

ОБОСНОВАНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДЛИНЫ ЗОНЫ РАССЛОЕНИЯ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ГРАВИТАЦИОННО-ПНЕВМАТИЧЕСКОГО СОРТИРОВЩИКА СЕМЯН

С. В. КУРЗЕНКОВ, ЧЖАН СЯНЬЛЭЙ (ZHANG XIANLEI)

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

(Поступила в редакцию 22.06.2026)

Повышение качества подготовки семенного материала является одним из ключевых факторов обеспечения высокой урожайности сельскохозяйственных культур. Одним из наиболее эффективных способов селективного разделения семян по биологической полноценности является гравитационно-пневматическая сортировка, основанная на совместном воздействии вибрации, воздушного потока и сил тяжести. Вместе с тем существующие конструкции сортировщиков преимущественно разрабатываются на основе экспериментального подбора параметров, что не позволяет в полной мере учитывать закономерности движения семенного материала и взаимное влияние конструктивных и технологических факторов.

Целью исследования является теоретическое обоснование относительной длины рабочей поверхности гравитационно-пневматического сортировщика семян на основе математического моделирования процессов разделения зернового материала. В качестве объекта исследования рассмотрен гравитационно-пневматический сортировщик семян модели 5XZ-10. Выполнен анализ конструкции прототипа и принципа его работы, предложены направления совершенствования рабочей поверхности. В качестве основного конструктивного параметра принято относительное соотношение длины зоны расслоения к общей длине рабочего стола. Разработана математическая модель, связывающая эффективность разделения, производительность и энергетические затраты оборудования с рассматриваемым параметром. Для исследования поведения модели выполнено компьютерное моделирование в среде Mathcad с последующим анализом комплексного критерия оптимизации. Определены рациональные границы изменения конструктивного параметра, обеспечивающие повышение качества разделения семян при сохранении высокой производительности и снижении удельных энергетических затрат.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых и модернизации существующих гравитационно-пневматических сортировщиков семян, а также при выборе рациональных параметров рабочих органов оборудования.

Ключевые слова: *гравитационно-пневматическая сортировка, семена, рабочая поверхность, конструктивные параметры.*

Improving the quality of seed preparation is a key factor in ensuring high crop yields. One of the most effective methods for selectively separating seeds by biological value is gravity-pneumatic sorting, based on the combined effects of vibration, airflow, and gravity. However, existing sorter designs are primarily developed through experimental parameter selection, which does not fully account for the patterns of seed movement and the mutual influence of design and technological factors.

The aim of this study is to theoretically justify the relative length of the working surface of a gravity-pneumatic seed sorter based on mathematical modeling of grain separation processes. The 5XZ-10 gravity-pneumatic seed sorter is considered as the object of study. An analysis of the prototype design and its operating principle is performed, and areas for improving the working surface are proposed. The relative ratio of the length of the separation zone to the total length of the working table is adopted as the main design parameter. A mathematical model linking the separation efficiency, productivity, and energy consumption of the equipment with this parameter is developed. To study the model's behavior, computer simulation in the Mathcad environment was performed, followed by an analysis of the complex optimization criterion. Rational limits for changing the design parameter are determined, ensuring improved seed separation quality while maintaining high productivity and reducing specific energy costs.

The obtained results can be used in the design of new and modernization of existing gravity-pneumatic seed sorters, as well as in selecting rational parameters for the equipment's working parts.

Key words: *gravity-pneumatic sorting; seeds; working surface; design parameters.*

Введение

Повышение качества посевного материала является одним из важнейших факторов обеспечения высокой урожайности сельскохозяйственных культур. Использование биологически полноценных семян способствует повышению полевой всхожести, выравненности посевов и устойчивости растений к неблагоприятным условиям выращивания. В связи с этим совершенствование технологий послеуборочной обработки и сортировки семян остается одной из актуальных задач инженерного обеспечения агропромышленного комплекса [1–3, 16–18].

Одним из наиболее эффективных способов разделения семян по биологической полноценности является гравитационно-пневматическая сортировка, основанная на совместном воздействии вибрации, восходящего воздушного потока и силы тяжести. В процессе обработки формируется псевдоожиженный слой, обеспечивающий стратификацию зернового материала по плотности и аэродинамическим свойствам, что позволяет выделять наиболее полноценные семена [2–4, 19, 20].

Современные исследования показывают, что эффективность процесса определяется взаимодействием механических и аэродинамических факторов. Для анализа процессов разделения широко применяются методы математического моделирования – вычислительная гидродинамика (CFD), метод дискретных элементов (DEM) и их совместное использование, позволяющие исследовать движение зернового материала, воздушный поток и формирование стратифицированного слоя [5–14, 21]. Использование численного моделирования сокращает объем экспериментальных исследований и позволяет оптимизировать конструкцию оборудования уже на стадии проектирования.

Несмотря на существенный прогресс в моделировании процессов сепарации, большинство исследований посвящено оптимизации технологических режимов (скорости воздушного потока, параметров вибрации, производительности подачи и толщины слоя), тогда как конструктивные параметры рабочей поверхности изучены значительно меньше [18, 20]. Размеры функциональных зон сортировочного стола обычно определяются экспериментально или на основе практического опыта, при этом отсутствуют универсальные математические модели и интегральные критерии, позволяющие количественно оценивать влияние конструктивных параметров на качество разделения, производительность и энергетическую эффективность процесса [17–19].

Одним из ключевых конструктивных параметров является относительная длина зоны расслоения рабочей поверхности, определяющая продолжительность формирования стратифицированного слоя и эффективность последующего разделения зернового материала. Однако влияние этого параметра изучено недостаточно, а методы его инженерного обоснования практически отсутствуют.

В связи с этим целью настоящего исследования является разработка методики инженерного обоснования относительной длины зоны расслоения рабочей поверхности гравитационно-пневматического сортировщика семян на основе математического моделирования и комплексного критерия эффективности процесса.

Основная часть

В качестве объекта исследования рассматривался широко применяемый в Китае гравитационно-пневматический сортировщик семян 5XZ-10, конструктивная схема которого представлена на рис. 1. [19, 20].

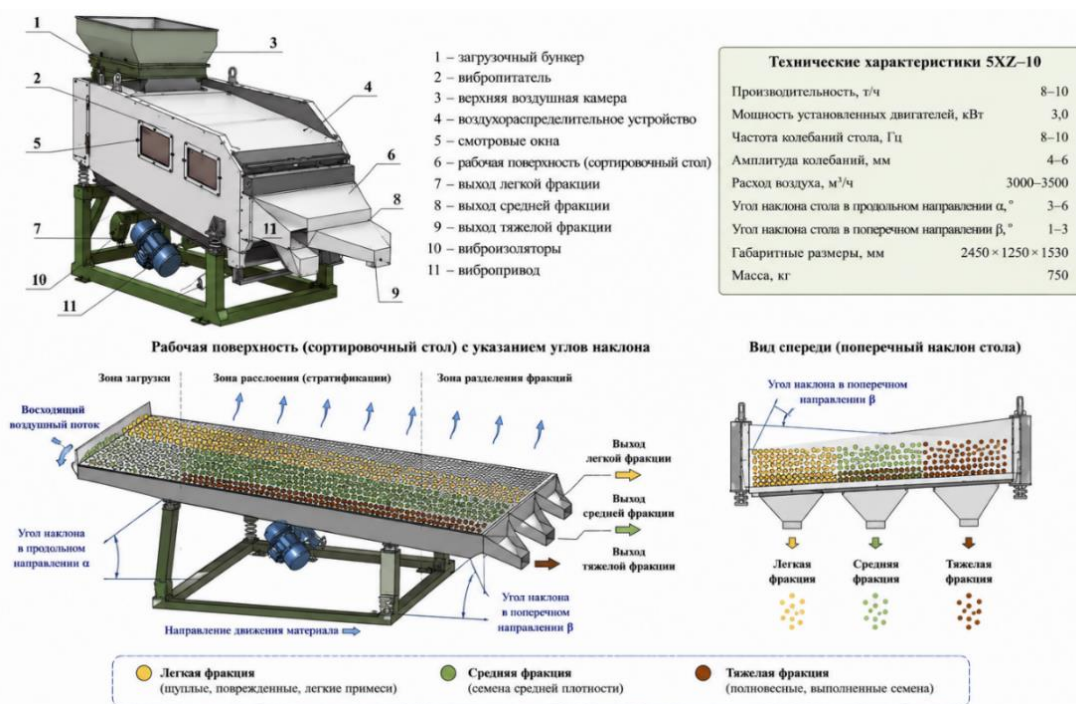


Рис. 1. Конструктивная схема гравитационно-пневматического сортировщика зерна 5XZ-10

Исходный зерновой материал из загрузочного бункера посредством вибропитателя равномерно распределяется по ширине перфорированной рабочей поверхности. Через воздухораспределительную камеру подается восходящий воздушный поток, а вибропривод сообщает рабочему столу колебательное движение. Совместное действие вибрации, воздушного потока и силы тяжести приводит к формированию псевдоожиженного слоя, в котором происходит стратификация зернового материала

по плотности и аэродинамическим свойствам. В результате тяжелые, средние и легкие фракции перемещаются по различным траекториям и выводятся через соответствующие разгрузочные каналы.

Анализ конструкции и принципа работы сортировщика показал, что эффективность разделения определяется не только режимными параметрами (скоростью воздушного потока, амплитудой и частотой колебаний, углами наклона рабочего стола), но и геометрией рабочей поверхности. Среди конструктивных параметров наибольшее влияние на процесс стратификации оказывает длина зоны расслоения, определяющая продолжительность пребывания зернового материала в области активного воздействия вибрации и воздушного потока [16, 18].

При недостаточной длине зоны расслоения процесс перераспределения частиц по плотности не успевает завершиться, что приводит к снижению качества сортировки. Чрезмерное увеличение этой зоны практически не улучшает полноту разделения, однако сопровождается ростом металлоемкости конструкции, увеличением времени обработки и снижением производительности оборудования. Следовательно, для повышения эффективности работы сортировщика необходимо определить рациональную длину зоны расслоения. Для обеспечения универсальности результатов в качестве исследуемого параметра принята не абсолютная длина зоны расслоения, а ее относительная величина $L_{отн}$, которая определяется следующим образом:

$$L_{отн} = \frac{L_{з.р}}{L_{с.ст}}, \quad (1)$$

где $L_{з.р}$ – длина зоны расслоения, м; $L_{с.ст}$ – общая длина рабочей поверхности сортировочного стола, м.

Использование относительного параметра $L_{отн}$ позволяет исключить влияние типоразмера машины и обеспечить сопоставимость результатов для различных конструкций. Физически данный параметр характеризует долю длины рабочего стола, на которой происходит стратификация зернового материала. Его увеличение приводит к возрастанию продолжительности воздействия вибрации и восходящего воздушного потока на зерновой слой, что способствует более полному перераспределению частиц по плотности и аэродинамическим свойствам. Вместе с тем чрезмерное увеличение $L_{отн}$ сопровождается снижением производительности и ростом энергетических затрат. Следовательно, существует рациональное значение относительной длины зоны расслоения, при котором достигается наиболее эффективное сочетание качества разделения, производительности и энергоэффективности. В связи с этим эффективность гравитационно-пневматической сортировки целесообразно рассматривать как функцию относительной длины зоны расслоения:

$$K_{эф} = f(L_{отн}),$$

где $K_{эф}$ – показатель эффективности процесса.

Данной гипотезе есть простое и логичное объяснение. Сама по себе относительная длина зоны расслоения $L_{отн}$ не влияет на качество разделения массы. Данный показатель изменяет время $t_{з.р}$ пребывания этой массы в интересующей нас зоне:

$$t_{з.р} = \frac{L_{з.р}}{v_{ср}} = \frac{L_{отн} \cdot L_{с.ст}}{v_{ср}}, \quad (2)$$

где $v_{ср}$ – средняя скорость перемещения зернового слоя, м.

В свою очередь именно время является физической причиной изменения качества разделения. Причем при снижении $L_{отн}$ время воздействия вибрации уменьшается и материал не успевает перераспределиться в связи с чем снижается качество его разделения на фракции. При увеличении $L_{отн}$ и соответственно $t_{з.р}$ разделяющие эффекты на слой материала увеличиваются, качество фракционного разделения растет, но при некотором значении $L_{отн}^{опт}$ этот процесс стабилизируется и изменения в перераспределении материала становятся практически незаметными. Можно заметить, что динамика процесса качества разделения материала подчиняется закону насыщения, который имеет вид экспоненциальной зависимости и широко применяется для описания процессов, скорость которых уменьшается по мере приближения к предельному состоянию:

$$K_{эф} = 1 - e^{-k_{и.пр} \cdot L_{отн}}, \quad (3)$$

где $k_{и.пр}$ – коэффициент интенсивности процесса разделения, характеризующий скорость формирования фракций материала.

Наряду с качеством разделения важнейшим показателем эффективности гравитационно-пневматического сортировщика является производительность. Однако использование абсолютной производительности $Q_{уст}$ в качестве критерия оптимизации не позволяет объективно сравнивать различные конструкции, поскольку она зависит от типоразмера машины и условий ее эксплуатации. Поэтому для оценки влияния относительной длины зоны расслоения целесообразно использовать безразмерный критерий, характеризующий степень использования потенциальной производительности машины.

Производительность определяется не только интенсивностью подачи материала, но и условиями формирования стратифицированного слоя. При чрезмерной толщине слоя тяжелые частицы не успевают перемещаться в нижние слои, а при недостаточной – рабочая поверхность используется не полностью. Следовательно, существует рациональная толщина слоя $h_{опт}$, обеспечивающая эффективное разделение при максимальном использовании пропускной способности сортировщика. Согласно теории гравитационной сепарации [3, 4, 16], эта величина определяется условиями устойчивого существования псевдооживленного слоя. Для установления связи между толщиной слоя и относительной длиной зоны расслоения рассмотрим массу зернового материала, распределенную по площади зоны расслоения:

$$m = \rho \cdot B \cdot h \cdot L_{з.р}, \quad (4)$$

где ρ – насыпная плотность семян, кг/м³; B – ширина рабочего стола, м; h – средняя толщина слоя, м.

С учетом (1) зависимость средней толщины слоя от относительной длины зоны расслоения можно записать в виде:

$$h(L_{отн}) = \frac{m}{\rho \cdot B \cdot L_{с.ст} \cdot L_{отн}}. \quad (5)$$

В качестве меры рационального использования площади рабочего стола примем безразмерную величину относительной толщины слоя зерна:

$$\frac{h}{h_{ном}} = \frac{h \cdot \rho \cdot B \cdot v_{ср}}{Q_{ном}}, \quad (6)$$

где $Q_{ном}$ – номинальная производительность сортировщика, кг/ч (номинальная производительность машины 5XZ-10, указанная изготовителем 10000 кг/ч).

Тогда критерий оптимизации производительности можно описать функцией $\Phi(x)$, которая обладает следующими свойствами: 1) ее показатель должен определяться безразмерной величиной; 2) принимать максимальное значение, равное единице; 3) стремиться к 0 при стремлении аргумента к 0; 4) иметь максимум в 1; 5) быть гладкой функцией. Таким условиям удовлетворяет функция $\Phi(x) = x \cdot e^{1-x}$, которая широко применяется в инженерном моделировании. Если принять в качестве аргумента такой функции величину относительной толщины слоя зерна, то критерия оптимизации производительности рассматриваемой установки запишется в виде:

$$K_{п}(L_{отн}) = \frac{h(L_{отн})}{h_{ном}} \cdot e^{1 - \frac{h(L_{отн})}{h_{ном}}} = \frac{m}{\rho \cdot B \cdot L_{с.ст} \cdot L_{отн} \cdot h_{ном}} e^{1 - \frac{m}{\rho \cdot B \cdot L_{с.ст} \cdot L_{отн} \cdot h_{ном}}}. \quad (7)$$

Принятый в таком виде критерий $K_{п}$ характеризует насколько эффективно реализуется потенциальная производительность машины при данной толщине зернового слоя. Фактически он отражает эффективность использования рабочего пространства зоны расслоения. При $h < h_{ном}$ наблюдается недогрузка рабочего стола: уменьшается масса материала, одновременно находящегося в зоне разделения, площадь рабочего органа используется не полностью, производительность снижается. При $h = h_{ном}$ достигается оптимальное заполнение рабочего пространства: слой полностью вовлечен в процесс стратификации, воздушный поток эффективно пронизывает весь объем материала, реализуется максимальная пропускная способность. При $h > h_{ном}$ происходит перегрузка зоны расслоения: ухудшается аэрация нижних слоев, увеличивается вероятность взаимного экранирования зерен, снижается интенсивность миграции тяжелых частиц, для сохранения качества разделения требуется уменьшить подачу материала.

Также при оценке эффективности фракционного разделения зернового материала важно учитывать энергетическую эффективность рассматриваемого процесса, так как с увеличением длины рабочего стола, увеличивается время воздушного и вибрационного воздействия на массу материала, а также увеличивается сопротивление движению материала.

При проектировании зерноочистительных машин повышение качества разделения не должно сопровождаться неоправданным ростом удельных энергетических затрат, поскольку это приводит к снижению экономической эффективности эксплуатации оборудования [4–6, 20].

Следует отметить, что относительная длина зоны расслоения непосредственно не изменяет установленную мощность электроприводов вентилятора и вибрационного механизма, которая определяется конструкцией машины. Вместе с тем изменение данного параметра оказывает влияние на продолжительность энергетического воздействия на обрабатываемый зерновой материал. При увеличении длины зоны расслоения возрастает время пребывания зернового слоя под действием вибрационных колебаний и восходящего воздушного потока, вследствие чего увеличиваются суммарные затраты энергии, приходящиеся на единицу обработанного материала.

В то же время сокращение длины зоны расслоения приводит к уменьшению времени энергетического воздействия, однако сопровождается снижением полноты стратификации зернового слоя и ухудшением качества разделения [5, 6]. Следовательно, существует рациональная продолжительность энергетического воздействия, обеспечивающая получение требуемого качества сепарации при минимально необходимых затратах энергии.

Для количественной оценки влияния относительной длины зоны расслоения на энергетическую эффективность процесса вводится коэффициент энергетической эффективности:

$$K_{\text{эн}} = \frac{E_{\min}}{E(L_{\text{отн}})} = \frac{E_{\min}}{E_{\min}(1 + k_{\text{р.э}} \cdot L_{\text{отн}})} = \frac{1}{1 + k_{\text{р.э}} \cdot L_{\text{отн}}}, \quad (8)$$

где $E_{\min}$ – минимально достижимые удельные энергозатраты при рациональном режиме работы машины, кВт·ч/т; E – удельные затраты энергии при рассматриваемом значении относительной длины зоны расслоения, кВт·ч/т; $k_{\text{р.э}}$ – коэффициент роста удельных энергозатрат.

Полученная зависимость показывает, что с увеличением относительной длины зоны расслоения возрастает продолжительность воздействия вибрации и воздушного потока на зерновой материал. В результате повышаются удельные энергозатраты, а коэффициент энергетической эффективности уменьшается.

Зависимости (3), (7) и (8) свидетельствуют, что относительная длина зоны расслоения оказывает неоднозначное влияние на эффективность процесса. Увеличение $L_{\text{отн}}$ способствует более полной стратификации зернового слоя и повышению коэффициента эффективности разделения $K_{\text{эф}}$, однако одновременно изменяет производительность машины и снижает энергетическую эффективность, характеризуемые критериями $K_{\text{п}}$ и $K_{\text{эн}}$. Следовательно, выбор рационального значения $L_{\text{отн}}$ представляет собой задачу многокритериальной оптимизации.

Поскольку критерии $K_{\text{эф}}$, $K_{\text{п}}$ и $K_{\text{эн}}$ являются безразмерными и изменяются в пределах от 0 до 1, их можно объединить в единый интегральный критерий. В качестве такого критерия принимаем мультипликативный показатель:

$$K_{\text{об}} = K_{\text{эф}} \cdot K_{\text{п}} \cdot K_{\text{эн}}, \quad (9)$$

который характеризует общий уровень эффективности функционирования гравитационно-пневматического сортировщика.

Использование мультипликативной формы имеет ряд преимуществ. Во-первых, она исключает необходимость задания весовых коэффициентов, значения которых во многих случаях определяются экспертным путем и обладают определенной субъективностью. Во-вторых, снижение любого из частных критериев приводит к соответствующему уменьшению значения интегрального показателя, что соответствует физической сущности процесса: высокая эффективность сортировки достигается только при одновременном обеспечении требуемого качества разделения, рациональной производительности и энергетической эффективности.

Таким образом, рациональное значение относительной длины зоны расслоения определяется из условия нахождения наибольшего значения интегрального критерия на отрезке изменения $L_{\text{отн}} \in [0; 1]$.

$$K_{\text{об}}(L_{\text{отн}}) \rightarrow \max, \quad (10)$$

$$L_{\text{отн}} \in [0; 1]. \quad (11)$$

Поставленная задача имеет стандартный алгоритм решения: 1) для функции $K_{\text{об}}(L_{\text{отн}})$ ищется точка подозрительная на экстремум; 2) находятся значения функции $K_{\text{об}}(L_{\text{отн}})$ на границах отрезка $[0; 1]$ и в точке подозрительной на экстремум; 3) из найденных значений п. 2 выбирается наибольшее, тем самым определяется рациональное значение $L_{\text{отн}}$.

Покажем пример моделирования данной методики в MathCad рис. 2.

Исходные данные:

$$L_{ст} := 2.45 \quad \text{м} \quad \text{Общая длина рабочего стола}$$

$$v := 0.18 \quad \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad \text{Скорость перемещения зернового слоя}$$

$$Q_{ном} := 10000 \quad \frac{\text{кг}}{\text{ч}} \quad Q_{ном.с} := \frac{Q_{ном}}{3600} = 2.778 \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad \text{Номинальная производительность машины}$$

$$m := 16 \quad \text{кг} \quad \text{Масса расчетной партии}$$

$$k_{и.пр} := 0.35 \quad \text{с}^{-1} \quad \text{Коэффициент интенсивности разделения}$$

$$k_{р.эн} := 1.8 \quad \text{Коэффициент роста энергозатрат}$$

$$E_{мин} := 1 \quad \text{Вт ч/кг} \quad \text{Минимальные удельные энергозатраты}$$

$$\Delta L_{отн} := 0.01 \quad \text{Шаг изменения } L_{отн}$$

$$\rho := 720 \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad \text{Плотность зерна}$$

$$B := 1.25 \quad \text{Ширина сортировального стола}$$

Расчетные данные:

$$L_{зр}(L_{отн}) := L_{отн} \cdot L_{ст} \quad \text{Следствие из формулы (1)}$$

$$t_{зр}(L_{отн}) := \frac{L_{зр}(L_{отн})}{v} \quad \text{Формула (2)}$$

$$K_{эф}(L_{отн}) := 1 - e^{-k_{и.пр} \cdot t_{зр}(L_{отн})} \quad \text{Формула (3)}$$

$$Q_{рац}(L_{отн}) := \frac{m}{t_{зр}(L_{отн})} \quad \text{Рациональная производительность}$$

$$h(L_{отн}) := \frac{m}{\rho \cdot B \cdot L_{отн} \cdot L_{ст}} \quad \text{Формула (5)}$$

$$h_{ном} := \frac{Q_{ном.с}}{\rho \cdot B \cdot v} \quad \text{Номинальная толщина слоя}$$

$$K_{п}(L_{отн}) := \frac{h(L_{отн})}{h_{ном}} \cdot e^{\left(1 - \frac{h(L_{отн})}{h_{ном}}\right)} \quad \text{Формула (7)}$$

$$E(L_{отн}) := E_{мин} \cdot (1 + k_{р.эн} \cdot L_{отн}) \quad \text{Формула (8)}$$

$$K_{эн}(L_{отн}) := \frac{E_{мин}}{E(L_{отн})}$$

$$K_{об}(L_{отн}) := K_{эф}(L_{отн}) \cdot K_{п}(L_{отн}) \cdot K_{эн}(L_{отн}) \quad \text{Формула (9)}$$

Рис. 2. Пример моделирования в MathCad

Графический анализ зависимости интегрального критерия $K_{об}$ от относительной длины зоны расслоения $L_{отн}$ (рис. 3) показывает наличие наибольшего значения этого критерия достигается при $L_{отн} = 0,394$.

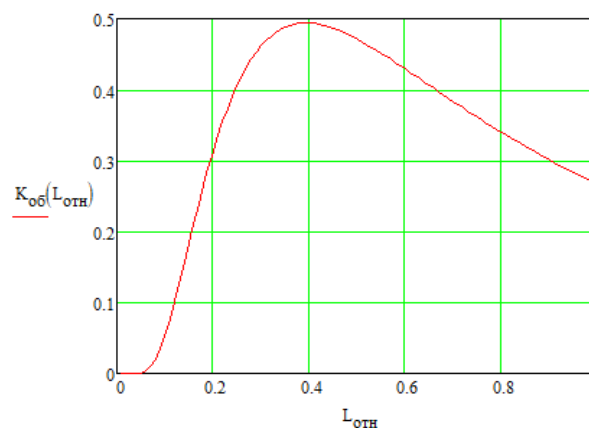


Рис. 3. Зависимость интегрального критерия $K_{об}$ от относительной длины зоны расслоения $L_{отн}$ при принятых значениях исходных данных

Результаты компьютерного моделирования показывают, что зависимость интегрального критерия эффективности от относительной длины зоны расслоения имеет выраженный экстремальный характер (рис. 3), что свидетельствует о существовании рационального значения данного конструктивного параметра. При малых значениях ($L_{отн} < 0,4$) интегральный критерий быстро возрастает вследствие увеличения времени совместного воздействия вибрации и воздушного потока на зерновой материал.

Это способствует формированию устойчивого псевдооживленного слоя, снижению межзерновых контактов и более полному разделению частиц по плотности, что приводит к существенному росту эффективности разделения.

С дальнейшим увеличением $L_{отн}$ прирост интегрального критерия замедляется, поскольку процесс стратификации приобретает асимптотический характер. После формирования устойчивой структуры слоя дополнительное увеличение времени обработки практически не повышает качество разделения, однако сопровождается ростом удельных энергозатрат, снижением энергетической эффективности и ухудшением использования потенциальной производительности машины вследствие изменения толщины зернового слоя. В результате положительный эффект повышения качества разделения компенсируется снижением производительности и энергетической эффективности.

Максимум интегрального критерия соответствует динамическому равновесию между указанными факторами, при котором обеспечиваются практически полное завершение стратификации, рациональная производительность и минимально необходимые удельные энергозатраты. Следовательно, найденное значение $L_{отн}$ следует рассматривать как рациональный конструктивный параметр рабочей поверхности гравитационно-пневматического сортировщика.

Поскольку максимум определяется безразмерным параметром $L_{отн}$, результаты обладают универсальностью и могут использоваться при проектировании сортировщиков различной производительности после пересчета абсолютных размеров рабочей поверхности. Такой подход позволяет заменить эмпирический выбор параметров их инженерным обоснованием на основе математического моделирования.

Полученные результаты согласуются с современными представлениями о движении зернового материала в виброаэродинамических системах, согласно которым эффективность разделения определяется как интенсивностью воздействия внешних сил, так и временем формирования устойчивого стратифицированного слоя [21, 22].

Практическая ценность работы заключается в возможности определения рациональных геометрических параметров рабочей поверхности еще на стадии проектирования без проведения большого объема дорогостоящих экспериментов. Использование интегрального критерия обеспечивает комплексный учет качества разделения, производительности и энергетической эффективности, что делает предложенную методику эффективным инструментом проектирования и модернизации гравитационно-пневматических сортировщиков семян [22, 23].

По результатам моделирования рекомендуется принимать следующие рациональные параметры процесса: длина зоны расслоения – 0,965 м, время пребывания зерна в зоне расслоения – 5,4 с, производительность установки – 10 741 кг/ч, толщина слоя – 0,018 м. При этом удельные энергозатраты на фракционное разделение составляют 1,709 Вт·ч/кг, а значения предложенных критериев оптимизации соответствуют области максимальной эффективности процесса.

Заключение

В результате исследований разработан теоретический подход к инженерному обоснованию относительной длины зоны расслоения рабочей поверхности гравитационно-пневматического сортировщика семян на основе математического моделирования процесса разделения зернового материала.

Установлено, что относительная длина зоны расслоения является одним из ключевых конструктивных параметров, определяющих полноту стратификации зернового слоя, производительность оборудования и удельные энергозатраты. Показано, что увеличение данного параметра повышает эффективность разделения до области насыщения, однако сопровождается снижением энергетической эффективности и изменением производительности, что требует многокритериальной оптимизации.

Разработана математическая модель, включающая критерии эффективности разделения, относительной производительности и энергетической эффективности, объединенные в интегральный критерий оптимизации. Компьютерное моделирование в среде Mathcad подтвердило существование рационального значения относительной длины зоны расслоения, обеспечивающего максимум интегрального критерия, и позволило определить рациональные конструктивно-технологические параметры процесса.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации гравитационно-пневматических сортировщиков семян, а также служить основой для дальнейшего развития математических моделей с учетом физико-механических свойств различных сельскохозяйственных культур и их экспериментальной проверки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang Y. J., Chung D. S., Spillman C. K. et al. Evaluation of laboratory grain cleaning and separating equipment. Part I // Transactions of the ASAE. 1994. Vol. 37. No. 2. P. 507–513. DOI: 10.13031/2013.28105.

2. Sokhansanj S., Fang R., Opoku A. Influence of physical properties and operating conditions on particle segregation on gravity table // *Canadian Agricultural Engineering*. 1999. Vol. 41. P. 45–52.
3. Kunii D., Levenspiel O. *Fluidization Engineering*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.
4. Rhodes M. *Introduction to Particle Technology*. 3rd ed. Chichester: Wiley, 2023.
5. El-Emam M. A., Zhou L., Shi W. et al. Theories and Applications of CFD–DEM Coupling Approach for Granular Flow: A Review // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2021. Vol. 28. P. 4979–5020. DOI: 10.1007/s11831-021-09568-9.
6. Maraveas C. *Agricultural Processes Simulation Using Discrete Element Method: A Review* // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025. Vol. 237. Article 110733.
7. Chen P., Zhang J. et al. Investigation of the Mechanism of Aerodynamic Separation of Rice Husks from Brown Rice Following Paddy Hulling by Coupled CFD–DEM // *Biosystems Engineering*. 2022. Vol. 218. P. 200–217. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2022.03.015.
8. Xu Z., Li Y., Wan L. et al. Optimising the Design of Ball Racks to Improve the Sorting Efficiency of Vibrating Screen Seed Cleaners Using Discrete Element Method Modelling and Experiment // *Biosystems Engineering*. 2023. Vol. 225. P. 99–117. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2022.12.006.
9. Liu X. et al. Prediction of the Non-Uniform Drying of Wet Grain in a Fluidised Bed Based on a Modified CFD–DEM Drying Model // *Biosystems Engineering*. 2024. Vol. 236. P. 103–121.
10. Zhou B., Ma S., Li W. et al. CFD–DEM Coupling Simulation and Parameter Optimisation of Sugarcane Harvester Extractor // *Biosystems Engineering*. 2025. Vol. 250. P. 80–93. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2024.12.003.
11. Feng X., Gao Y., Wang L. et al. Investigation of the Gas–Solid Two-Phase Motion in the Cleaning Device with Imitating the Pigeon Feather Sieve Based on the CFD–DEM Method // *Biosystems Engineering*. 2025. Vol. 257. Article 104233.
12. Zheng X., Zhu C., Song J. et al. Behavior Analysis of Wheat Seeds during Specific Gravity Sorting Process Based on CFD–DEM Coupling Method // *Powder Technology*. 2026. Article 122464. DOI: 10.1016/j.powtec.2026.122464.
13. Hu H., Li X. et al. Distribution Characteristics and Parameter Optimisation of an Air-Assisted Centralised Seed-Metering Device for Rapeseed Using a CFD–DEM Coupled Simulation // *Biosystems Engineering*. 2021. Vol. 208. P. 246–262. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2021.06.005.
14. Kuang S., Chu K., Yu A. CFD–DEM Modelling and Simulation of Pneumatic Conveying: A Review // *Powder Technology*. 2020. Vol. 365. P. 186–207.
15. Jammeh P. T., Hulke B. S., Prasifka J. R., Monono E. Recent Advances in Seed Separation Technologies and Quality Evaluation of Major Grain Crops: A Review // *Journal of Food Process Engineering*. 2026.
16. Курзенков, С.В. Предпосевная обработка семян сельскохозяйственных культур в концепции развития аграрных отраслей Беларуси и Китая / С. В. Курзенков, Цзюньянь Лу, Сяньлэй Чжан, В. М. Кузюр, С. И. Будко // *Вестник Брянской ГСХА*. – 2025. – № 5(111). – С. 51–56.
17. Курзенков, С.В. Семеноводство Республики Беларусь и Китая, его нормативное сопровождение, структура и организация / Курзенков, С. В., Чжан, Сяньлэй Семеноводство Республики Беларусь и Китая, его нормативное сопровождение, структура и организация // *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2025. – № 2. – С. 70–76.
18. Чжан Сяньлэй. Анализ факторов, принимаемых во внимание в ходе очистки и селективной сортировки семян сельскохозяйственных культур Сяньлэй Чжан, С. В. Курзенков // *Актуальные вопросы механизации сельскохозяйственного производства: материалы международной научной конференции студентов и магистрантов* / ред-кол.: В. В. Гусаров (гл. редактор) [и др.]. – Горки: БГСХА, 2025. – С. 107–109.
19. Курзенков, С.В. Методы очистки и селективной сортировки семян, их преимущества и недостатки / С. В. Курзенков, Сяньлэй Чжан // *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2025. – № 3. – С. 89–92.
20. Чжан, Сяньлэй Текущее состояние и пути совершенствования оборудования для очистки и сортировки семян в Китае / Сяньлэй Чжан // *Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 160-летию Тимирязевской академии, г. Москва, 2-4 июня 2025 г.: сборник статей. Том 2* / Коллектив авторов [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые, граф. данные (29,8 Мб). – Москва: Издательство РГАУ - МСХА, 2025. – С. 319 – 321.
21. Чжан Сяньлэй Очистка и селективная сортировка зерна, как ключевые операции производства семенного материала в Китае / Сяньлэй Чжан, С. В. Курзенков // *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2025. – № 4. – С. 67–71.
22. Курзенков, С.В. Теоретические основы интеллектуальной селекции семян на основе гиперспектрального анализа и методов машинного обучения С. В. Курзенков, Сяньлэй Чжан // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2026. № 1 (117). С. 149–157.
23. Курзенков, С.В. Современные методы очистки и селективной сортировки семян: технические характеристики, эффективность и перспективы развития / Курзенков С. В., Сяньлэй Чжан. // *Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр.: в 2 ч. / редкол.: В. В. Гусаров (гл. ред.) [и др.]. – Горки: Белорус. гос. с.-х. акад., 2026. – Вып. 11. – Ч. 1. – с. 208–213.*