

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.171:631.363

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-39-46>

Алгоритм расчета параметров процесса сепарации зерна в гравитационном сепараторе

Т.А. Клевцова¹, А.В. Гвоздев², Я.А. Мирошниченко³^{1,2,3} Мелитопольский государственный университет; г. Мелитополь, Россия¹ klevtsoval204@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7319-9266>² gav11gvozdev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1401-8434>³ vj-slim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8399-5979>

Аннотация. В производстве комбикормов для эффективной предварительной очистки зерна нужен компактный сепаратор, отличающийся простотой конструкции и минимальными затратами энергии. Такими характеристиками обладают гравитационные сепараторы. С целью определения оптимальных по эффективности сепарации геометрических параметров щелевого отверстия сепарирующего органа разработали алгоритм расчета процесса сепарации зерна в гравитационном сепараторе на основе системного подхода и математического моделирования. Пришли к выводу о том, что необходимым условием для выделения частицы цилиндрической формы в щелевое отверстие гравитационного сепаратора является превышение критической скорости частиц относительно скорости их схода с предыдущей поверхности сепаратора. Разработали блок-схему и алгоритм расчета параметров процесса сепарации зерна сквозь щелевые отверстия гравитационного сепаратора, моделирующую движение частицы. При заданных условиях разделения и размера частиц представленный алгоритм позволяет определить критическую скорость частицы и проверить выполнение условий ее выделения с учетом случайных воздействий. Провели апробацию алгоритма при варьировании ширины щелевого отверстия и высоты между противоположными кромками разгонных поверхностей. Результаты показали, что отклонение интенсивности выделения и теоретических значений варьируемых параметров гравитационного сепаратора от экспериментальных данных не превышает 9%, что свидетельствует об адекватности моделирования. Применение алгоритма позволяет с достаточной точностью и минимальными затратами проводить полнофакторный эксперимент по определению влияния параметров сепарируемой массы и конструктивно-технологических параметров гравитационного сепаратора на эффективность сепарации.

Ключевые слова: зерно; гравитационный сепаратор; алгоритм расчета параметров процесса сепарации; эффективность сепарации; движение частицы; скорость частицы; щелевое отверстие

Для цитирования: Клевцова Т.А., Гвоздев А.В., Мирошниченко Я.А. Алгоритм расчета параметров процесса сепарации зерна в гравитационном сепараторе // *Агроинженерия*. 2025. Т. 27, № 5. С. 39-46. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-39-46>

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания.

Благодарности. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

ORIGINAL ARTICLE

Algorithm for calculating grain separation parameters in a gravity separator

T.A. Klevtsova¹, A.V. Gvozdev², Ya.A. Miroshnichenko³^{1,2,3} Melitopol State University; Melitopol, Russia¹ klevtsoval204@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7319-9266>² gav11gvozdev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1401-8434>³ vj-slim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8399-5979>

Abstract. Effective grain pre-cleaning in compound feed production demands compact, energy-efficient separators with simple designs, like gravity separators. To optimize the design of these separators, specifically, the slotted opening geometry, to ensure maximum separation efficiency, the authors developed a novel algorithm based on a systematic approach and mathematical modeling of grain separation. The simulations made by the authors revealed that successful passage of a grain particle through the slot requires its velocity relative to the separator

surface to exceed a critical threshold. The authors present a flowchart and algorithm to calculate the key parameters of grain separation, modeling particle flow through the slotted openings. Given specific separation conditions and particle size, this algorithm helps determine the critical velocity and ensure optimal separation, even considering random factors. The algorithm testing, involving variations in slot width and height difference between opposite acceleration surfaces, demonstrated a close match (within 9% deviation) between predicted and experimental separation intensity, validating the model's accuracy. The algorithm provides a powerful, cost-effective tool for exploring the impact of material properties and the gravity separator design on overall separation performance.

Keywords: grain; gravity separator; algorithm for calculating separation parameters; separation efficiency; particle flow; particle velocity; slotted hole

Financing. The work financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the State Assignment.

Acknowledgements. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Klevtsova T.A., Gvozdev A.V., Miroshnichenko Ya.A. Algorithm for calculating grain separation parameters in a gravity separator. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(5):39-46 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-39-46>

Введение

Предварительное (промежуточное) сепарирование зерна позволяет контролировать качество готовых фракций [1-4]. Для реализации этого технологического приема используют различные сепараторы центробежного и вибрационного типов с плоскими и цилиндрическими решетками, а также виброцентрифуги [5-8]. Основными недостатками существующих сепараторов являются их сложная конструкция, высокая стоимость и значительный расход энергии. С экономической точки зрения их применение для предварительной обработки зерна нецелесообразно, особенно для небольших сельскохозяйственных предприятий и фермерских хозяйств. Для оптимизации процесса предварительной очистки зерна в производстве комбикормов требуется компактный сепаратор простой конструкции с низким энергопотреблением и минимальным использованием металла. Такими характеристиками обладают гравитационные сепараторы [9-11].

В процессе сепарации непрерывно подаваемый материал последовательно пропускается через систему элементарных сепараторов (решет, воздушных, клиновидных и щелевых каналов и др.). На каждом из них материал по одному из физико-механических показателей разделяется на две фракции: проход и сход. При этом каждая частица индивидуально (дискретно) как бы оценивается по принадлежности одной из фракций.

При расчете оптимальных геометрических параметров щелевого отверстия сепарирующего органа должно учитываться условие достижения критической скорости центра масс зерновки при столкновении ее со следующей кромкой сепарирующей поверхности [11].

Можно ожидать, что алгоритм расчета параметров процесса сепарации зерна в гравитационном сепараторе поможет подобрать оптимальные значения параметров для эффективного разделения фракций.

Цель исследований: на основе системного подхода и математического моделирования разработать алгоритм расчета процесса сепарации зерна в гравитационном сепараторе для подбора оптимальных (по эффективности сепарации) геометрических параметров щелевого отверстия сепарирующего органа.

Материалы и методы

Расчет параметров процесса гравитационного сепарирования зерна в щелевые отверстия сепарирующего органа базировался на разработанном нами системном подходе к процессу гравитационного сепарирования зерна в щелевые отверстия (рис. 1). Поскольку данный процесс зависит от технологических параметров зерновой массы, положения зерновых частиц в слое и конструктивно-технологических параметров сепарирующего органа, критерии исследуемой системы сепарирования определяли после тщательного анализа исходных данных.

Разрабатывали алгоритм моделирования с использованием подхода «Снизу-вверх». В первую очередь моделировали состояние частиц зерновой массы на сепарирующей поверхности как подсистему с учетом ее функциональной взаимосвязи с другими подсистемами. Затем данную подсистему рассматривали в контексте всей системы (рис. 2).

На основе математического моделирования процесса сепарации зерна через щелевые отверстия гравитационного сепаратора [11, 12] и полученных уравнений движения и сепарации система

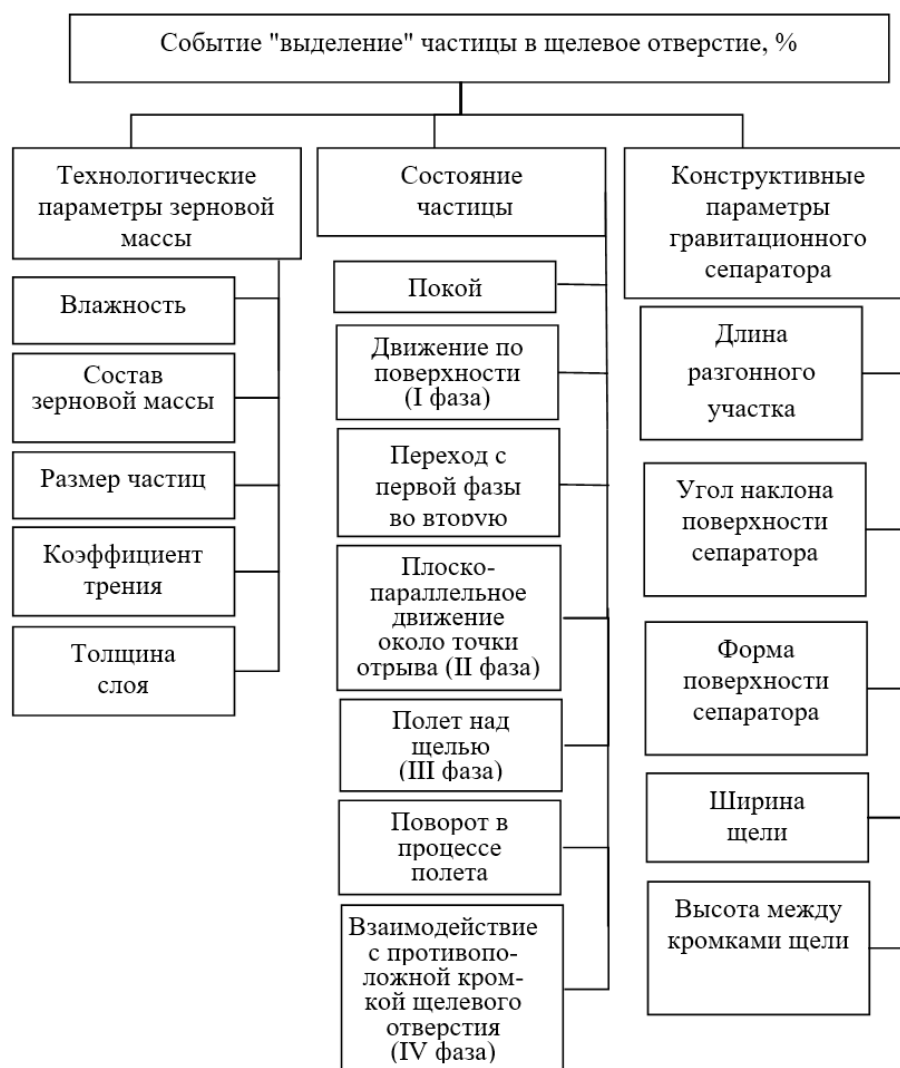


Рис. 1. Схема системы гравитационного сепарирования зерна в щелевые отверстия сепарирующего органа

Fig. 1. Diagram of the system of gravitational separation of grain into the slotted holes of the separating unit

характеризуется шестью взаимосвязанными подсистемами: состоянием покоя, движением, полетом, переходом между различными фазами, вращением частицы во время сепарирования и взаимодействием частицы с противоположной кромкой щелевого отверстия.

Для каждого элемента системы (позиции частицы в каждой фазе и при переходе между фазами) разработали соответствующую расчетную схему и математическую модель.

Результаты и их обсуждение

С учетом ранее полученных теоретических исследований [6, 9, 11, 12] разработали методику, описывающую состояние частицы и ее положение на разгонной поверхности гравитационного сепаратора, и алгоритм расчета прохождения зерна через щелевые отверстия гравитационного сепаратора. При анализе учли тот факт, что четвертое состояние частицы «Переход из предыдущей фазы

в следующую» (рис. 2) имеет преимущество перед состоянием 6 «Взаимодействие частицы с противоположной кромкой щелевого отверстия гравитационного сепаратора» (рис. 3).

При прохождении частицы через гравитационный сепаратор в случае, когда ее центр масс расположен над щелевым отверстием, а край – над противоположной кромкой, возможен контакт частицы с этой кромкой. В результате такого контакта могут произойти два события: выделение частицы в щель сепаратора и сход частицы на следующую поверхность сепаратора. При этом учитывали эффективность взаимодействия частицы с противоположной кромкой щелевого отверстия (рис. 2, 3).

Для обеспечения эффективного выделения цилиндрических частиц через щель гравитационного сепаратора необходимым является выполнение условия, при котором критическая скорость v_k этих частиц превышает скорость их отрыва от предыдущей поверхности сепаратора v_0 , то есть $v_k > v_0$ [12].

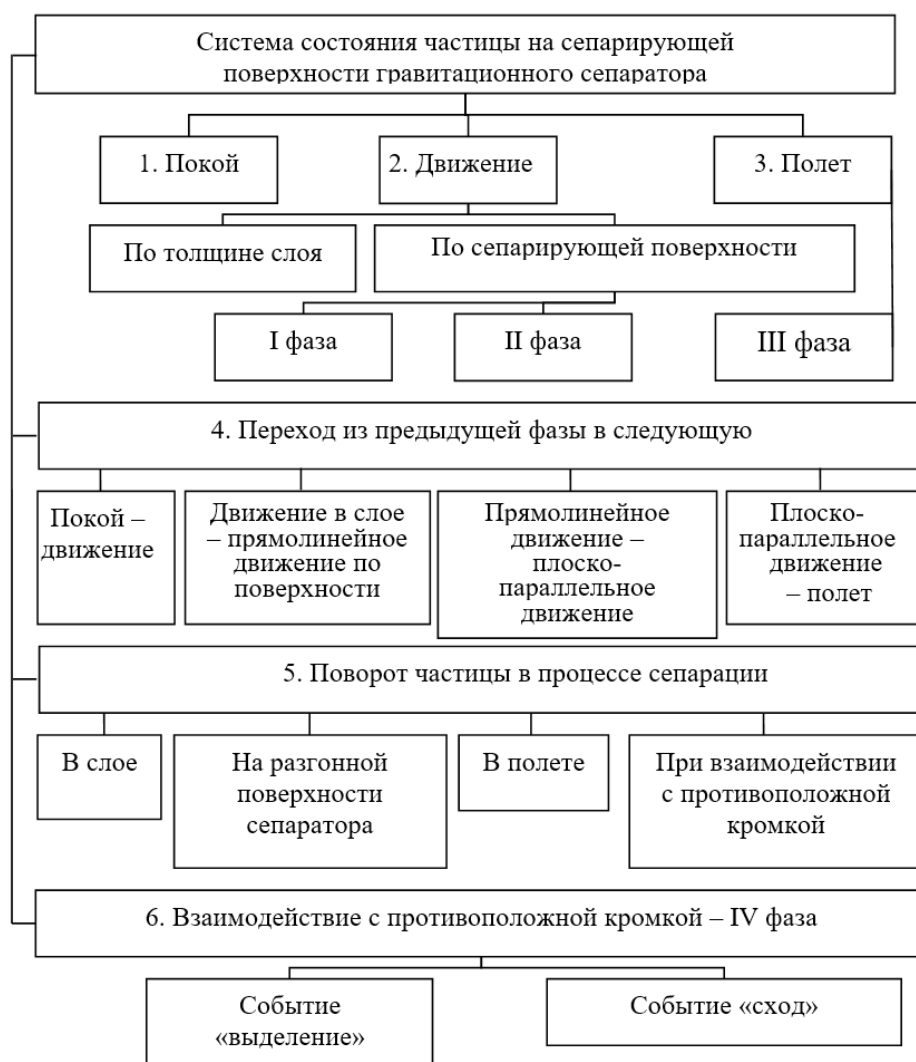


Рис. 2. Схема системы состояния частицы на сепарирующей поверхности гравитационного сепаратора

Fig. 2. Diagram of the particle's position on the separating surface of a gravity separator

В этом случае момент импульса частицы, определяемый скоростью v_0 , будет больше момента импульса, обусловленного ее вращением вокруг центра масс [11]:

$$v_k > \frac{k_v v_0 (L + fr)}{6(H + r)}, \quad (1)$$

где L – ширина щели между противоположными кромками поверхностей гравитационного сепаратора, мм; H – разность по высоте между кромками, мм; f – коэффициент трения скольжения частицы о сепарирующую поверхность; r – размер частицы (радиус), мм; k_v – коэффициент соотношения скоростей v_0 и v_k в зависимости от ширины L щелевого просеивающего отверстия между противоположными кромками поверхностей гравитационного сепаратора; fr – сдвиг точки схода частицы в форме цилиндра с предыдущей сепарирующей поверхности в щелевое отверстие относительно центра масс цилиндра вдоль оси x (рис. 3), мм [12].

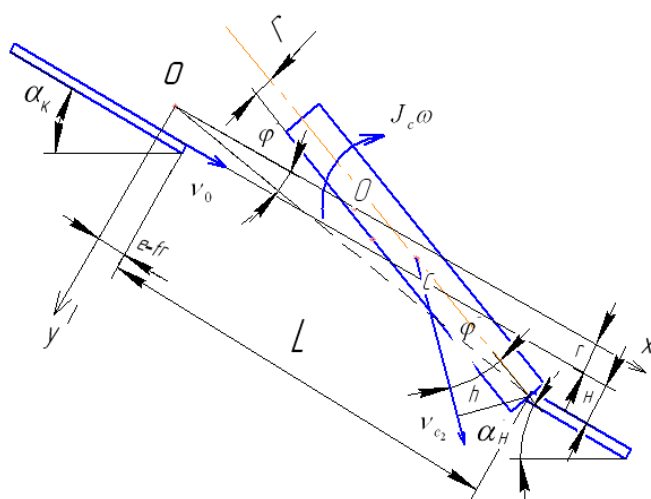


Рис. 3. Схема взаимодействия частицы цилиндрической формы с противоположной кромкой щелевого просеивающего отверстия

Fig. 3. Diagram of interaction of a cylinder-shaped particle with the opposite edge of a slotted screening hole

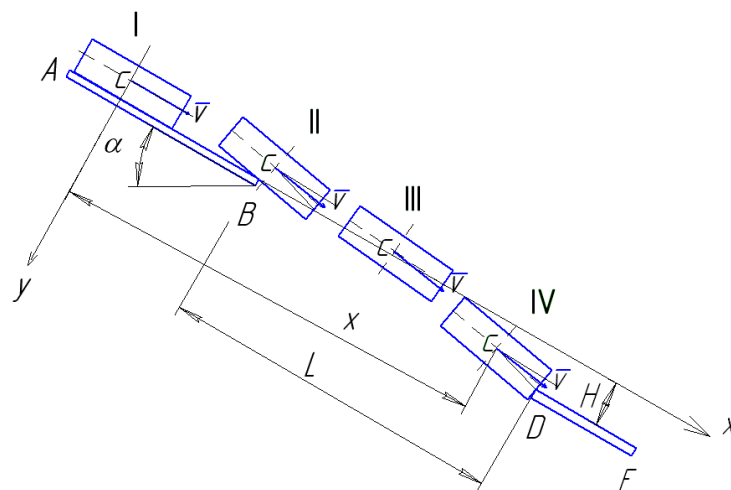


Рис. 4. Схема выделения частицы в форме цилиндра в щелевое сепарирующее отверстие:

- I – скольжение частицы по сепарирующей поверхности;
 II – плоскопараллельное движение частицы относительно точки отрыва;
 III – полет частицы над щелевым отверстием после отрыва ее от сепарирующей поверхности;
 IV – взаимодействие частицы с противоположной кромкой щелевого отверстия

Fig. 4. Diagram of the separation of a cylinder-shaped particle into a slotted separating opening:

- I – sliding of the particle along the separating surface; II – plane-parallel flow of the particle relative to the point of separation;
 III – floating of the particle over the slotted opening, after its separation from the separating surface;
 IV – interaction of the particle with the opposite edge of the slotted opening

Ранее [13] было обосновано оптимальное превышение критической скорости v_k над начальной скоростью v_0 как минимум на 50% для достижения 92% эффективности сепарации, то есть

$$\frac{k_v(L + fr)}{6(H + r)} \geq 1,0 \dots 1,5. \quad (2)$$

Для всех указанных состояний (покой, движение, полет и взаимодействие частицы с противоположной кромкой щели гравитационного сепаратора) разработали расчетные схемы и математические модели, схематично представленные на рисунке 4. Эти модели заложены в основу алгоритма для расчета параметров процесса гравитационного разделения зерна через щелевые отверстия гравитационного сепаратора (рис. 5).

Блок-схема алгоритма (рис. 5) демонстрирует процесс сепарации зерна сквозь щелевые отверстия сепаратора. Перемещение частиц в щелях и переход из одной фазы в другую моделируются с использованием операторов сравнения.

Для любого заданного начального состояния сепарации (рис. 5) решение дифференциальных уравнений движения частицы, учитывающее влияние случайных факторов, позволяет определить ее критическую скорость. Если выполняется условие $v_k > v_0$, то происходит событие «Выделение» для заданного размера частиц [11-13].

При условии равновероятности всех уровней каждого случайного фактора и учета всех

возможных положений частицы с равномерным воздействием соседних частиц достижение 50%-ной достоверности выполнения уравнения (1) является необходимым критерием для полученных интервалов варьирования существенных факторов (ширины щели L , разности высот H , начальной скорости v_0 и размера частицы r), и возможно проведение полнофакторного эксперимента с достаточной точностью.

Алгоритм расчета параметров процесса сепарации зерна сквозь щелевые отверстия гравитационного сепаратора реализуется следующим образом. Согласно блок-схеме (рис. 5) начальные условия сепарирования выбираются или вычисляются с учетом влияния случайных факторов на каждой фазе расчета, выявленных на основе априорной информации, теоретических исследований и моделирования [11, 12].

Проведем расчеты по предложенному алгоритму. Размер компонентов исходного материала принимаем с эквивалентным диаметром $d = 5 \dots 6$ мм, длину разгонного участка сепарирующей поверхности – $S_0 = 0,15 \dots 0,20$ м. Коэффициент трения скольжения частицы о сепарирующую поверхность принимаем равным $f = 0,36$, а угол наклона сепарирующей поверхности – $\alpha = 30^\circ$. При длине разгонного участка сепарирующей поверхности $S_0 = 0,15 \dots 0,20$ м начальная скорость частицы v_0 в момент схода с поверхности кромки сепарирующей поверхности равна $0,55 \dots 0,72$ м/с [11-13].

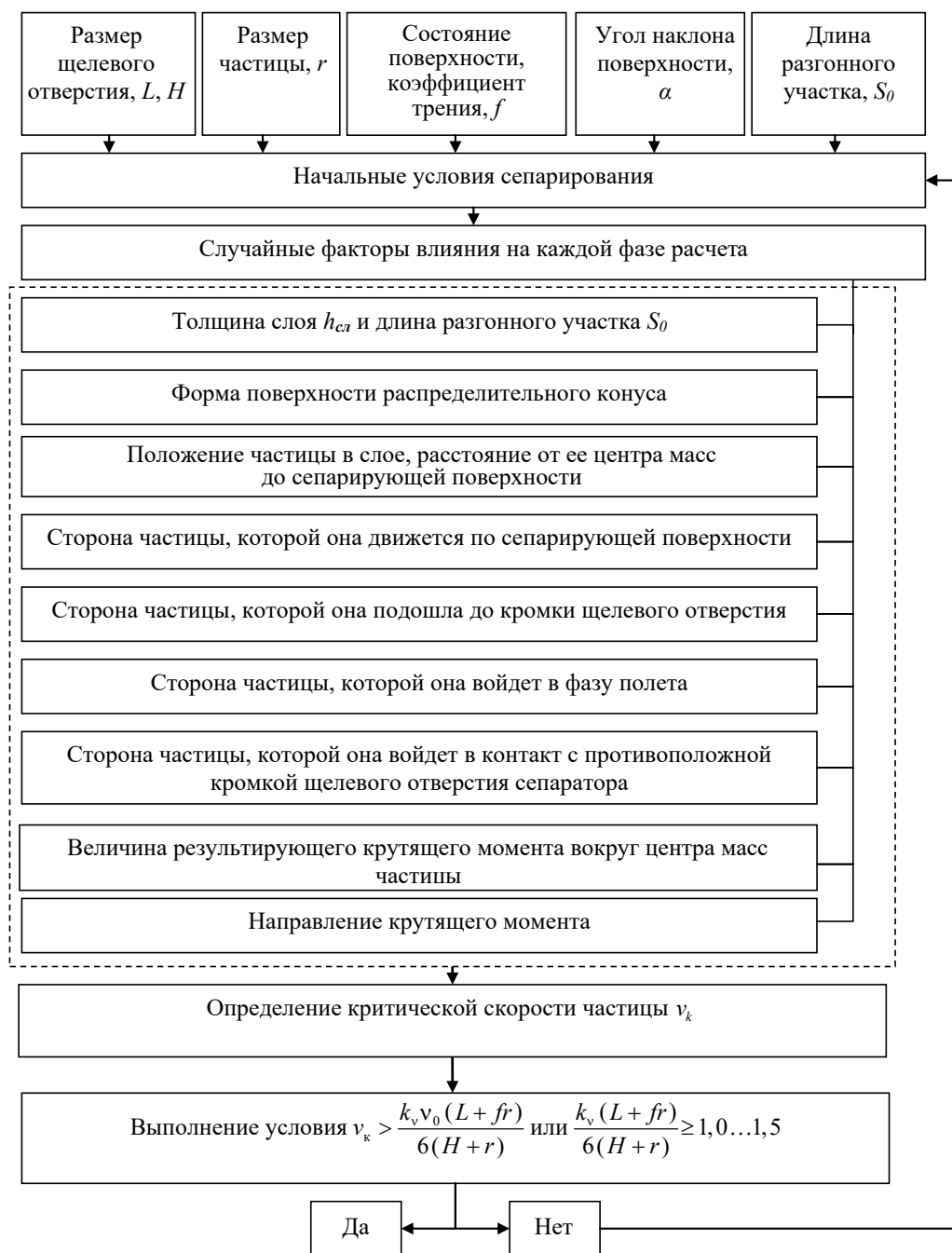


Рис. 5. Блок-схема алгоритма расчета параметров процесса сепарации зерна сквозь щелевые отверстия гравитационного сепаратора

Fig. 5. Block diagram of the algorithm for calculating the parameters of the grain separation process through the slotted holes of a gravity separator

Коэффициент соотношения скоростей v_0 и v_k , зависящий от ширины L щелевого просеивающего отверстия между противоположными кромками поверхностей гравитационного сепаратора, находится в пределах $k_v = 1,03 \dots 1,27$ [11].

Для каждой фракции исходного материала при заданных значениях эквивалентного диаметра d компонентов определили ширину щелевого просеивающего отверстия L между противоположными кромками разгонных поверхностей

брахистохронного свойства (ширина отверстия) по формуле:

$$L = 1,21d^2 - 7,98d + 23,27. \quad (3)$$

Для нашего случая $L = 13 \dots 19$ мм.

Далее определили высоту H между противоположными кромками разгонных поверхностей брахистохронного свойства:

$$H = 0,2L + d(0,1f - 0,5). \quad (4)$$

Для нашего случая $H = 0,5 \dots 1,7$ мм.

Исходя из полученных значений L и H , определили значение критической скорости частицы v_k и сравнили ее с начальной v_0 путем выполнения условия из формулы 2.

Для полученных интервалов значений факторов L и H выполнено условие (2): превышение критической скорости относительно начальной составляет 0,9...1,3, поэтому возможно проведение полнофакторного эксперимента с достаточной точностью.

Экспериментальные исследования, проведенные с варьированием факторов по разработанному алгоритму, показали, что для выделения через щелевое отверстие компонентов исходного материала с эквивалентным диаметром $d = 5...6$ мм при длине разгонного участка сепарирующей поверхности $S_0 = 0,15...0,20$ м и интенсивности выделения 90...92% необходимо обеспечить ширину щели L в диапазоне 12...20 мм и высоту H в диапазоне 1,0...2,0 мм [11, 13].

Отклонение интенсивности выделения и теоретических значений параметров L , H от экспериментальных данных не превышает 9%, что свидетельствует об адекватности моделирования.

Список источников

1. Смышляев А.А., Мерчалов С.В., Оробинский В.И. и др. Совершенствование конструкции сепаратора для промежуточного разделения измельченного зерна в комбикормовом производстве // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 1 (207). С. 113-120. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-207-1-113-120>
2. Петров А.А., Шахов В.А., Наумов Д.В. и др. Повышение производительности дробилки зерна за счет улучшения сепарации // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 3 (89). С. 159-162. EDN: BAFJOJ
3. Морозов Н.М., Кирсанов В.В. Направления развития технического прогресса в механизации и автоматизации животноводства // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы XV Международной научно-практической конференции. М.: Росинформагротех, 2023. С. 29-54. EDN: GPMYKH
4. Клевцова Т.А., Гвоздев А.В. Разработка устройства для предварительной сепарации зерна в дробилке прямого удара // Инновационные направления интеграции науки, образования и производства: Сборник материалов V Международной научно-практической конференции. Керчь: КГМУ, 2024. С. 10-16. EDN: QZMNVM
5. Васильев А.М., Мачихин С.А., Стрелюхина А.Н., Рындин А.А. Повышение эффективности процессов сепарирования зерновых смесей на рифленой поверхности // Хранение и переработка сельхозсырья. 2018. № 3. С. 98-105. EDN: YVSGYP
6. Фоминых А.В., Мекшун Ю.Н., Лопарев Д.В., Кошкова Н.А. Теоретические исследования движения зерна по решетке, совершающему колебания в своей плоскости // Вестник Курганской ГСХА. 2019. № 3 (31). С. 72-74. EDN: HIBFWZ
7. Попов И.П., Чумаков В.Г., Родионов С.С. и др. Оптимизация мощности решетных зерноочистительных машин // Достижения науки и техники АПК. 2017. Т. 31, № 5. С. 53-56. EDN: ZCPUTN

Выводы

Для обеспечения 92%-ного выделения цилиндрических частиц в щелевые отверстия гравитационного сепаратора необходимо, чтобы критическая скорость этих частиц превышала скорость их отрыва от предыдущей поверхности сепаратора как минимум на 50%.

Представленный алгоритм расчета параметров процесса сепарации зерна сквозь щелевые отверстия в гравитационном сепараторе позволяет с достаточной точностью и минимальными затратами проводить полнофакторный эксперимент по определению влияния параметров сепарируемой массы и конструктивно-технологических параметров гравитационного сепаратора на эффективность сепарации.

Экспериментальные исследования, проведенные с варьированием факторов, полученных с использованием разработанного алгоритма, показали, что отклонение теоретических значений ширины щелевого просеивающего отверстия, высоты между противоположными кромками разгонных поверхностей и интенсивности выделения от экспериментальных данных не превышает 9%, что свидетельствует об адекватности моделирования.

References

1. Smyshlyayev A.A., Merchalov S.V., Orobinskiy V.I. et al. Improvement of separator design for intermediate separation of crushed grain in compound feed production. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2022;1:113-120. (In Russ.) <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-207-1-113-120>
2. Petrov A.A., Shakhov V.A., Naumov D.V. et al. Increasing the productivity of the grain crusher due to improved separation. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021;3:159-162. (In Russ.) <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-89-3-159-162>
3. Morozov N.M., Kirsanov V.V. Development trends of the technical progress in mechanization and automation of livestock farming. *Nauchno-informatsionnoe obespechenie innovatsionnogo razvitiya APK: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference*. Moscow, Rosinformagrotekh, 2023:29-53. (In Russ.)
4. Klevtsova T.A., Gvozdev A.V. Development of a device for pre-separation of grain in a direct impact crusher. *Innovatsionnye napravleniya integratsii nauki, obrazovaniia i proizvodstva: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference*. Kerch: KGMTU, 2024:10-16. (In Russ.)
5. Vasil'ev A.M., Machihin S.A., Ryndin A.A., Strel'juhina A.N. Improvement of grain mixture separation on corrugated surface. *Storage and Processing of Farm Products*. 2018;3:98-105. (In Russ.)
6. Fominykh A.V., Mekshun Iu.N., Loparev D.V., Koshkova N.A. Theoretical researches of grain motion according to the grille committing oscillations in its plane. *Vestnik Kurganskoi GSKhA*. 2019;3:72-74. (In Russ.)
7. Popov I.P., Chumakov V.G., Rodionov S.S. et al. Optimization of the power of sieve grain cleaners. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2017;31;5:53-56. (In Russ.)

8. Невзоров В.Н., Кох Д.А., Кох Ж.А. и др. Технология сепарации зерна на вибрационной машине // Вестник Красноярского ГАУ. 2018. № 5. С. 198-202. EDN: YQNUXJ

9. Шацкий В.П., Оробинский В.И., Попов А.Е. Моделирование движения зернового потока в гравитационном сепараторе // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2015. № 4. С. 72-79. EDN: VAUAML

10. Гвоздев А.В., Клевцова Т.А., Мирошниченко Я.А. Совершенствование процесса гравитационной сепарации зерна // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы XV Международной научно-практической конференции. М.: Росинформагротех, 2023. С. 117-124. EDN: FMQDMB

11. Гвоздев А.В., Клевцова Т.А., Мирошниченко Я.А. Обоснование процесса гравитационной сепарации зерна методом моделирования // Вестник аграрной науки Дона. 2023. Т. 16, № 4. С. 32-40. EDN: ZDMCNU

12. Шпиганович Т.О. Математичне моделювання сепарації зерна через щільні отвори між розгінними ділянками розподільного конуса // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2011. Вип. 11. Т. 1. С. 256-267. EDN: TCVWDH

13. Шпиганович Т.О., Болтянский Б.В. Номограмный метод анализа результатов многофакторного эксперимента // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2013. Вип. 13. Т. 3. С. 86-91. EDN: SJBAPL

Информация об авторах

¹ Клевцова Татьяна Александровна, канд. техн. наук, заведующий кафедрой технологии и оборудования пищевых производств; klevtsova1204@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-7319-9266>; SPIN-код: 7512-9026

² Гвоздев Александр Викторович, канд. техн. наук, доцент; gav11gvozdev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1401-8434>; SPIN-код: 4472-7859

³ Мирошниченко Ярослав Александрович, аспирант; vj-slim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8399-5979>; SPIN-код: 5543-8174

^{1,2,3} Мелитопольский государственный университет; Российская Федерация, г. Мелитополь, пр. Б. Хмельницкого, 18

Вклад авторов

Т.А. Клевцова – методология, создание черновика рукописи, формальный анализ, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

А.В. Гвоздев – концептуализация, формальный анализ, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

Я.А. Мирошниченко – ресурсы, создание черновика рукописи, проведение исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 27.03.2025, после рецензирования и доработки 07.09.2025; принята к публикации 08.09.2025

8. Nevzorov V.N., Kokh D.A., Kokh Zh.A. et al. The technology of grain separation by vibration car. *Bulletin of KSAU*. 2018;5:198-202. (In Russ.)

9. Shatsky V.P., Orobinsky V.I., Popov A.E. Simulation of grain flow motion in a gravitational separator. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2015;4:72-79. (In Russ.)

10. Gvozdev A.V., Klevtsova T.A., Miroshnichenko Ya.A. Process improvement gravity separation of grain. In: *Nauchno-informatsionnoe obespechenie innovatsionnogo razvitiya APK: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference*. 2023:117-124. (In Russ.)

11. Gvozdev A.V., Klevtsova T.A., Miroshnichenko Ya.A. Substantiation of the process of gravitational grain separation by modeling method. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2023;16;4:32-40. (In Russ.) https://doi.org/10.55618/20756704_2023_16_4_32-40

12. Shpiganovich T.A. Mathematical modeling of the separation of grain by slots between boost sections of the distribution cone. *Pratsi Tavriyskoho derzhavnoho ahrotekhnologichnoho universytetu = Proceedings of the Tavria State Agrotechnological University*. 2011;11;1:256-267. (In Ukr.)

13. Shpiganovich T.A., Boltjanskij B.V. Nomogramic method for multifactorial experiment results analysis. *Pratsi Tavriyskoho derzhavnoho ahrotekhnologichnoho universytetu = Proceedings of the Tavria State Agrotechnological University*. 2013;13;3:86-91. (In Ukr.)

Author Information

Tatyana A. Klevtsova¹, CSc (Eng); klevtsova1204@yandex.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-7319-9266>

Aleksandr V. Gvozdev², CSc(Eng), Associate Professor; gav11gvozdev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1401-8434>

Yaroslav A. Miroshnichenko³, postgraduate student; vj-slim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8399-5979>
^{1,2,3} Melitopol State University; 18 B. Khmeltsky Ave., Melitopol, 722312, Russian Federation

Authors Contribution

T.A. Klevtsova – methodology; writing – original draft preparation; formal analysis; writing – review and editing of the manuscript;

A.V. Gvozdev – conceptualization; formal analysis; writing – review and editing of the manuscript;

Ya.A. Miroshnichenko – resources; writing – original draft preparation; investigation.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper and are equally responsible for plagiarism.

Received 27.03.2025; Revised 07.09.2025; Accepted 08.09.2025