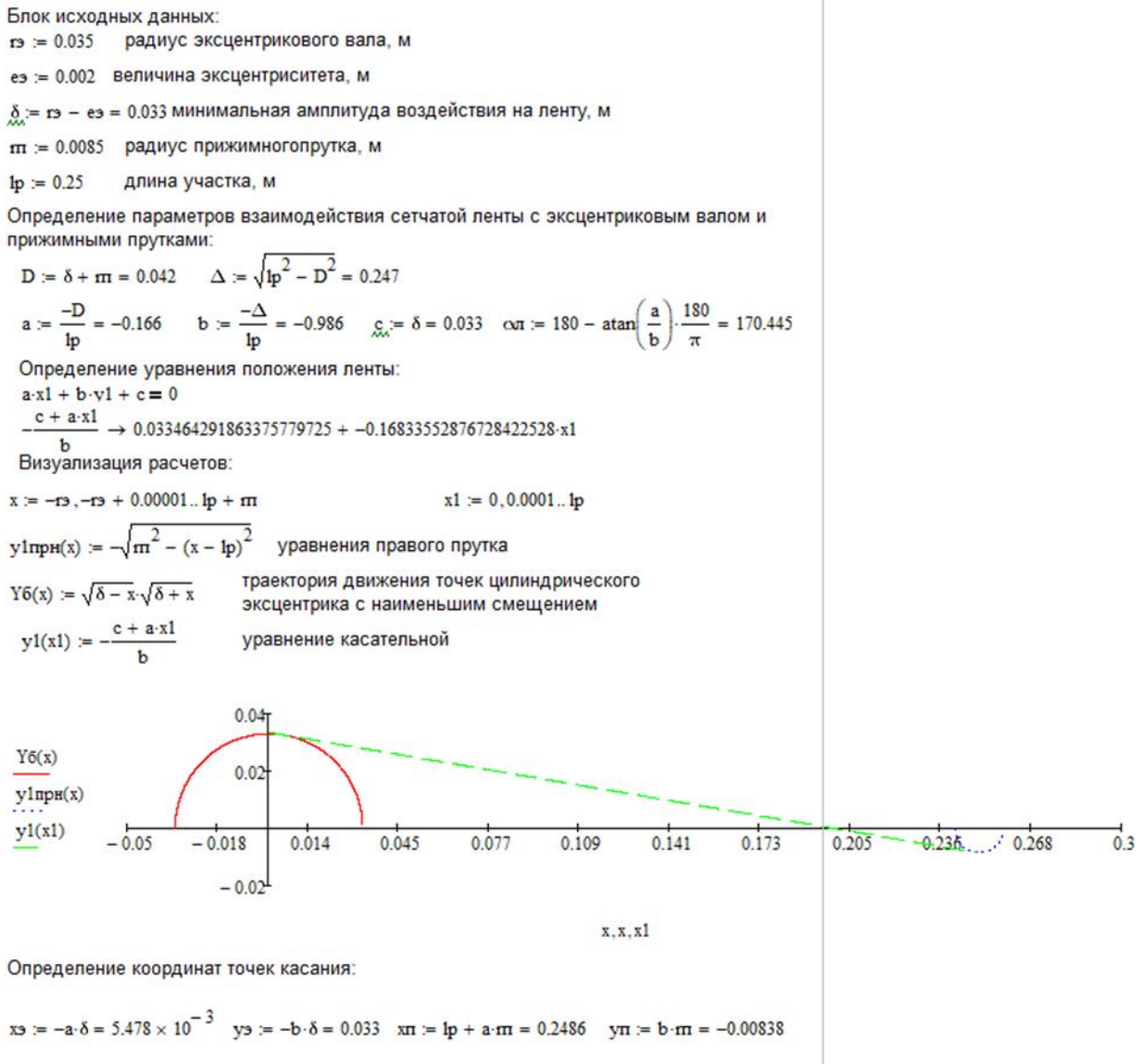


Рис. 3. Моделирование взаимодействия сетчатой ленты с эксцентриковым валом и вращающимся прутком

Анализ графического отображения (рис. 3) свидетельствуют о правильности определения аналитических зависимостей взаимодействия сетчатой ленты с эксцентриковым валом и вращающимся прутком.

## Заключение

Последовательное чередование зон «А» и «В» создает внутреннее перемещение слоя вороха льнокостры и способствует более интенсивному выделению минеральных примесей. Изменение амплитуды колебаний и угла наклона сетчатой ленты в зависимости от конструктивных и кинематических параметров определяет эффективность процесса очистки и позволяет минимизировать потери полезного продукта.

Получены зависимости траектории движения точек цилиндрического эксцентрикового вала и вращающегося прутка, уравнение положения сетчатой ленты транспортера в виде касательной к эксцентриковому валу и вращающемуся прутку. Данные зависимости могут быть использованы для инженерного расчета и оптимизации рабочих органов устройств очистки льнокостры предлагаемой конструкции, что уменьшает трудоемкость конструкторского проектирования и позволяет на этапе компьютерного моделирования определять рациональные параметры механизма. Аналитические зависимости, рассмотренные в представленных материалах, войдут в основу методики обоснования параметров взаимодействия сетчатой ленты транспортера с ворохом льнокостры.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шаршунов, В. А. Состояние льноводческой отрасли Республики Беларусь и пути повышения ее эффективности / В. А. Шаршунов, А. С. Алексеенко, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 2. – С. 267–271.
2. 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.
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. 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.
5. Rentsen B. Characterization of flax shives and factors affecting the quality of fuel pellets from flax shives. – 2010.
6. Гапонюк, О. И. Классификация основных способов сепарирования трудноразделимых смесей / О. И. Гапонюк, Г. А. Мосиенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 6, № 10(60). – С. 55–57.
7. Горячкин, В. П. Собрание сочинений: в 3 т. / В. П. Горячкин. – М.: Колос, 1965. – Т. 3. – 384 с.
8. Летошнев, М. Н. Сельскохозяйственные машины. Теория, расчет, проектирование и испытание / М. Н. Летошнев. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Сельхозиздат, 1955. – 764 с.
9. Пивень, В. В. Повышение производительности сепарирующих линий путем фракционирования исходного материала / В. В. Пивень, О. Л. Уманская, Н. А. Кривчун // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 1. – С. 109–113.
10. Погорелова, А. С. Разработка математической модели сепарирования трудно разделяемых сыпучих смесей с учетом силы воздушного потока / А. С. Погорелова // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–17. – С. 3718–3722.
11. Маркарян, С. А. Применение вибрации транспортной 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. Morgillo L. et al. A multicriteria approach to quantify contaminant shives in industrial batches of flax fibres // Industrial Crops and Products. – 2024. – Т. 218. – С. 119038.
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».