

СИСТЕМНЫЙ ОБЗОР РЕШЕНИЙ ДЛЯ ДВУХСТРОЧНОГО ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОСЕВА КУКУРУЗЫ: ПНЕВМАТИЧЕСКОЕ ГРУППОВОЕ ДОЗИРОВАНИЕ, СОШНИКОВАЯ ГРУППА И МЕТРОЛОГИЯ КАЧЕСТВА

ЛЯН ЭНЫЦЯН, КОНГ ЦЗЯЛИ, В. С. АСТАХОВ, Г. О. ИВАНЧИКОВ

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407

(Поступила в редакцию 10.04.2026)

Целью обзора было систематизировать решения для двухстрочного высокоскоростного посева кукурузы по трем узлам системы: пневматическое групповое дозирование, пневмотракт с разветвлением на ветви и сошниковая группа с подвеской. Рассматривались публикации за 2015–2025 годы из Web of Science и Scopus с полнотекстовым описанием методик и статистики. Из источников извлекались параметры дозатора и пневмотракта, геометрия Y-узла и плеч, тип бороздника и настройки подвески, а также отчетные метрики качества. Показатели приводились к сопоставимому формату по шагу, глубине, повреждаемости, межрядовому балансу и энергозатратам. Обобщение показало, что удержание шага на высокой скорости связано со стабильной зоной разрежения, геометрией отверстий и согласованием момента сброса с направляющей, а элементы рассеяния энергии после отделения уменьшают вторичные сдвоения. Для пневмотракта решающим является зеркальное равенство гидросопротивлений плеч, подтверждаемое отдельным контролем давления до Y-узла и ветвевых расходов и времен прихода. В почвенном контакте узкий двойной диск улучшает резку и формирование борозды на фоне мульчи, надежность глубины поддерживается демпфированной параллелограммной подвеской и корректной нагрузкой на ограничительные колеса при зеркальных настройках пары рядов. Предложен минимальный набор сопоставимых метрик и требований к отчетности, что облегчает сравнение исследований.

Ключевые слова: высокоскоростной посев, пневматическое групповое дозирование, Y-разветвитель, сошниковая группа, равномерность высева, глубина залегания.

The objective of this review was to systematize solutions for two-row high-speed corn seeding across three system components: pneumatic group metering, a pneumatic system with branching, and an opener group with a suspension. Publications from 2015–2025 from Web of Science and Scopus with full-text descriptions of methods and statistics were reviewed. The parameters of the dispenser and pneumatic system, the geometry of the Y-node and arms, the furrow opener type and suspension settings, and the reported quality metrics were extracted from sources. The parameters were standardized for spacing, depth, damage, inter-row balance, and energy consumption. The analysis revealed that maintaining the spacing at high speed is associated with a stable vacuum zone, orifice geometry, and the coordination of the release moment from the guide, while energy dissipation elements after separation reduce secondary doubling. For the pneumatic system, the mirror-image equality of the hydraulic resistance of the arms is crucial, confirmed by separate monitoring of the pressure before the Y-node, branch flow rates, and arrival times. In soil contact, a narrow double disc improves cutting and furrow formation against the mulch background, while depth reliability is maintained by a damped parallelogram suspension and the correct load on the limit wheels with mirror-image settings for a pair of rows. A minimum set of comparable metrics and reporting requirements is proposed, facilitating comparison of studies.

Key words: high-speed seeding, pneumatic group dosing, Y-splitter, seeding unit, seeding uniformity, seeding depth.

Введение

На полях вегетационные окна короткие, а погодные риски меняются быстрее, чем цикл планирования работ. Тракторные звенья часто выполняют посев в сжатые сроки, когда каждая дополнительная километровая скорость дается ценой большей вибрации агрегата и нестабильного воздушного режима в дозаторе. В этих условиях именно начальный отбор зерновки и момент ее освобождения определяют, попадет ли семя в направляющую с нужной ориентацией и скоростью. Испытания моторизованных высевальных систем показывают, что при корректной настройке вакуума и геометрии отверстий шаг удастся удерживать и на возрастающих скоростях, однако задержка очистки ячейки или неполное заполнение быстро превращаются в сдвоения и пропуски, то есть в прямые потери равномерности [1].

Двухстрочная схема позволяет увеличить производительность за один проход, но вместе с тем вводит требование симметрии по всему пневмотракту. Даже небольшая разница длины плеч, радиусов поворотов или переходных сечений меняет гидравлическое сопротивление ветвей и ведет к различию расходов, а затем и к сдвигу времени прихода частиц к сошникам. На рыхлых и неоднородных посевных ложах этот эффект усиливается с ростом скорости и выливается в разброс межсеменных расстояний. Полевые и полигонные сравнения пневматических сеялок при разных уровнях подготовки ложа подтверждают зависимость равномерности от скорости хода, устойчивости источника разрежения и настроек распределения по ветвям [2].

В зоне контакта с почвой решающее влияние оказывает сочетание профиля бороздника и поведения подвески. Узкий двойной диск чище разрезает растительные остатки и формирует узкую щель, что уменьшает боковой увод семени и помогает удерживать глубину на кочковатых участках. Анкерные и долотообразные формы полезны для локального рыхления и разрушения уплотнений, но сильнее откликаются на колебания вертикальной нагрузки и требуют более строгой настройки прижимно-

го усилия и демпфирования сочленений. Длительные опыты на системах с сохраненной мульчей показывают, что выбор геометрии открывателя в связке с калибровкой колес глубины и прижимной нагрузки улучшает исходные условия для прорастания и снижает разброс фактической глубины при повышенной скорости движения [3].

Нарастающее использование датчиков расхода, давления и событий прихода частиц делает возможной оперативную диагностику и коррекцию настроек в поле. Контроль по двум ветвям распределения, совмещенный с мониторингом разрежения у узла отбора, помогает отличать источник пульсаций от локальных геометрических причин и своевременно выравнивать режимы подачи. В результате сохраняются базовые показатели качества посева: продольная равномерность, равномерность глубины и низкая повреждаемость семян, а также поддерживается синхронность межстрочного расхода при экономном энергопотреблении вентилятора и приемлемом тяговом сопротивлении агрегата [1–3].

Цель статьи состоит в систематизации и проверке решений для двухстрочного высокоскоростного посева кукурузы. Обобщаем исследования 2015–2025 годов по дозатору, пневмотракту, борозднику и подвеске и предлагаем набор метрик и процедур стендовых и полевых испытаний, которые позволяют повышать скорость без потери равномерности и глубины

Основная часть

Поиск выполнен в Web of Science и Scopus за 2015–2025 годы. Ключевые слова: maize precision seeding, pneumatic group metering, two row planting, seed spacing uniformity, depth uniformity, furrow opener, row unit suspension. К рассмотрению принимались статьи с полнотекстовыми описаниями методик и статистической обработкой. В качестве реперных работ по высокоскоростным дозаторам использованы исследования по пневматическим устройствам для кукурузы с указанием скоростных диапазонов и схем испытаний [4, 5].

К включению принимались исследования с воспроизводимыми стендовыми или полевыми схемами, где заданы скорость движения, норма высева, состояние посевного ложа и настройки пневмосистемы. Исключались публикации без протокола измерений или без отчетных метрик. В выборку входили работы по высокоскоростным дозаторам и их проверке на стенде или в поле с контролем вакуума и момента освобождения зерновки [6, 7].

Из каждой статьи извлекались параметры дозатора и пневмотракта, геометрия развилки и плеч распределения, профиль бороздника, характеристики подвески сошников, настройки колес глубины, а также фон почвы и мульчи. Отдельно фиксировались факторы, влияющие на глубину и начальные условия для всходов, включая тип закрывающих колес и прижимную нагрузку [8].

Показатели качества трактовались в единой форме. Продольная равномерность оценивалась по долям пропусков и сдвоений и по вариации межсеменного шага. Для регистрации шага применялись разметка выборок, видеофиксация и автоматизированная обработка событий. Равномерность глубины оценивалась по среднему отклонению, стандартному отклонению и доле выходов за допуск с использованием точечного зондирования и профилометрии посевного ложа [9, 10].

Для интерпретации публикаций по распределительным системам применялась суммарная модель потерь давления в многоветвевом пневмотракте, объединяющая вольтрубные и местные сопротивления:

$$\Delta p_{tot} = f \times L/D \times \rho v^2/2 + (\sum K) \rho v^2/2 \quad (1)$$

где f – коэффициент трения, L – длина участка, D – внутренний диаметр, ρ – плотность воздуха, v – средняя скорость потока, $\sum K$ – сумма местных коэффициентов. Использование формулы и ее калибровка для многоотводных магистралей пневмосеялок опираются на исследования по прогнозу суммарных потерь давления [11].

Обобщение данных выполнялось как доказательное сведение без введения новых процедур. На этапе скрининга по заголовкам и аннотациям исключались работы без описания методик и статистики. На полном тексте фиксировались культура, скорость, норма высева, состояние посевного ложа и настройки пневмосистемы. Из каждой статьи извлекались и приводились к общему формату отчетные метрики: доли пропусков и сдвоений и коэффициент вариации шага, среднее отклонение и стандартное отклонение глубины и доля выходов за допуск, повреждаемость в %, расход и энергозатраты. Показатели в разных единицах переводились в сопоставимые величины, а при наличии только счетчиков пересчитывались в доли по стандартным формулам, описанным в публикациях по измерению межсеменных расстояний и переменной глубины посева [9, 10]. При наличии сенсорных данных о расходе, давлении и событиях прихода частиц сведения учитывались как часть опубликованных результатов без добавления новых измерений [12, 13].

1. Высевающие аппараты и групповая подача

В стендовых сериях для пневматических дозаторов фиксировалось, что при росте поступательной скорости сокращается время контакта зерновки с ячейкой и увеличивается доля незаполненных ячеек, стабильная зона разрежения и корректная геометрия отверстий удерживали шаг, тогда как запаз-

дывание очистки провоцировало сдвоения, а смещение точки сброса усиливало вторичные столкновения в направляющем канале [4, 5, 6].

Изменение геометрии отверстий и положения точки сброса сдвигает фазу отделения относительно входа в направляющую, при достаточном вакууме зерновка покидает диск с вектором скорости, согласованным с осью канала, что уменьшает боковой увод и время успокоения в потоке, применение электропривода упрощает синхронизацию фазы отделения с поступательной скоростью агрегата и сужает распределение межсеменного шага на высоких скоростях [5, 7].

Важна работа тракта сразу после отделения, включение элементов рассеяния энергии снижает модуль скорости и число отскоков, тем самым уменьшается вероятность вторичных сдвоений у приемного окна и сгущений на коротких интервалах, эффект проявлялся сильнее при высоких частотах отделения и малых радиусах входных кривых направляющей [6]. Связка кинематики и целевого шага удобна в форме:

$$S^* = \frac{v}{R} \quad (2)$$

где v – поступательная скорость, R – частота выдачи семян на ряд, практические методики контроля межсеменных расстояний используют это соотношение для интерпретации причин отклонений и связывают рост вариации шага с фазовым дрожанием момента сброса и с последующими взаимодействиями частицы в канале [10].

В двухстрочной схеме требует внимания отрезок от выхода дозатора до входа в распределение, различия траекторий левого и правого канала и локальные пульсации разрежения до Y узла приводят к сдвигу времен прихода частиц к сошникам и к расхождению расходов по плечам, этот эффект проявлялся как межрядовая несинхронность на скоростях, близких к верхней границе диапазона для дозатора [11, 12].

Настройка пары дозатор и вход распределителя целесообразна в зеркальной компоновке, одинаковые радиусы поворотов, одинаковая длина подводящих участков и одинаковые переходные сечения уменьшают разность гидросопротивлений и стабилизируют временную структуру потока, что облегчает последующую задачу равномерного распределения в ветвях [11, 12].

Смысл обращения к формуле потерь давления в следующей подглаве состоит в том, чтобы увязать выход дозатора с условиями приема частиц распределителем. Суммарные потери на участке до развилки задают локальный режим разрежения и форму импульса расхода, а близость гидросопротивлений ветвей снижает разброс времен прихода к сошникам, тем самым уменьшая вклад межрядовой асинхронии в вариацию межсеменного шага [11, 12].

2. Пневмотракт и симметрия распределения

В Y -разветвителе даже небольшое отличие длины и радиусов поворотов между ветвями сразу меняет распределение расхода, поэтому плечи задают зеркально по длине, числу и типу соединений, избегают резких переходов сечений и локальных расширений, поскольку каждое такое место добавляет потери и усиливает небаланс, эту чувствительность к геометрии подтверждают исследования многоотводных трактов для пневмосеялок и работы по равномерности распределения в коллекторных системах [14, 15].

Связать геометрию с наблюдаемыми показателями удобно через суммарные потери по формуле (1), в качестве операционного индикатора вводят неравенство по давлению $\varepsilon_p = |\Delta p_L - \Delta p_R| / \bar{\Delta p}$, на практике малые ε_p сопровождаются малой разницей ветвевых расходов $|F_L - F_R| / \bar{F}$ и небольшим сдвигом времен прихода частиц $|T_L - T_R|$, то есть все три индикатора реагируют на те же локальные потери и на отношение L/D в плечах, что согласуется с экспериментальными и численными результатами по коллекторам и трубным ответвлениям [15, 16].

Диагностика причин удобна через отдельные точки контроля: $P1$ у источника разрежения и $P2$ перед Y -элементом, колебания на $P1$ указывают на режим вентилятора, расхождения на $P2$ при стабильном источнике сигнализируют о проблемах подводящего участка, баланс по расходу F_L, F_R и сдвиг времен T_L, T_R дают простой признак межветвевой синхронности, такие каналы контроля описаны в работах по высокоскоростным пневматическим системам подачи семян и узлам распределения [17, 18].

Если компоновка не позволяет полного зеркала, действуют малыми шагами, увеличивают радиусы колен, сокращают число соединений, выравнивают переходные сечения, на низкоомной ветви допускают малое дроселирование, цель формулируют как равенство эквивалентных сумм локальных коэффициентов в обеих ветвях, тогда по формуле (1) получают сравнимые Δp в рабочем диапазоне, а контроль ведут по триаде индикаторов $\varepsilon_p, |F_L - F_R| / \bar{F}, |T_L - T_R|$ [14, 15]. Структурные связи и точки контроля показаны схематично на рис. 1.

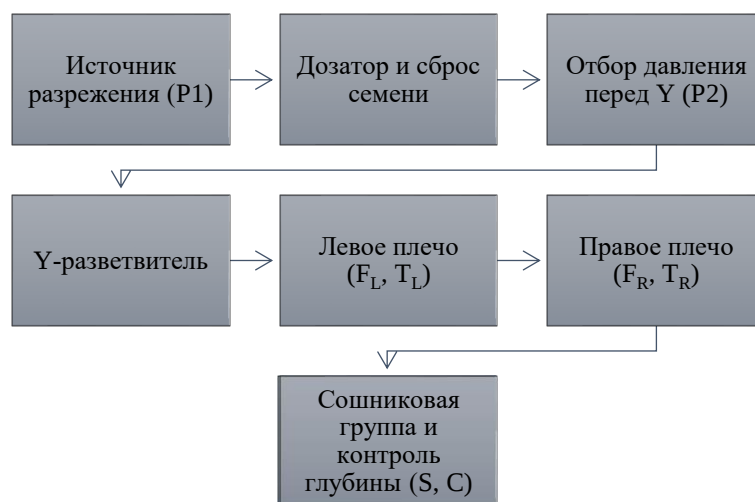


Рис. 1. Симметричное распределение и контроль глубины (P1, P2 – точки измерения давления; F_L, F_R – расход по ветвям; T_L, T_R – времена прихода частиц; S – датчики глубины; C – контроллер)

3. Бороздники и сошниковая подвеска для высоких скоростей

В остатках мульчи на высоких скоростях узкий двойной диск уверенно разрезает и отводит растительный материал, формируя стабильную щель с малой шириной возмущения почвы, что снижает риск «закалывания» и улучшает контакт семени с почвой [19, 21]. В условиях плотной мульчи и переувлажнения анкерные и долотообразные органы облегчают проникновение и поддерживают требуемую глубину, но сопровождаются большей зоной смещения почвы и ростом тягового сопротивления, что заметно на скоростях свыше 8–10 km/h [20, 22]. Сопоставительные испытания дисковых решений показывают, что геометрия режущей кромки и рабочая глубина меняют соотношение «эффективность резки соломы – возмущение почвы – тяговые усилия», при этом узкие вертикальные диски дают более высокую долю резки при меньших усилиях, чем профилированные культеры [21, 22].

На динамику выдерживания глубины влияет кинематика параллелограммной подвески, собственные частоты и демпфирование сочленений, а также поперечные люфты и износ пальцев. Вертикальные ускорения ряда растут с увеличением поступательной скорости, и без настроек по демпфированию, и прижатия, что приводит к дрожанию глубины и к росту вариации межсеменного шага [23]. Диаметр и охват ограничительных колес работают как фильтр микрорельефа: больший диаметр и оптимальный угол обхвата уменьшают чувствительность к мелким неровностям, но при недостаточной нагрузке колес глубина становится зависимой от твердости ложа; автоматизированное поддержание нагрузки на колеса обеспечивает удержание целевой глубины в неоднородном фоне [24, 25].

Для двухстрочной схемы важна зеркальная согласованность левого и правого плеч: одинаковые диаметры и давление в колесах, идентичные углы атаки дисков, совпадающие настройки ограничителей глубины. Малые расхождения в колесной нагрузке и в углах вводят различие в сопротивлении и фазовый сдвиг вертикальных колебаний, что проявляется как межрядовая разница глубины и ухудшение синхронности появления всходов [23, 24]. На практике это требует регулярной метрологии узлов, контроля зазоров в шарнирах и калибровки датчиков нагрузки для обоих рядов.

Ключевые отличия по геометрии, устойчивости глубины, энергозатратам и требованиям к подвеске приведены в табл. 1; таблица служит кратким ориентиром выбора конструкции под сценарии высокой скорости и сохраненной мульчи [20, 22].

Таблица 1. Сравнение типов бороздников в условиях высокой скорости и сохраненной мульчи

Тип	Резка и борозда	Глубина на скорости	Энергия и эксплуатация
Узкий двойной диск	Резка высокая; щель узкая	Стабильна при достаточной нагрузке колес	Энергозатраты низкие–средние; нужен параллелограмм с демпфированием; зеркальная геометрия
Анкерный	Проникновение хорошее; вынос почвы выше	Средняя; падает на твердом фоне и при росте скорости	Энергозатраты средние–повышенные; усиленная стойка; контроль зазоров; крупные колеса
Долотообразный	Раскрытие агрессивное; риск рваной стенки	Средняя; требует большего прижатия	Энергозатраты повышенные; высокая нагрузка узлов; настройка углов для пар рядов

4. Свод и нормализация показателей для междисциплинарного сравнения

В одних публикациях доли пропусков и сдвоений приводятся как счетчики событий, в других, в процентах, встречается и коэффициент вариации шага без исходных выборок, поэтому из каждой статьи извлекались минимально нужные величины и выполнялось приведение к долям в процентах и

к коэффициенту вариации, чтобы оставалась сопоставимость по скорости и норме высева, подход согласуется с текущими работами по оценке равномерности и автоматической коррекции шага [26, 27]. Для случаев с несколькими режимами скорости показатели заносились построчно как отдельные наблюдения, чтобы сохранить различия условий [26].

С глубиной посева источники сообщают среднее отклонение от заданной глубины, диапазон или стандартное отклонение, часть работ указывает долю выходов за допуск, в сводной таблице значения приводились к паре среднее и стандартное отклонение плюс доля выходов за допуск, при наличии порога и количества нарушений выполнялся прямой пересчет по тексту статьи [28, 29]. Различия методов измерения глубины фиксировались в метаданных, чтобы при сопоставлении учитывать методику автора [28].

По повреждаемости семян извлекался процент поврежденных после дозатора и пневмотракта, для нескольких сортов или фракций каждая комбинация заносилась отдельной строкой, для межстрочной согласованности фиксировались баланс расхода по плечам и сдвиг времен прихода частиц, значения брались в единицах источника, затем нормировались до безразмерных разностей или миллисекунд, что соответствует практике в работах по распределителям и высокоскоростным пневмосистемам [30, 31]. Дополнительно учитывались сообщения об уровне вибраций рядового узла, если авторы связывали их с вариацией шага и дрожанием глубины [32].

Энергетические данные приводились к удельным затратам на гектар, если имелись мощность вентилятора и тяговое усилие, при частичной отчетности добавлялась пометка о типе пересчета, чтобы не смешивать методы в итоговом сопоставлении [33]. Минимальный набор извлекаемых метрик, способ приведения к единому формату и отчетные величины сведены в табл. 2.

Таблица 2. Ключевые метрики и приведение к единому формату для сопоставления

Показатель	Определение в источниках	Приведение к единому формату	Отчетные величины
Равномерность по шагу [26, 27, 28]	Пропуски, сдвоения, межсеменные расстояния	Счетчики переводятся в проценты; шаг приводится к среднему значению и коэффициенту вариации	Процент пропусков, процент сдвоений, коэффициент вариации шага
Глубина заделки [28, 29]	Среднее отклонение, стандартное отклонение, доля выходов за допуск	Значения унифицируются до пары среднее и стандартное отклонение; доля за допуск указывается в процентах	Среднее отклонение, стандартное отклонение, процент выходов за допуск
Повреждаемость семян [30]	Доля поврежденных после прохождения тракта	Все значения приводятся к процентам с указанием фракции и режима	Процент поврежденных семян
Межстрочная согласованность [30, 31]	Баланс расхода по ветвям, сдвиг времен прихода частиц	Разность расходов представляется как доля от среднего расхода; временной сдвиг указывается в миллисекундах	Нормированная разность расходов ветвей, сдвиг времен прихода частиц в миллисекундах
Энергозатраты [33]	Мощность вентилятора и тяговое усилие	Пересчет к удельным энергозатратам на гектар при наличии ширины захвата и режима	Удельные энергозатраты на гектар и способ пересчета
Условия испытаний [28, 32]	Почва, мульча, скорость, норма высева, конфигурация узлов	Фиксация как метаданные без пересчета	Полное текстовое описание условий и настроек для воспроизводимости

Заключение

В собранных работах прослеживается простой каркас факторов, от которых зависит качество двухстрочного высокоскоростного посева кукурузы. В дозаторе устойчивый вакуум, корректная геометрия отверстий и согласованный момент сброса с вводом в направляющую удерживают шаг, элементы рассеяния энергии после отделения снижают отскоки, долю сдвоений и повреждаемость. В пневмотракте решающими оказываются зеркальная геометрия Y-разветвителя и плеч, равенство гидросопротивлений и отдельный контроль давления и ветвевых параметров, что уменьшает перекося расход и сдвиг времен прихода частиц. В зоне почвенного контакта узкий двойной диск надежнее режет остатки и формирует щель под мульчей, а стабилизацию глубины обеспечивают демпфированная параллелограммная подвеска и корректная нагрузка на ограничительные колеса при зеркальных настройках пары рядов. Для сопоставимости исследований достаточно краткого набора метрик по шагу, глубине, повреждаемости, межрядовому балансу и удельной энергии, при явной фиксации условий посевного ложа и режимов. Ограничения обзора связаны с неоднородностью методик и редкими данными на скоростях выше 10–12 km/h, перспективным выглядит совмещение телеметрии давления, расхода и времен прихода с полевой метрологией шага и глубины и согласование форм отчетности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yan S., Zhai S., Gao Y. [et al.] Planting uniformity performance of maize planter systems with motor-driven seed meters // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. – 2022. – Vol. 15, No. 5. – P. 101–108. – DOI: 10.25165/j.ijabe.20221505.5911.

2. Равномерность высева пневматической кукурузной сеялки грядкового типа при различных уровнях подготовки семенного ложа и скоростях движения агрегата / Ф. Ахмад, М. Адель, Б. Кви [и др.] // Международный журнал сельскохозяйственной и биологической инженерии. – 2021. – Т. 14, № 1. – С. 165–171. – DOI: 10.25165/j.ijabe.20211401.5054.
3. Эффективность узких килевидных сошников и двухдисковых сошников для преодоления поверхностного уплотнения и повышения урожайности сои в условиях длительного применения нулевой обработки почвы / С. Ж. Б. Феррейра, К. А. Тормена, Э. К. да Коста Севериано [и др.] // Исследования обработки и физики почв. – 2023. – Т. 227. – Ст. 105622. – DOI: 10.1016/j.still.2022.105622.
4. Разработка и испытание пневматического высокоскоростного высевяющего аппарата точного высева кукурузы / Х. Тан, Ф. Сюй, Т. Гуан [и др.] // Компьютеры и электроника в сельском хозяйстве. – 2023. – Т. 211. – Ст. 107997. – DOI: 10.1016/j.compag.2023.107997.
5. Chen J., Guan T., Yuan Z. [et al.] Development of high-speed precision maize metering device for dense planting pattern with standard ridges // *Frontiers in Plant Science*. – 2024. – Vol. 15. – Art. 1452699. – DOI: 10.3389/fpls.2024.1452699.
6. Liu R., Wu G., Dong J. [et al.] Improving Sowing Uniformity of High-Speed Precision Maize Planter by Incorporating an Energy Dissipator // *Agriculture*. – 2024. – Vol. 14, No. 8. – Art. 1237. – DOI: 10.3390/agriculture14081237
7. Регулируемая пневматическая сеялка с пониженным уровнем вибрации приводных элементов для повышения точности полевого высева семян / Дж. Махапатра, П. С. Тивари, К. П. Сингх [и др.] // Датчики (Sensors). – 2024. – Т. 24, № 11. – Ст. 3399. – DOI: 10.3390/s24113399
8. Drewry J. L., Arriaga F. J., Luck B. D. Closing wheel type and row unit downforce can affect corn germination in no-tillage production systems // *Agronomy Journal*. – 2021. – Vol. 113, No. 5. – P. 4037–4046. – DOI: 10.1002/agj2.20774
9. Romanekas K., Steponavičius D., Jasinskas A. [et al.] How to analyze, detect and correct variable seedbed depth in site-specific seeding systems: A case study // *Agronomy*. – 2022. – Vol. 12, No. 5. – Art. 1092. – DOI: 10.3390/agronomy12051092
10. Nardon G. F., Botta G. F. Perspective study of technology for estimating and measuring seed distance in rows for precision planting: A review // *Spanish Journal of Agricultural Research*. – 2022. – Vol. 20, No. 4. – Art. e02R01. – DOI: 10.5424/sjar/202204-19269.
11. Qin W., Qian C., Li Y. [et al.] Mechanism analysis and prediction model establishment of total pressure loss in multi-branch piping system of pneumatic seeder // *Agriculture*. – 2025. – Vol. 15, No. 15. – Art. 1681. – DOI: 10.3390/agriculture15151681.
12. Song Q., Zhao P., Bi Y. [et al.] Optimization and test of pneumatic lifting seed distributor for maize plot seeder // *Frontiers in Plant Science*. – 2025. – Vol. 16. – Art. 1469963. – DOI: 10.3389/fpls.2025.1469963.
13. Wang S., Yi S., Zhao B. [et al.] Seeding depth monitoring system for high-speed precision planters based on multi-sensor data fusion // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24, No. 19. – Art. 6331. – DOI: 10.3390/s24196331.
14. Qin W., Wang Z. M., Zhang M. H. [et al.] Airflow distribution law of multi-branch pipe of pneumatic rice direct seeder based on dimensional analysis // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. – 2023. – Vol. 16, No. 1. – P. 111–127. – DOI: 10.25165/j.ijabe.20231601.7663.
15. Yazici F., Karadag M., Gokluber P. [et al.] Investigation of Flow Distribution Uniformity in Manifolds // *Journal of Applied Fluid Mechanics*. – 2024. – Vol. 17, No. 5. – P. 989–1001. – DOI: 10.47176/jafm.17.05.2302.
16. Zhao L., Chen J., Duan G. Turbulent flow in an I-L junction: Effects of pipe diameter ratio // *Physics of Fluids*. – 2024. – Vol. 36, № 2. – Art. 025114 [или указать ID статьи]. – DOI: 10.1063/5.0189282.
17. Chen J., Qi S., Xu F. [et al.] CFD-DEM-based simulation and performance analysis of key parameters in a pneumatic high-speed precision maize seed metering device // *Frontiers in Plant Science*. – 2025. – Vol. 16. – Art. 1700037. – DOI: 10.3389/fpls.2025.1700037.
18. Song Q., Zhao P., Bi Y. [et al.] Optimization and test of pneumatic lifting seed distributor for maize plot seeder // *Frontiers in Plant Science*. – 2025. – Vol. 16. – Art. 1469963. – DOI: 10.3389/fpls.2025.1469963.
19. Ahmad F., Weimin D., Qishuo D. [et al.] Straw cutting forces and performance of a double-disc furrow opener in an undisturbed paddy soil // *PLoS ONE*. – 2015. – Vol. 10, No. 3. – Art. e0119648. – DOI: 10.1371/journal.pone.0119648.
20. McLaughlin N. B., Campbell A. J., Owen G. T. Performance of hoe and triple disc furrow openers on no-till grain drills in a fine sandy loam soil // *Soil and Tillage Research*. – 2019. – Vol. 195. – Art. 104373. – DOI: 10.1016/j.still.2019.104373.
21. Xu G., Xie Y., Peng S. [et al.] Evaluating the Effectiveness of Vertical Discs and Disc Coulters for Soil Conservation in an Intensive Rice–Wheat Rotation System // *Agronomy*. – 2023. – Vol. 13, No. 5. – Art. 1336. – DOI: 10.3390/agronomy13361336.
22. Madhusudan B. S., Kushwaha H. L., Kumar A. [et al.] Critical evaluation of furrow openers and operational parameters for optimum performance in conservation agriculture // *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – Art. 20928. – DOI: 10.1038/s41598-024-70569-2.
23. Zhai C., Long J., Taylor R. [et al.] Field-scale row unit vibration affecting planting quality // *Precision Agriculture*. – 2020. – Vol. 21, № 3. – P. 589–602. – DOI: 10.1007/s11119-019-09684-4.
24. Badua S. A., Sharda A., Flippo D. [et al.] Real-Time Gauge Wheel Load Variability of a Row-Crop Planter During Field Operation // *Transactions of the ASABE*. – 2018. – Vol. 61, No. 5. – P. 1517–1527. – DOI: 10.13031/trans.12511.
25. Gao Y., Yang Y., Hu Y. [et al.] Research on working vibration characteristics of different no-till row units in wheat stubble fields // *Agriculture*. – 2024. – Vol. 14, No. 11. – Art. 1878. – DOI: 10.3390/agriculture14111878.
26. Karayel D., Šarauskis E., Jotautienė E. Performance optimization of pneumatic precision planters for uniform distribution of small seeds using AI-guided multi-criteria and evolutionary approaches // *Smart Agricultural Technology*. – 2025. – Vol. 12. – Art. 101262. – DOI: 10.1016/j.atech.2025.101262.
27. Chen K., Gao S., Wang C. [et al.] Design and analysis of high-precision dynamic compensation system for seed dropping position in maize seeding operations // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, No. 13. – Art. 7741. – DOI: 10.3390/app13137741.
28. Petrović I., Vučajnk F., Trdan S. [et al.] Influence of planting speed of corn vacuum planter on variability of plant distance and ear parameters // *Agronomy*. – 2025. – Vol. 15, No. 2. – Art. 462. – DOI: 10.3390/agronomy15020462.
29. Mishler B. D. Quantifying seed spacing uniformity and yield benefits of precision planting technologies using field trials and machine data: Master's thesis. – Manhattan: Kansas State University, 2021. – URL: <https://hdl.handle.net/2097/41415>.
30. Tang H., Xu F., Guang T. [et al.] Design and test of a pneumatic high-speed maize precision seed meter // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2023. – Vol. 211. – Art. 107997. – DOI: 10.1016/j.compag.2023.107997.
31. Wang L., Xiao W., Shi B. [et al.] Numerical and experimental study on the performance of a stabilising wheel inside a seed distribution device // *Biosystems Engineering*. – 2024. – Vol. 246. – P. 219–232. – DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2024.08.009.
32. He D., Li H., Bi J. [et al.] Analysis of multi-source vibration characteristics of no-till planters based on field operation conditions // *Agriculture*. – 2025. – Vol. 15, No. 17. – Art. 1840. – DOI: 10.3390/agriculture1517184.
33. Kush E. Field evaluation of parameters affecting planter vibration in single seed planting // *Measurement*. – 2021. – Vol. 184. – Art. 109959. – DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109959.