

EDN: PYGRAN

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-24-29



Научная статья

УДК 631.171



Сепарация шрота подсолнечника в вертикальном пневмоканале с колонковыми и батарейными ускорителями

Максим Николаевич Московский,

доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: maxmoskovsky74@yandex.ru;

Станислав Александрович Герасименко,

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: stanislav.mkm@gmail.com;

Виктор Геннадьевич Хамуев,

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: victor250476@yandex.ru;

Сергей Игоревич Борзенко,

младший научный сотрудник,
e-mail: serzhbk@gmail.com

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что воздушная (аспирационная) сепарация частиц по плотности и размеру с помощью воздушного потока – наиболее эффективный и экономически оправданный метод очистки от лузги подсолнечного шрота. Снижение содержания лузги и увеличение концентрации белка позволяет повысить кормовую ценность и расширяет сферы применения шрота, особенно в высокопродуктивном животноводстве. (*Цель исследования*) Повышение эффективности выделения белковой фракции при очистке шрота подсолнечника в вертикальном пневмоканале с батарейными и колонковыми ускорителями воздушного потока и рассекателями обрабатываемого материала. (*Материалы и методы*) Исследования проводили в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ на макете пневмосепарирующего канала. Колонковые и батарейные ускорители воздушного потока обеспечивают равномерное распределение воздушного потока над слоем материала, что позволило повысить экспозицию процесса сепарации и четкость разделения материала. (*Результаты и обсуждения*) Разработанный макетный образец вертикального пневмоканала обеспечивает выход белка не менее 75 процентов и полноту выделения примеси не менее 70 процентов. (*Выводы*) Коэффициент живого сечения ускорителя в макетном образце пневмоканала должен составлять 50-60 процентов, а высота батарейного ускорителя – от 55 до 75 миллиметров. Высота установки батарейного ускорителя над вершинами рассекателей потока обрабатываемого материала должна быть от 160 до 220 миллиметров. Оптимальная удельная нагрузка обрабатываемого материала составляет до 2,0 килограммов на один сантиметр кубический в час. При пропускной способности машины до 2 тонн в час содержание выделяемого компонента (белка) в исходном материале от 35 до 40 процентов.

Ключевые слова: шрот подсолнечника, лузга, очистка, воздушная сепарация, вертикальный пневмоканал, батарейный ускоритель, колонковый ускоритель.

■ **Для цитирования:** Московский М.Н., Герасименко С.А., Хамуев В.Г., Борзенко С.И. Сепарация шрота подсолнечника в вертикальном пневмоканале с колонковыми и батарейными ускорителями // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №3. С. 0-0. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-24-29. EDN: PYGRAN.

Scientific article

Purification of Sunflower Meal in a Vertical Pneumatic Channel Using Column-Type and Battery-Type Air Accelerators

Maksim N. Moskovsky,

Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: maxmoskovsky74@yandex.ru;

Stanislav A. Gerasimenko,

Ph.D.(Eng), senior researcher,
e-mail: stanislav.mkm@gmail.com;

Viktor G. Khamuev,

Ph.D.(Eng), leading researcher,
e-mail: victor250476@yandex.ru;

Sergey I. Borzenko,

junior researcher,
e-mail: serzhbk@gmail.com

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper highlights that air (aspiration) separation of meal particles by density and size using an air flow is the most efficient and economically viable method for removing husks from protein in sunflower meal. Reducing husk content and

increasing protein concentration enhances the feed value and broadens the application scope of the meal, particularly in high-yield livestock farming. (*Research purpose*) The study aims to improve the efficiency of protein fraction extraction during the purification of sunflower meal in a vertical pneumatic channel equipped with battery-type and column-type air accelerators, as well as input flow deflectors. (*Materials and methods*) The research was conducted at the Federal Scientific Agroengineering Center VIM using a model of a pneumatic separation channel. The column-type and battery-type air accelerators ensured uniform airflow distribution across the input material layer, improving separation efficiency and enhancing the precision of input material separation. (*Results and discussion*) The developed model of the vertical pneumatic channel provides a protein yield of at least 75 percent and an impurity removal rate of no less than 70 percent. (*Conclusions*) The live cross-section coefficient of the accelerator in the model pneumatic channel should be maintained at 50–60 percent, and the height of the battery-type accelerator should range from 55 to 75 millimeters. The recommended installation height of the battery-type accelerator above the input flow deflectors is between 160 and 220 millimeters. The optimal specific load of the processed material is up to 2.0 kilograms per cubic centimeter per hour. At a machine throughput of up to 2 tons per hour, the protein content in the raw material ranges from 35 to 40 percent.

Keywords: sunflower meal, husk, purification, air separation, vertical pneumatic channel, battery-type air accelerator, column-type air accelerator.

■ **For citation:** Moskovsky M.N., Gerasimenko S.A., Khamuev V.G., Borzenko S.I. Purification of sunflower meal in a vertical pneumatic channel using column-type and battery-type air accelerators. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N3. 24-29 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-24-29. EDN: PYGRAN.

Подсолнечный шрот – ценный белковый кормовой продукт, получаемый после экстракции масла из подсолнечника [1]. По данным Росстата, в 2024 г. объем производства жмыхов и шротов всех видов масличных культур в России составил 14 617,7 тыс. т, что на 8,7% (на 1171,0 тыс. т) больше, чем в 2023 г. Ожидается дальнейший рост переработки из-за высокого спроса на растительный белок в животноводстве и кормовой промышленности [2].

Шрот подсолнечника содержит значительное количество лузги (кожура семян), что влияет на его питательную ценность и усвояемость [3, 4]. Одним из способов отделения лузги является воздушная сепарация [5]. Наиболее эффективны сепараторы с вертикальным пневмоканалом, так как частицы находятся во взвешенном состоянии дольше, чем в сепараторах с горизонтальным пневмоканалом [6–8]. Однако при подаче измельченного шрота подсолнечника в пневмоканал сепаратора под воздействием вертикально-восходящего воздушного потока можно наблюдать неравномерное распределение материала по высоте пневмоканала, что влияет на качество разделения. В связи с этим стоит задача создания оптимальных условий для наиболее равномерного распределения материала в вертикальном пневмоканале [9, 10].

Цель исследования. Повышение эффективности выделения белковой фракции при очистке шрота подсолнечника в вертикальном пневмоканале с батарейными и колонковыми ускорителями воздушного потока и рассекателями обрабатываемого материала.

Материалы и методы. Исследования проводили на макетном образце с пневмосепарирующими каналами разной высоты для выделения белковой фрак-



Рис. 1. Расположения ускорителей и рассекателей в пневмоканалах макетного образца: 1 – колонковый ускоритель; 2 – батарейный ускоритель; 3 – рассекатели
Fig. 1. Arrangement of accelerators and deflectors in the pneumatic channels of the prototype: 1 – column-type accelerator; 2 – battery-type accelerator; 3 – deflectors

ции и лузги при различном давлении воздушного потока. В пневмоканалах были установлены рассекатели движущегося потока обрабатываемого материала над поддерживающим ситом (рис. 1) [11].

Устройством, сочетающим функцию равномерного распределения давления воздуха над слоем материала и ускорения воздушного потока, может быть батарейный ускоритель (рис. 2).

Технологический процесс сепарации шрота в опытном образце сепарирующей установки (рис. 3) состоит в следующем.

Измельченный шрот из загрузочного бункера 1 самотеком поступает на поддерживающее сито 2, над которым установлен первый пневмосепарирующий канал 6 первого этапа выделения массы белка. В каналах расположены рассекатели потока об-

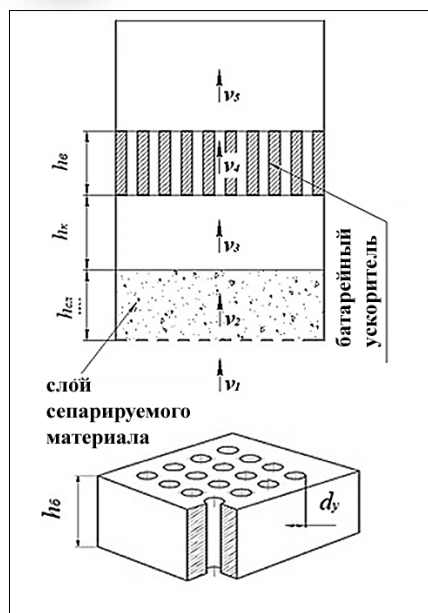


Рис. 2. Схема батарейного ускорителя воздушного потока

Fig. 2. Diagram of a battery-type air accelerator

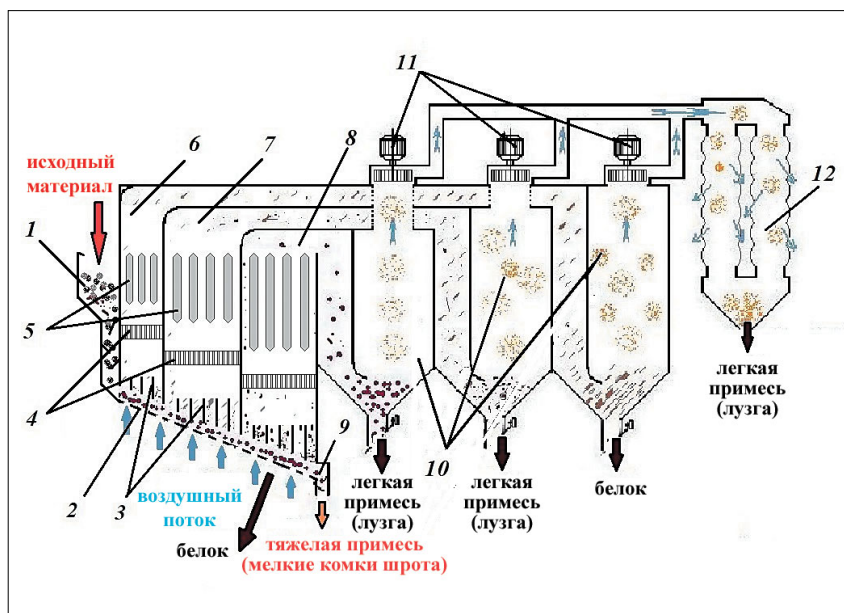


Рис. 3. Технологическая схема опытного образца установки для переработки отходов зернобобовых культур

Fig. 3. Technological flow diagram of a prototype machine for processing legume crop impurities

рабатываемого материала 3, батарейные и колонковые ускорители воздушного потока 4 и 5, которые предназначены для трансформации и стабилизации взаимодействия потоков материала и воздуха. Двигаясь по ситам, материал разделяется во втором 7 и в третьем 8 пневмосепарирующих каналах (второй этап выделения белка или лузги) и далее выводится через патрубок. Белковая часть материала может проходить через отверстия поддерживающего сита, под ним необходимо предусмотреть сборник белка без ущерба движению восходящему воздушному потоку. Легкие фракции воздушным потоком выносятся в осадочные камеры 9, и происходит первая ступень очистки отработанного воздуха. Далее через вентиляторы 10 воздушный поток направляется на вторичной очистку в фильтрах 11.

Для выбора вентиляторов определяют расход воздуха в пневмосепарирующих каналах:

$$Q_{\text{в}} = B \cdot L \cdot v,$$

где B и L – ширина и длина канала, м; v – скорость воздушного потока в канале, м/с.

Скорость воздушного потока в каналах выбирается с учетом физико-механических свойств разделяемых компонентов [9]. Скорость в первом канале (предназначен для выделения белка) $v_{\text{max}} = 4$ м/с, а во втором и третьем (выделение более тяжелых фракций) $v_{\text{max}} = 10$ м/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. На рисунке 4 показан график зависимости полноты выделения отходов ϵ (%) от коэффициента живого сечения K батарейного ускорителя:

$$K = \frac{S_{\text{отв}}}{S_{\text{общ}}} \cdot 100\%,$$

где $S_{\text{отв}}$ – площадь живого сечения отверстий батарейного ускорителя; $S_{\text{общ}}$ – общая площадь поперечного сечения батарейного ускорителя.

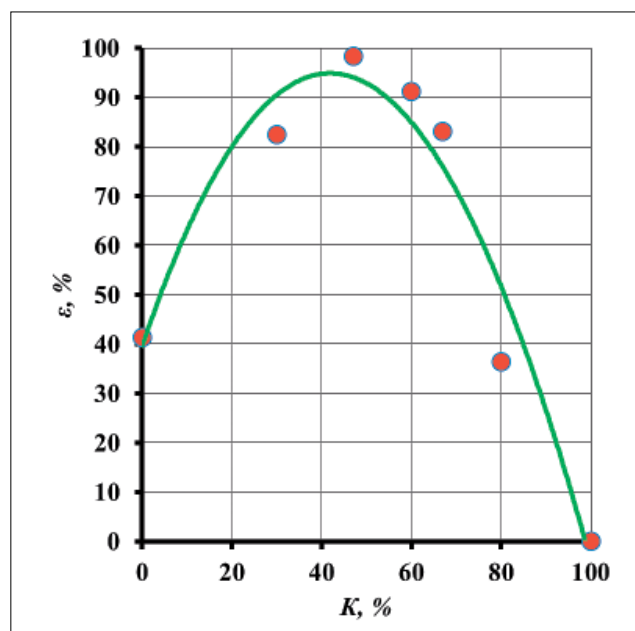


Рис. 4. График зависимости полноты выделения примеси (ϵ) от коэффициента живого сечения батарейного ускорителя (K)

Fig. 4. Dependence of impurity separation efficiency (ϵ) on the of the live cross-section coefficient (K) of the battery-type air accelerator

Полноту выделения отхода ε (%) и выход белка ξ (%) определяли по формулам [11, 12]:

$$\varepsilon = \frac{M_{\Sigma \text{отх}}}{M_{O \text{отх}}} \cdot 100, \quad \xi = \frac{M_{\Sigma \text{белк}}}{M_{O \text{белк}}} \cdot 100,$$

где $M_{\Sigma \text{отх}}$ – суммарная масса частиц отхода во фракционных емкостях, г; $M_{O \text{отх}}$ – общая масса отхода в исходном материале, г; $M_{\Sigma \text{белк}}$ – суммарная масса частиц белка во фракционных емкостях, г; $M_{O \text{белк}}$ – общая масса белка в исходном материале, г.

Из графика видно, что оптимальное значение коэффициента живого сечения (при условии полноты выделения отходов не менее 0,7, или 70%) варьируется в пределах от 30 до 67% при полноте выделения от 82,4 до 98,3%, поэтому для сепарации измельченного шрота оптимальный коэффициент живого сечения батарейного ускорителя $K = 50\%$.

На рисунке 5 представлены графики зависимости выхода белка ξ (%) и полноты выделения отхода ε (%) от удельной нагрузки обрабатываемого материала q при различном динамическом давлении P воздушного потока в пневмосепарирующем канале с батарейными и колонковыми ускорителями и от высоты их расположения при $P=5,4$ Па.

Из графиков видно, что оптимальное динамическое давление воздушного потока в канале с ускорителями составляет 2,4 и 5,4 Па при удельной нагрузке до $2 \text{ кг}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$. В этих пределах выделение белка составляет не ниже 94%, а полнота выделения отходов не ниже 73%.

Результаты сравнительных исследований показали, что установка в канале батарейных ускорителей над вершинами рассекателей потока обрабаты-

ваемого материала на высоте 160 и 220 мм повышает полноту выделения отхода, нагрузку до $2 \text{ кг}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$, а наибольшая полнота выделения отхода $\varepsilon = 99,8\%$ у канала с ускорителями, установленными на высоте $H = 160$ мм (рис. 5с).

На очистку поступает материал, представляющий собой сложную механическую смесь белка и клетчатки в виде лузги в целом или дробленом виде. Выход белка такого материала зависит от способов очистки на очистительных комплексах или элеваторах, состояния машин для очистки и сортировки и колеблется около 75%. Для наиболее полного выделения отходов и минимизации потерь белкового материала в отходы в машине необходимо установить последовательно три пневмосепарирующих канала над общей наклонной поддерживающей сеткой. Согласно результатам исследований, в каждый канал необходимо установить рассекатели обрабатываемого материала, движущегося по поддерживающему сити, и батарейные и колонковые ускорители воздушного потока.

Технологический процесс сепарации предусматривает равномерную загрузку материала в пневмосепарирующие каналы и вывод белка, для чего должны быть загрузочный бункер с регулируемой подачей материала, а также выводные патрубки белка с устройством, препятствующим излишнему подосу воздуха при работе машины [13-15]. Отработанный после сепарации воздух содержит белок и примеси, которые необходимо выделить. Для этого предусмотрены осадочные камеры с автоматическими клапанами вывода белка и примесей. Очистка отработанного воздуха происходит в тканевых фильтрах.

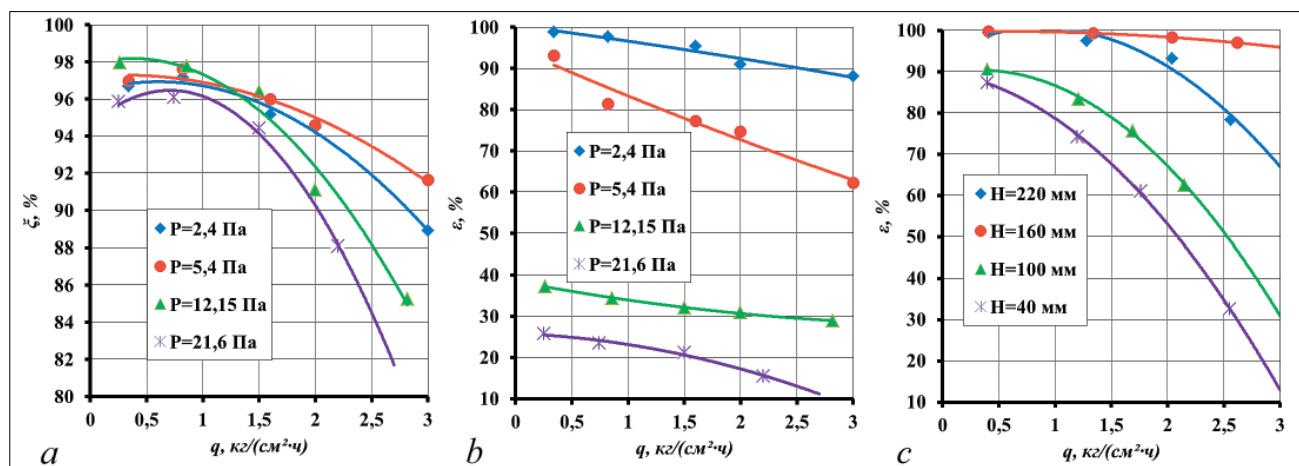


Рис. 5. Зависимость выхода белка ξ (a) и полноты выделения отхода ε (b) от удельной нагрузки обрабатываемого материала q при различном динамическом давлении P воздушного потока в пневмосепарирующем канале с батарейными и колонковыми ускорителями; c – зависимость полноты выделения отхода от удельной нагрузки материала q и высоты расположения батарейных ускорителей H над вершинами рассекателей потока материала при $P=5,4$ Па

Fig. 5. Dependences on the specific load of the processed material of protein yield (a) and completeness of waste release (b) at different dynamic pressure of the air flow in the pneumatic separation channel with battery and column accelerators; completeness of waste release (c) at different heights of the battery accelerators and $P=5.4$ Pa

Выводы. Экспериментально установлено, что коэффициент живого сечения ускорителя должен составлять 50-60%, высота батарейного ускорителя – от 55 до 75 мм. Высота установки батарейного ускорителя над вершинами рассекателей потока обрабатываемого материала должна быть от 160 до 220 мм.

Динамическое давление в пневмосепарирующем канале для достижения максимально возможного количества белка (не менее 75%) и полноты выделения примеси (не менее 70%) должно составлять

от 2,4 до 5,4 Па. Ширина батарейного ускорителя должна быть равна ширине пневмоканалов и составлять 200 мм, длина – 260 мм для 1-го канала и 480 мм для 2- и 3-го каналов.

Оптимальная удельная нагрузка обрабатываемого материала составляет до 2,0 кг/(см²·ч). Это обеспечивает пропускную способность машины до 2 т/ч при варьировании содержания выделяемого компонента (белка) в исходном материале от 35 до 40%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Баязитова К.Н., Иль Е.Н., Иль Д.Е. и др. Применение подсолнечного шрота и дробленых семян льна в рационе сухостойных коров // *Вестник науки Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина*. 2023. N1-1(116). С. 165-174. DOI: 10.51452/kazatu.2023.1(116).1346.
- Дорохов А.С., Чилингарян Н.О. Состояние и перспективы развития комбикормовой промышленности в Российской Федерации // *Аграрный вестник Урала*. 2020. N7(198). С. 75-84. DOI: 10.32417/1997-4868-2020-198-7-75-84.
- Крылова И.В., Федоров А.В., Доморощенкова М.Л. и др. Влияние состава подсолнечного шрота на эффективность отделения белковой части сырья от клетчатки методом механического фракционирования // *Научный журнал НИУ ИТМО*. 2024. N1 (59). С. 3-13. DOI: 10.17586/2310-1164-2024-17-1-3-13.
- Крылова И.В., Федоров А.В. Изучение фракционирования подсолнечного шрота при различных способах измельчения // *Вестник Международной академии холода*. 2024. N3. С. 56-61. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-56-61.
- Доморощенкова М.Л., Крылова И.В., Кандроков Р.Х. Исследование продуктов переработки подсолнечного шрота и жмыха, полученных механическим способом // *Вестник ВНИИ жиров*. 2020. N1-2. С. 30-36. DOI: 10.25812/VNIIG.2020.90.41.022.
- Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Зюлин А.Н. Разработка и внедрение высокоэффективных, ресурсо- и энергосберегающих технологий и технических средств послеуборочной обработки зерна и подготовки семян // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2009. N1. С. 2-9. EDN: JXTJCH.
- Московский М.Н., Борзенко С.И. Распределение высокозагрязненного соевого материала в глубоком воздушном канале // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N4. С. 42-48. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-4-42-48.
- Бурков А.И., Глушков А.Л., Лазыкин В.А., Мокиев В.Ю. Исследование осадочной камеры второй аспирации универсального сепаратора зернового вороха // *Пермский аграрный вестник*. 2023. N3(43). С. 4-11. DOI: 10.47737/2307-2873_2023_43_4.
- Хамуев В.Г., Пехальский И.А., Герасименко С.А., Борзенко С.И. Разработка рабочего органа вертикального пневмоканала для очистки шрота подсолнечника // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2024. N5(77). С. 402-411. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-05-45.
- Бурков А.И., Глушков А.Л., Лазыкин В.А., Мокиев В.Ю. Обоснование основных конструктивных параметров разделительной камеры пневмосепаратора с использованием различных методов расчета траекторий частиц в пневмосепарирующем канале // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2022. Т. 23. N3. С. 402-410. DOI: 10.30766/2072-9081.2022.23.3.402-410.
- Борзенко С.И., Герасименко С.А. Определение положения сужающих перегородок в глубоком пневмоканале при очистке высокозагрязненного соевого материала // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2024. N5(77). С. 411-418. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-05-46.
- Хамуев В.Г., Герасименко С.А. Определение толщины сужающих перегородок в вертикальном пневмосепарирующем канале при очистке семян сои // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N3. С. 79-84. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-79-84.
- Drincha V.M., Tsench Yu.S. Fundamentals and prospects for the technologies development for post-harvest grain processing and seed preparation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N4. 17-25. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-17-25.
- Бурков А.И., Глушков А.Л., Лазыкин В.А., Мокиев В.Ю. Повышение эффективности пневмосепарирующего устройства машины предварительной очистки зерна // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24. N4. С. 22-27. DOI: 10.26897/2687-1149-2022-4-22-27.
- Дринча В.М., Ценч Ю.С. Эволюция зерно-семяочистительной техники в России // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N1. С. 24-33. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-1-24-33.

REFERENCES

- Bayazitova K.N., Il E.N., Il D.E. et al. Application of sunflower meal and crushed flax seeds in the diet of dry cows. *Herald of science of S.Seifullin Kazakh agrotechnical university*. 2023. N1-1(116). 165-174 (In Russian). DOI: 10.51452/kazatu.2023.1(116).1346.
- Dorokhov A.N., Chilingaryan N.O. Status and development

- prospects of the feed industry in the Russian Federation. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2020. N7(198). 75-84 (In Russian). DOI: 10.32417/1997-4868-2020-198-7-75-84.
3. Krylova I.V., Fedorov A.V., Domoroshchenkova M.L. et al. Influence of the composition of sunflower meal on the efficiency of separating the protein part of the raw material from fiber by mechanical fractionation. *Scientific Journal NRU ITMO*. 2024. N1 (59). 3-13 (In Russian). DOI: 10.17586/2310-1164-2024-17-1-3-13.
 4. Krylova I.V., Fedorov A.V. Sunflower meal fractionation using various crushing techniques. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. N3. 56-61 (In Russian). DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-56-61.
 5. Domoroshchenkova M.L., Krylova I.V., Kandrov R.H. Research of products of sunflower meal and cake processing produced by mechanical methods. *Vestnik of the All-Russia Scientific Research Institute of Fats*. 2020. N1-2. 30-36 (In Russian). DOI: 10.25812/VNIIG.2020.90.41.022.
 6. Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Zyulin A.N. Development and implementation of highly efficient resource and energy saving technologies and technical means of post-harvest grain processing and seed preparation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2009. N1. 2-9 (In Russian). EDN: JXTJCH.
 7. Moskovskiy M.N., Borzenko S.I. Distribution of heterogeneous, highly impure soy material in a deep air channel. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N4. 42-48 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-4-42-48.
 8. Burkov A.I., Glushkov A.L., Lazykin V.A., Mokiev V.Yu. Investigation of the settling chamber of the second aspiration of the universal grain heap separator. *Perm Agrarian Journal*. 2023. N3(43). 4-11 (In Russian). DOI: 10.47737/2307-2873_2023_43_4.
 9. Khamuev V.G., Pekhalsky I.A., Gerasimenko S.A., Borzenko S.I. Development of the working body of a vertical pneumatic channel for cleaning sunflower meal. *Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2024. 5(77). 402-411 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2024-05-45.
 10. Burkov A.I., Glushkov A.L., Lazykin V.A., Mokiev V. Yu. Substantiation of the main design parameters of the separator chamber of the pneumatic separator using various methods for calculating particle trajectories in the pneumoseparating channel. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2022. Vol. 23. N3. 402-410 (In Russian). DOI: 10.30766/2072-9081.2022.23.3.402-410.
 11. Borzenko S.I., Gerasimenko S.A. Determination of the position of constricting baffles in a deep pneumatic duct during cleaning of highly contaminated soybean material. *Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2024. N5(77). 411-418 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2024-05-46.
 12. Khamuev V.G., Gerasimenko S.A. Quantifying narrowing partition thickness in a vertical pneumatic separation channel for soybean seed cleaning. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N3. 79-84 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-79-84.
 13. Drincha V.M., Tsench Yu.S. Fundamentals and prospects for the technologies development for post-harvest grain processing and seed preparation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N4. 17-25 (In English). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-17-25.
 14. Burkov A.I., Glushkov A.L., Lazykin V.A., Mokiev V.Yu. Increasing the efficiency of the pneumatic separating device of a grain pre-cleaner. *Agricultural Engineering*. 2022. Vol. 24. N4. 22-27 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2022-4-22-27.
 15. Drincha V.M., Tsench Yu.S. Evolution of grain and seed cleaning equipment in Russia. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. Vol. 15. N1. 24-33 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-1-24-33..

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Московский М.Н. – научное руководство, формирование общих выводов;

Хамуев В.Г. – сборка установки, методология, обобщение данных литературы, итоговая переработка статьи;

Герасименко С.А. – сборка установки, проведение опыта, обработка данных опыта, составление начального варианта статьи, литературный анализ, доработка текста;

Борзенко С.И. – сборка установки, проведение опыта, литературный анализ.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Moskovsky M.N. – scientific supervision, formulation of general conclusions;

Khamuev V.G. – setup assembly, development of methodology, literature review, final revision of the manuscript;

Gerasimenko S.A. – setup assembly, experiment conduction, data processing, drafting the initial version of the manuscript, literature review, manuscript revision;

Borzenko S.I. – setup assembly, experiment conduction, literature review.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

30.06.2025

14.08.2025