

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ВАКУУМНЫХ УСТРОЙСТВ ТОЧНОГО ПОСЕВА КУКУРУЗЫ

ЛЯН ЭНЬЦЯН, 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 08.09.2025)

Кукуруза занимает центральное место в аграрном секторе нашей страны, являясь ключевой зерновой культурой. Ее доля в общем объеме производства зерна превышает 40 %, что подчеркивает ее экономическую значимость. Более 60 % урожая кукурузы направляется на кормовые цели, обеспечивая основу для животноводства, включая производство мяса, молока и птицы. В условиях растущего спроса на продовольствие и корма, оптимизация выращивания кукурузы становится приоритетом. Технологии посева эволюционируют стремительно: от традиционных механических сеялок к высокоточным системам, минимизирующим потери семян и повышающим урожайность.

В данной статье подробно анализируется современное состояние исследований вакуумных устройств точного посева кукурузы. Эти устройства используют вакуум для захвата и распределения семян, обеспечивая равномерный интервал и глубину заделки, что снижает нормы высева на 15–20 % по сравнению с механическими аналогами. Обзор охватывает ключевые инновации: от базовых пневматических систем до интеллектуальных моделей с датчиками и автоматизированным контролем. Рассматриваются вызовы, такие как нестабильность вакуумного поля, повреждение семян и адаптация к разным почвам.

Далее излагаются перспективные направления развития: интеграция ИИ для реального времени корректировки параметров, использование CFD-моделирования для оптимизации газовых потоков, разработка энергосберегающих вакуумных насосов и комбинированных систем с GPS-навигацией. Такие подходы позволяют повысить точность посева до 95–98 %, уменьшить энергозатраты на 20–30 % и интегрировать с «умным» земледелием.

Статья представляет справочную ценность для инженеров, агрономов и производителей оборудования. Она способствует созданию эффективных систем посева, способствующих устойчивому развитию сельского хозяйства, повышению продовольственной безопасности и снижению экологического воздействия. В итоге, вакуумные технологии открывают путь к революции в посеве кукурузы, адаптированной к климатическим изменениям и ресурсным ограничениям.

Ключевые слова: вакуумный посев; кукуруза; посев; устройство; выбрасыватель семян.

Corn occupies a central place in our country's agricultural sector, being a key grain crop. Its share of total grain production exceeds 40 %, underscoring its economic importance. Over 60 % of the corn harvest is used for feed, providing the basis for livestock farming, including meat, milk, and poultry production. With growing demand for food and feed, optimizing corn cultivation is becoming a priority. Seeding technologies are rapidly evolving: from traditional mechanical seeders to high-precision systems that minimize seed loss and increase yields.

This article provides a detailed analysis of the current state of research into vacuum precision seeding devices for corn. These devices use vacuum to capture and distribute seeds, ensuring uniform spacing and seeding depth, reducing seeding rates by 15–20% compared to mechanical equivalents. This review covers key innovations, from basic pneumatic systems to intelligent models with sensors and automated control. Challenges such as vacuum field instability, seed damage, and adaptation to different soils are discussed.

Further promising areas of development are outlined: integrating AI for real-time parameter adjustments, using CFD modeling to optimize gas flows, developing energy-efficient vacuum pumps, and combined systems with GPS navigation. These approaches can increase seeding accuracy to 95–98 %, reduce energy costs by 20–30 %, and integrate with smart farming.

This article provides reference value for engineers, agronomists, and equipment manufacturers. It promotes the creation of efficient seeding systems that contribute to sustainable agricultural development, improve food security, and reduce environmental impact. Ultimately, vacuum technologies pave the way for a revolution in corn seeding, adapting to climate change and resource constraints.

Key words: vacuum seeding; corn; seeding; device; seed ejector.

Введение

Кукуруза широко распространена по всему миру и практически культивируется во всех регионах. Пневматическая система посева кукурузы использует воздушный поток для транспортировки семян, что обеспечивает их надежную защиту, высокое качество после посева и высокую урожайность, поэтому она подходит для точного посева. Однако пневматический посев требует достаточно сложной механической конструкции; в настоящее время ещё не существует зрелых пневматических систем посева кукурузы. Разработка пневматических сеялок точного посева кукурузы имеет важное значение для повышения урожайности и обеспечения продовольственной безопасности.

Как правило, пневматическая система посева кукурузы использует привод от катящегося колеса для передачи движения; дисковый выбрасыватель семян обычно имеет вращающуюся конструкцию и начинает вращаться под действием приводной силы. Устройство обеспечивает питание вакуумного вентилятора, поддерживая вакуум в корпусе с отрицательным давлением. Между внутренней и

наружной сторонами всасывающего отверстия дискового выбрасывателя создаётся перепад давления, в результате чего семена под действием давления прилипают к отверстию выброса и вращаются вместе с диском. Когда диск поворачивается к положению высевания, отрицательное давление в отверстии исчезает, и семена под воздействием центробежной силы и силы тяжести падают с диска, что соответствует одному циклу посева [1].

Французская компания Monosem разработала пневматический выбрасыватель семян [2], рама выбрасывателя семян выполнена из алюминиевого сплава, диск имеет равномерно расположенные зубья для посева. Была разработана ступенчатая зубчатая структура очистки семян, повышающая одностороннюю точность посева и выброса, итальянская компания Maschio производит пневматический выбрасыватель семян [3], приводной механизм выполнен в виде сочетания карданного вала и косозубой шестерни. Диск оснащён лопатками для семян, обеспечивая высокую текучесть посева.

Американская компания Precision производит ESET пневматический выбрасыватель семян, диск изготовлен из смоляного материала, отличается высокой точностью, малым весом и удобством монтажа. Вокруг всасывающих отверстий дискового выбрасывателя семян предусмотрены канавки и перемешивающие зубья, что дополнительно усиливает эффект перемешивания семян и улучшает качество посева [4]. Норвежская компания Kverneland разработала пневматический выбрасыватель семян Optima, в котором корпус с отрицательным давлением и дисковый выбрасыватель семян вращаются одновременно, что снижает износ механических деталей и повышает стабильность работы выбрасывателя семян [5].

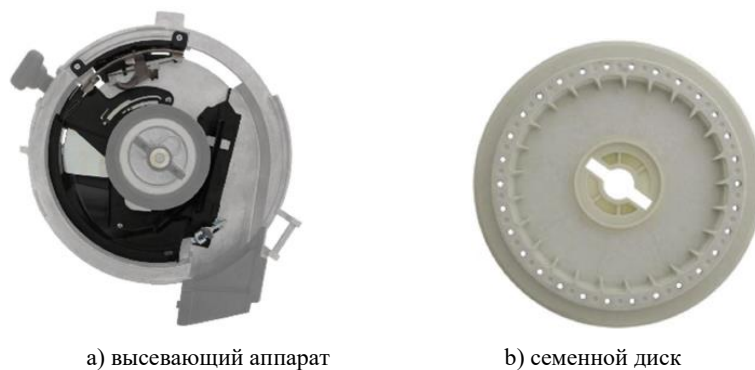


Рис. 1. Пневматический высевной аппарат ESET с пневмоприсосом

Язги [6], используя технологию высокоскоростной съёмки, проанализировал траекторию движения семян в процессе пневматической точной посевной работы, применил метод отклика поверхности для оптимизации экспериментальной схемы, выявил основные факторы, влияющие на равномерность посева, а также провел углубленное исследование взаимосвязи между количеством всасывающих отверстий пневматического выбрасывателя семян и согласованностью межсеменного расстояния.

Для анализа влияния конструкции и рабочих параметров на показатели заполнения пневматического выбрасывателя семян, Varut [7] исследовали такие факторы, как форма отверстия, скорость вращения, отрицательное давление, площадь отверстия и масса тысячи семян в рамках экспериментального исследования. Результаты показали, что перечисленные показатели существенно влияют на коэффициент заполнения.

Основная часть

С целью анализа качества посева пневматического выбрасывателя семян, Karayel [8–9] использовали степень вакуума, скорость вращения отверстий для всасывания семян и скорость движения вперёд в качестве исследовательских показателей, применяя методы высокоскоростной съёмки и математического моделирования. Благодаря оптимизации данных был проанализирован оптимальный режим работы устройства, выявлены закономерности влияния различных показателей на эффективность выброса семян и их приоритетность.

Singh [10] разработал регрессионную математическую модель зависимости рабочих параметров от качества посева, проанализировал связь параметров конструктивного проектирования, рабочих параметров и параметров машины пневматического выбрасывателя семян с качеством посева, провёл испытания в лабораторных и полевых условиях, результаты которых показали, что прокатывание и отскок семян существенно влияют на межрасстояние.

Onal [11–12], изучая параметры конструктивного проектирования и скорость выброса пневматического выбрасывателя семян, на основе теории гидродинамики выявил зависимость между конструктивными параметрами, скоростью выброса и качеством посева, оптимизировал параметры конструкции выбрасывателя и скорость выброса с учётом кукурузных семян, а также разработал систему контроля закономерностей распределения семян, которая, комбинируя лазерный луч и компьютерную систему, способна точно определять распределение семян.

Язги и др. [13] разработали плоский и круглый выбрасыватель семян кукурузы и провели их испытания производительности. Проанализировано влияние нормы высева и угла наклона машины на характеристики высева и диапазон траектории семян. Результаты показывают, что диапазон траектории движения круглых семян немного меньше, чем у плоских; были определены оптимальные рабочие параметры для плоских и круглых зерен.

Абдолахзаре и др. [14], используя методы генетического программирования и технологию высокоскоростной съемки, создали математическую модель зависимости скорости движения пневматического выбрасывателя семян и параметров разрежения от физических характеристик семян.

Текущее состояние отечественных исследований.

В нашей стране исследования в области пневматических сеялок проводятся недостаточно и длятся сравнительно недолго. В конце 1970-х годов отечественные ученые начали изучать пневматические сеялки [15]. После этого, при государственной поддержке, исследования пневматических сеялок в нашей стране быстро развивались в научно-исследовательских и производственных организациях.

Пневматический выбрасыватель семян обладает недостаточной герметичностью отрицательной камеры. Ян Бинсин и соавторы из Китайского сельскохозяйственного университета [16–17] разработали пневматический выбрасыватель семян точного дозирования кукурузы, основанный на механическом воздействии для выброса семян и методе гравитационного дозирования, при этом механизм выброса семян в данной машине действует синхронно с механизмом отрицательной камеры, что повышает точность посева.

Ляо Цинси и др. из Центрального китайского сельскохозяйственного университета [18–19] разработали выбрасыватель семян комбинированной конструкции с совместным приводом положительного и отрицательного давления. Данное устройство использует принципы всасывания воздуха для сбора семян, положительного давления для опускания семян и их выброса, при этом проведены анализ и испытания характеристик посева, а также выполнен математический анализ и обработка экспериментальных данных с применением методов многомерной нелинейной регрессии. В итоге установлен порядок значимости факторов, влияющих на качество посева, а также исследованы параметры стабилизации давления в системе выбрасывателя семян. На основе принципа сброса избыточного давления предложена стратегия управления стабилизацией давления в системе выбрасывания семян.

При посеве кукурузных семян с использованием пневматического выбрасывателя семян часто возникают проблемы с поворотом и пропусками семян. Ян Ли и Чжан Дунсин из Китайского сельскохозяйственного университета [20] разработали дисковый выбрасыватель семян с опорной конструкцией для семян; исследования показали, что стабильность заполнения семян была повышена.

Дин Ли и соавторы из Китайского сельскохозяйственного университета [21] установили, что положение адгезии плоских кукурузных семян при пневматическом посеве значительно влияет на качество посева. Экспериментально было выявлено, что с увеличением плоскости адгезии повышается индекс соответствия посева; при увеличении боковой адгезии растёт индекс повторного выброса; а с ростом вертикального индекса адгезии увеличивается уровень пропусков посева.

Ли Юйхвань и другие из Китайского сельскохозяйственного университета [22–23] предложили метод точный посев с последующей линейной посевной технологией, заключающийся в изменении положения адгезии семян на стадии посева, проектировании механизма линейного высева в зоне пневматического точного выбрасывателя семян и последующем выполнении линейного высева; Благодаря усовершенствованному проектированию удалось эффективно решить проблемы нестабильного положения семян и их бокового разброса.

При посеве семена переходят в дискретное состояние, управление их положением является ключевым этапом для повышения качества заполнения плоских семян. Поскольку кукуруза – плоское семя, эта нерегулярная структурная особенность затрудняет контроль позы семян в процессе их выбрасывания. В настоящее время существует три метода контроля потока семян: механический размешивающий выбрасыватель семян, электромагнитное совместное воздействие вибрационного раз-

деления семян и воздушный поток, приводящий в движение транспортировку с возмущающим разделением семян [24].

Чэнь Цзинь и Ли Яомин из Университета Цзянсу [25] разработали пневматический барабанный выбрасыватель семян и использовали электромагнитную вибрационную систему подачи семян в сеялку. Применяя метод двухвариантной линейной интерполяции из математики, по формулам определяют трёхмерное направление и расстояние всасывания семян в отверстие, радиальное расстояние всасывания, а затем вычисляют объём пространства всасывания семян. На основе дискретного элементного метода проведён анализ движения семян кукурузы в условиях вибрации, выполнены испытания работы выбрасывателя семян и определены оптимальные параметры его функционирования.

Для уменьшения сопротивления движению семян в процессе заполнения и повышения качества заполнения, Ли Чжи и Чэнь Хайтао из Северо-Восточного сельскохозяйственного университета [26] всесторонне проанализировали преимущества и недостатки традиционного барабанного пневматического выбрасывателя семян, разработали сито семенного ложа с положительным потоком воздуха и с помощью программного обеспечения Fluent для моделирования воздушного потока исследовали распределение давления внутри камеры с положительным давлением и у выхода отверстий входного сита.

Заключение

Из приведённых исследований по улучшению распределения посевного материала следует, что традиционные методы выбрасывания семян являются простыми и реализуемыми, однако они наносят больший ущерб семенам, повышая уровень их повреждения. Конструкция электромагнитного вибрационного выбрасывателя семян сложна, вибрация контролируема, однако это также увеличивает нестабильность работы выбрасывателя. Пневматический выбрасыватель семян эффективно защищает семена, снижая их повреждаемость, однако исследования показывают, что этот тип выбрасывателя лучше подходит для контроля положения плоских семян. Использование воздушных потоков для управления процессом подачи и положением плоских семян является оптимальным проектным решением для пневматического выбрасывателя плоских семян.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лю Цзэцхи. Экспериментальные исследования и разработка пневматического выбрасывателя плоских семян, основанного на воздушном потоке / Лю Цзэцхи. – Шаньдунский политехнический университет, 2023.
2. Сеялка с точным дозатором Monosem [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.monosem.com/precision-planters/single-seed-planter/pneumatic-planter/monosem-nx-m-me/> (дата обращения: 20 марта 2023).
3. Сеялка Maschio. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.maschio.co.uk/products/precision-drills/mtr-precision-seed-drill/> (дата обращения: 20 марта 2023).
4. Система дозирования семян Precision Planting eSet [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.precisionplanting.com/#products/eset/> (дата обращения: 20 марта 2023).
5. Пневматическая точная сеялка Kverneland Optima. [Электронный ресурс]. – URL: <https://ien.kverneland.com/Seeding-Equipment/pneumatic-precision-drills/kverneland-optima-r> (дата обращения: 20 марта 2023).
6. Yazgi, A. Измерение равномерности распределения семян высевашего аппарата точного высева в зависимости от количества отверстий на вакуумном диске / A. Yazgi A. Degirmencioglu // Измерение. – 2014. – № 56. – С. 128–135.
7. Barut, Z B. Влияние различных эксплуатационных параметров на удержание семян в высевашем аппарате одинарного высева пневматической сеялки / Barut Z B., Oezmerzi A. // Турецкий журнал сельского хозяйства и лесного хозяйства, 2004, 28(6): 435–441.
8. Karayel D., Barut Z B., Özmerzi A. Математическое моделирование вакуумного давления в высевашем аппарате точного высева. Инженерная биология, 2004, 87(4): 437–444.
9. Karayel D. Работа модифицированного вакуумного высевашего аппарата точного высева для посева кукурузы и сои по нулевой технологии. Исследование почвы и обработки почвы, 2009, 104(1): 121–125.
10. Singh R C., Singh G., Saraswat D C. Оптимизация конструктивных и эксплуатационных параметров пневматического высевашего устройства для посева семян хлопчатника. Инженерная биология, 2005, 92(4): 429–438.
11. Önal O., Önal I. Разработка компьютеризированной системы для оценки точности распределения семян в ряду. Турецкий журнал сельского хозяйства и лесного хозяйства, 2009, 33(2): 99–109.
12. Önal I., Deirmenciolu A., Yazgi A. Оценка точности распределения семян вакуумного высевашего аппарата точного высева на основе теоретических расчетов и экспериментов. Турецкий журнал сельского хозяйства и лесного хозяйства, 2012, 36(2): 133–144.
13. Yazgi A., Taylor R K., Navid H., et al. Моделирование работы и характеристик высева семян высевашим аппаратом сеялки для кукурузы с использованием методологии поверхности отклика. Прикладная инженерия в сельском хозяйстве, 2017, 33(2): 181–189.
14. Abdolazhare Z., Mehdizadeh S A. Нелинейное математическое моделирование равномерности распределения семян пневматической сеялки с использованием генетического программирования и обработки изображений. Нейронные вычисления и приложения, 2018, 29(2): 363–375.
15. Чжао Липин. Современное состояние исследований и разработки прецизионных выбрасывателей семян / Чжао Липин, На Сюань // Сельскохозяйственные технологии и оборудование. – 2018. – № (6). – С. 30–31.

16. Проектирование пневматического прецизионного выбрасывателя семян кукурузы с дисковым выбрасывателем и синхронно вращающейся камерой разрежения / Янь Бинсинь, Чжан Дунсин, Цуй Тао [и др.] // Журнал сельскохозяйственной инженерии. – 2017. – № 33(23). – С. 15–23.
17. Янь Бинсинь. Исследование проектирования пневматического прецизионного выбрасывателя семян с синхронным вращением диска и камеры / Янь Бинсинь. – Пекин: Китайский сельскохозяйственный университет, 2018.
18. Исследование факторов, влияющих на эффективность всасывания семян в пневматическом прецизионном выбрасывателе для мелких семян / Ляо Итхао, Ляо Цинси, Ван Лэй [и др.] // Журнал сельскохозяйственной инженерии. – 2018. – №34(24). – С. 10–17.
19. Метод стабилизации давления и экспериментальное исследование пневматической системы выбрасывателя семян точного прямого посева рапса / Ляо Итхао, Шу Цайся, Ляо Цинси [и др.] // Журнал сельскохозяйственной инженерии. – 2017. – 33(15). – С. 49–56.
20. Комбинированный точный выбрасыватель семян кукурузы с пневматическим всасыванием и механическим вспомогательным подсевом / Ян Ли, Ши Сун, Цуй Тао [и др.] // Журнал сельскохозяйственной техники. – 2012. – №43(S1). – С. 48–53.
21. Анализ влияния позы адгезии пневматического выбрасывателя семян кукурузы на посевные показатели // Дин Ли, Ян Ли, Чжан Дунсин [и др.] // Журнал сельскохозяйственной техники. – 2021. – №52(7). – С. 40–50.
22. Анализ и экспериментальное исследование процесса линейного посева воздухозаборного высокоскоростного точного выбрасывателя семян кукуруз / Ли Юйхвань, Ян Ли, Чжан Дунсин [и др.] // Журнал сельскохозяйственной инженерии/ – 2020/ – № 36(9). – С. 26–35.
23. Анализ посевных характеристик и оптимизация конструкции воздухозаборного высокоскоростного точного выбрасывателя семян кукуруз / Ли Юйхвань, Ян Ли, Чжан Дунсин [и др.] // Журнал сельскохозяйственной инженерии – 2022. – № 38(8). С. 1–11.
24. Ши Сун. Проектирование и экспериментальное исследование комбинированного пневматического точного выбрасывателя семян кукурузы с отверстиями / Ши Сун. – Пекин: Китайский сельскохозяйственный университет, 2015.
25. Динамический анализ процесса всасывания семян воздухозаборным барабанным выбрасывателем семян / Чжао Чжан, Ли Яоминг, Чэнь Цзин [и др.] // Журнал сельскохозяйственной инженерии. – 2011. – Т. 27, №7. – С. 112–116.
26. Ли Чжи. Оптимизация конструкции и экспериментальное исследование пневматического выбрасывателя семян со всасывающим барабаном для сои / Ли Чжи. – Хэйлунцзян: Северо-восточный сельскохозяйственный университет, 2020.