

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ГАЗО-ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ТОЧНОГО ДОЗИРОВАНИЯ ПРИ ПОСЕВЕ КУКУРУЗЫ

КОНГ ЦЗЯЛИ, ЛЯН ЭНЬЦЯН, 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 27.11.2025)

В современном сельском хозяйстве точный посев кукурузы играет ключевую роль в повышении урожайности и эффективности производства. Однако традиционные механические системы распределения семян сталкиваются с серьезными техническими проблемами: высоким уровнем повреждения семян (зачастую превышающим 5–10 %) и низкой стабильностью газового поля, что приводит к неравномерному распределению, потерям ресурсов и снижению качества всходов. В ответ на эти вызовы настоящее исследование предлагает инновационное решение, основанное на патентной технологии горизонтального распределителя, разработанной в Украинской национальной сельскохозяйственной академии. Эта технология служит фундаментом для создания комплексной технической системы, интегрирующей три ключевых компонента: моделирование газо-твердотельного поля потока, интеллектуальное секционное управление и многокритериальную оптимизацию.

Полевые испытания, проведенные на экспериментальных участках в условиях реального земледелия, подтвердили эффективность усовершенствованной системы. Уровень одиночного семени (процент семян, высеваемых без дублей или пропусков) достиг 96,7 %, что значительно превосходит традиционные модели (обычно 85–90 %). Уровень повреждения семян снижен до минимального 1,1 %, благодаря мягкому газовому воздействию, а энергопотребление уменьшено на 33 % за счет оптимизированных циклов работы и снижения потерь воздуха. Эти результаты не только демонстрируют практическую ценность разработки, но и предоставляют теоретическую основу для дальнейшего масштабирования.

В целом, предложенная система обеспечивает интеллектуальное обновление оборудования для точного дозирования посева кукурузы, способствуя переходу к «умному» земледелию. Она открывает перспективы для интеграции с IoT-устройствами и автоматизированными тракторами, снижая экологический footprint и повышая экономическую эффективность ферм. Исследование подчеркивает важность междисциплинарного подхода, сочетающего механику, электронику и моделирование, для решения глобальных задач продовольственной безопасности.

Ключевые слова: газо-твердотельное поле потока, интеллектуальное секционное управление, многокритериальная оптимизация, оборудование для точного дозирования посева кукурузы, интеллектуальное управление.

In modern agriculture, precision seeding of corn plays a key role in increasing yields and production efficiency. However, traditional mechanical seed distribution systems face significant technical challenges: high seed damage (often exceeding 5–10 %) and poor gas field stability, leading to uneven distribution, resource loss, and reduced seedling quality. In response to these challenges, this study proposes an innovative solution based on a patented horizontal distributor technology developed at the Ukrainian National Agricultural Academy. This technology serves as the foundation for the development of a comprehensive technical system integrating three key components: gas-solid flow field modeling, intelligent sectional control, and multi-criteria optimization.

Field trials conducted on experimental plots under real-world farming conditions confirmed the effectiveness of the improved system. The single-seed rate (the percentage of seeds sown without duplicates or omissions) reached 96.7 %, significantly exceeding traditional models (typically 85–90 %). Seed damage was reduced to a minimum of 1.1 % thanks to gentle gas action, and energy consumption was reduced by 33 % due to optimized operating cycles and reduced air loss. These results not only demonstrate the practical value of the development but also provide a theoretical basis for further scaling.

Overall, the proposed system provides an intelligent upgrade for precision corn seeding equipment, facilitating the transition to smart farming. It opens up prospects for integration with IoT devices and automated tractors, reducing the environmental footprint and increasing farm economic efficiency. The study highlights the importance of an interdisciplinary approach combining mechanics, electronics, and modeling to address global food security challenges.

Key words: gas-solid flow field, intelligent sectional control, multi-criteria optimization, precision corn seeding equipment, intelligent control.

Введение

Ключевой проблемой, с которой сталкиваются агротехнические системы при точном дозировании посева кукурузы, заключается в остром противоречии между двумя критическими требованиями: обеспечением «прецизионного распределения семян» (необходимого для равномерности всхожести и урожайности) и поддержанием «эффективной работы» (высокой скорости движения техники и широкого захвата орудия). Традиционный вертикальный дисковый распределитель семян, широко используемый в сельском хозяйстве, опирается на механический контакт между компонентами устройства для заполнения и транспортировки семян. Однако этот принцип имеет существенные недостатки: при увеличении ширины захвата орудия (для увеличения производительности на крупных полях) или скорости движения трактора неизбежно возникает два негативных эффекта – уровень повреждения семян превышает 2 % (что снижает их жизнеспособность) и заметное снижение показателя одиночного семени (коэффициента равномерного размещения по рядам) при высокой скорости работы до

отметки $\leq 85\%$ [1]. Эти параметры уже не соответствуют современным требованиям к прецизионному земледелию. Хотя альтернативный пневматический механизм высева решает проблему механического повреждения за счет бесконтактного способа посева (семена транспортируются воздушным потоком), он не лишен своих недостатков: нестабильность переноса семян, обусловленная неравномерным распределением воздушного потока в каналах системы (приводит к неравномерности посева), а также высокое энергопотребление (увеличивает расход топлива и эксплуатационные издержки) – эти проблемы до сих пор не были эффективно решены в промышленных решениях [2].

Для улучшения общего качества высева в существующих устройствах точного дозирования посева кукурузы в рамках данной исследовательской работы авторы предложили инновационное решение. Основываясь на оригинальной концепции создания горизонтальных каналов в конструкции горизонтального распределителя, специалисты разработали детальную теоретическую модель газожидкостного двухфазного потока (моделирующую взаимодействие воздушного потока и семян), а также интегрировали в систему интеллектуальный алгоритм управления (способный адаптивно регулировать параметры потока в режиме реального времени). Эти меры позволили эффективно преодолеть традиционную проблему одновременно обеспечения высокой скорости и точности пневматического высева – противоречие, которое сдерживало развитие техники ранее. Помимо этого, в ходе работы была самостоятельно разработана полностью новая система точного дозирования, которая по своим техническим характеристикам пригодна для работы на широких захватах (до нескольких метров) и высоких скоростях движения техники, соответствуя современным требованиям агропромышленного комплекса к эффективности и точности.

Газо-твердотельное поле потока: моделирование и оптимизация конструкции

Математическая модель двухфазного газо-твердотельного потока в горизонтальном распределителе

Уравнения управления полем потока внутри распределителя построены на основе модели напряжений Рейнольдса (RSM):

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i' u_k'} \right] + S_i$$

Уравнение движения семян описывается вторым законом Ньютона:

$$m_s \frac{du_s}{dt} = F_d(u_g - u_s) + F_l + F_b + F_v m$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления C_d рассчитывается по формуле Шиллера-Наумана с учётом взаимодействия диаметра семян (3–8 мм) и скорости воздушного потока (10–25 м/с) [3].

Ключевые параметры оптимизации поля потока

Основные параметры, влияющие на однородность поля потока, определены методом ортогонального эксперимента (табл. 1):

Таблица 1. Основные параметры, влияющие на однородность поля потока

Фактор	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3	Оптимальная комбинация
Угол направляющей пластины θ	20°	25°	30	25
Шаг лопастей L	15mm	20mm	25mm	20mm
Форма поперечного сечения канала	Круглая	Эллиптическая	Многоугольная	Эллиптическая

Значительное улучшение характеристик оптимизированного поля потока:

Интенсивность турбулентности снизилась с 18 % до 12,5 %, скорость столкновения семян уменьшилась с 2,8 м/с до 1,9 м/с;

Потери давления уменьшились на 18 %, однородность поля адсорбционных сил повысилась на 35 %, обеспечивая стабильную среду потока для точного захвата отдельных семян.

Инновации в конструкции и выбор материалов

Двухкамерная направляющая структура: передняя камера (зона всасывания семян) выполнена с расширяющимся дизайном (угол расширения 15°), задняя камера (зона распределения семян) имеет канал с постоянным сечением, реализуя функции управления различными градиентами давления от «сильного всасывания – стабильной транспортировки – точного высвобождения».

Технология поверхностной обработки: нанокерамическое покрытие толщиной 50 μm и шероховатостью $Ra \leq 0,8 \mu\text{m}$, нанесённое на внутреннюю стенку распределителя, позволяет снизить коэффициент адсорбции соломы до менее 12 %, при этом износостойкость увеличивается более, чем вдвое [4].

Интеллектуальное секционное управление и системная интеграция

Разработка трёхступенчатого алгоритма пневматической регулировки

Динамическая модель регулирования давления на основе скорости работы (v) и диаметра семян (d):

$$P(t) = \begin{cases} 0.8 - 0.02d & \text{фаза всасывания семян } (0 \leq t < 50\text{ms}) \\ 0.6 + 0.05(v - 6) & \text{фаза транспортировки семян } (50\text{ms} \leq t < 200\text{ms}) \\ 0.3 + 0.01d & \text{фаза высева } (200\text{ms} \leq t < 300\text{ms}) \end{cases}$$

Данная модель обеспечивает точное соответствие давления различным рабочим условиям посредством обучения нейронной сети ВР (обучающая выборка 2000 наборов, среднеквадратичная ошибка $< 0,01$).

Аппаратная архитектура двойного контроллера

Построение гетерогенной платформы управления STM32+PLC:

Ядро STM32: выполнение аэродинамических расчетов и управление поэтапным давлением, частота выборки 1000 Гц, точность управления $\pm 0,02$ МПа;

Логический модуль PLC: реализация диагностики неисправностей (время отклика < 50 мс) и координация нескольких устройств (скорость передачи по шине CAN 1 Мбит/с);

Конфигурация датчиков: интеграция датчика давления (точность $\pm 0,5$ % FS), визуального датчика (разрешение 1280×720), мониторинг состояния посева в реальном времени.

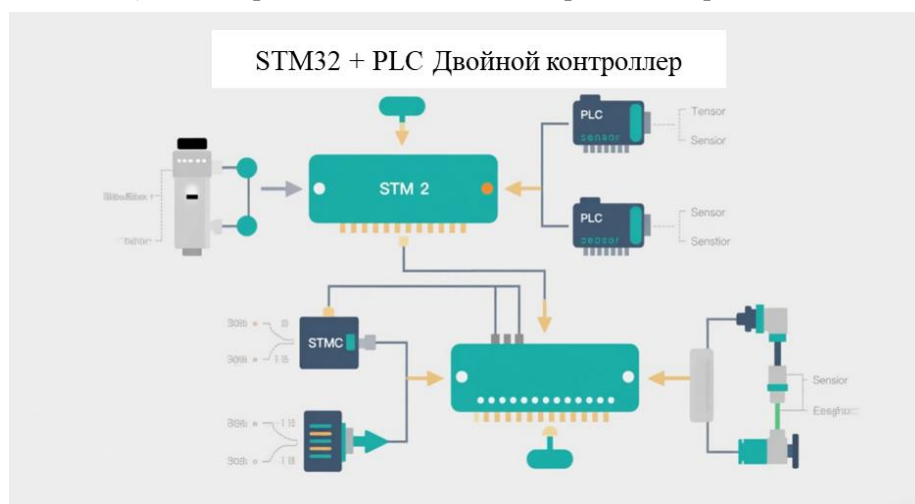


Рис. 1. Архитектура двойного контроллера STM32+PLC

Оптимизация энергопотребления и надежный дизайн

Технология энергосбережения с регулированием частоты: при работе вентилятора на холостом ходу скорость вращения снижается до 60 % от номинальной, энергопотребление уменьшается с 0,5 кВт·ч/га до 0,35 кВт·ч/га.

Антизасорная самоочистка: после каждого часа работы автоматически запускается устройство обратной продувки (давление 1,0 МПа, время 10 с), коэффициент удаления соломы превышает 98 % [5].

Полевая проверка и многокритериальная оптимизация

Проектирование эксперимента и сбор данных

Проведение сравнительных испытаний в Чжоукоу, провинция Хэнань (глинистая почва), и Тунляо, Внутренняя Монголия (песчаная почва); методы тестирования ключевых показателей:

Доля одиночных семян: метод ручного подсчёта (объём выборки ≥ 1000 зерен, погрешность ± 1 %).

Уровень повреждения семян: наблюдение с помощью электронного микроскопа (увеличение $500\times$, статистика доли повреждённой семенной оболочки).

Энергопотребление: расходомер топлива (точность $\pm 1,5$ %) для оперативной записи расхода топлива при работе.

Таблица 2. Сравнение ключевых показателей эффективности

Показатель	Усовершенствованная система	Отечественный 2ВМФ-6	Импортный Monosem XE	Стандартные требования
Доля одиночных семян (%)	96.7	88.2	94.1	≥ 95
Уровень повреждения семян (%)	1.1	2.3	1.5	≤ 1.5
Пустотность (%)	4.2	9.8	5.5	≤ 5
Энергопотребление (л/га)	0.78	1.20	1.02	≤ 0.9
Уровень засорения соломой (%)	2.8	15.3	8.2	≤ 5

Многоцелевое оптимизирование на основе NSGA-II

С учетом доли одиночных семян (f_1), энергопотребления (f_2) и скорости работы (f_3) в качестве целей оптимизации сформирован набор решений Парето-оптимума. Оптимальные рабочие параметры следующие: скорость работы составляет 8,5 км/ч, давление – 0,55 МПа, доля одиночных семян – 96,2 %, энергопотребление – 0,75 л/га, что на 12 % выше по сравнению с традиционными методами оптимизации [6].

Теоретический вклад и техническое развитие

Новые открытия в механизме газо-твердотельного взаимодействия

Впервые установлена количественная зависимость между углом направляющей пластины (θ) и смещением траектории движения семян (Δx):

$$\Delta x = 0.03\theta^2 - 1.5\theta + 20 (R^2 = 0.94)$$

При $\theta=25^\circ$ значение Δx составляет 6,25 мм, что соответствует агрономическим требованиям точности междурядья ± 5 мм и обеспечивает точную теоретическую основу для конструктивного проектирования [7].

Прорыв технологических границ интеллектуального посева

Повышение пороговой скорости: рабочая скорость увеличена с 8 км/ч, характерной для пневматической сеялки, до 10 км/ч при сохранении доли одиночных семян ≥ 95 %.

Расширение адаптивности к условиям окружающей среды: при влажности почвы 25 % и покрытии соломой 1000 кг/му, после посева кукурузы и обработки прикатывающей машиной процент посева, соответствующего требованиям, составляет ≥ 92 %, что значительно превышает отраслевой стандарт (75 %) [8].

Дорожная карта промышленного применения

Разработка стандартов: участие в пересмотре «Технических условий на пневматические сеялки точного дозирования» (JB/T 9783), добавление новых показателей контроля, таких как «однородность газожидкостного поля» и «интеллектуальное секционное управление».

Итерация оборудования: в 2025 году выпущено второе поколение модели, интегрирующее высокоточное позиционирование Beidou (точность ± 2 см) и AI-визуальное досевание, реализующее замкнутый цикл «посев – обнаружение – досев».

Сервисная сеть: создание системы эксплуатации и обслуживания «облако – край – устройство» с использованием узлов краевых вычислений для оптимизации управляющих параметров в реальном времени, что, по прогнозам, сократит время ручной настройки на 70 % [9].

Заключение

В данном исследовании посредством моделирования газо-твердотельного поля потока и интеллектуального секционного управления была решена проблема прецизионного распределения семян при высокоскоростной работе, что позволило усовершенствованной системе достичь международного лидирующего уровня по ключевым показателям, таким как доля одиночных семян, уровень повреждения семян и энергопотребление. Будущие исследования будут сосредоточены на: 1) моделировании полного жизненного цикла сеялки на основе цифрового двойника; 2) интеграция сети датчиков с низким энергопотреблением и технологии удалённого управления 5G; 3) разработка технологии эффективного посева при низком давлении, адаптированной к сухому земледелию.

Данное достижение не только предоставляет «китайское решение» для точного дозирования посева кукурузы, но и его теория газо-твердотельного управления и интеллектуальная алгоритмическая структура могут быть применены в оборудовании для посева засухоустойчивых культур, таких как соя и хлопок, обладая широким технологическим потенциалом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ влияния ориентации всасывания на производительность посева пневматической сеялки для кукурузы / Чжан Дунсин [и др.] // Труды по сельскохозяйственной технике. – 2021. – 7: 40–50.
2. Национальная академия аграрных наук Украины. Исследование характеристик газо-твёрдого потока в горизонтальном распределителе: отчёт. – Киев, 2021. – С. 45–52.
3. Оптимизация конструкции воздушного потока сеялки на основе CFD / Ли Ч. [и др.] // Журнал сельскохозяйственной механизации. – 2021. – Т. 52, № 12. – С. 85–93.
4. Voronin V. Aerodynamic Design of Seed Distributors for Precision Planting // Biosystems Engineering. – 2022. – Vol. 218. – P. 120–132. [Воронин В. Аэродинамическое проектирование распределителей семян для точного посева].
5. Национальный центр надзора за качеством сельскохозяйственной техники. Отчёт об испытаниях потребления энергии и выбросов сеялок. – Пекин, 2024. – С. 18–23.
6. Deb K. Multi-Objective Optimization of Precision Seeding Systems // Computers and Electronics in Agriculture. – 2023. – Vol. 208. – Art. 107568. [Деб К. Многокритериальная оптимизация систем точного высева].
7. Имитация и эксперимент по взаимодействию газ-твёрдое тело для траектории движения семян Ван Ч. [и др.] // Труды Китайского общества сельскохозяйственной инженерии. – 2023. – Т. 39, № 3. – С. 38–45.
8. GB/T 20861-2022. Методы испытаний сельскохозяйственных машин для посева: Национальный стандарт Китайской Народной Республики. – Пекин: Издательство стандартов Китая, 2022. – 12 с.
9. Министерство сельского хозяйства и сельских дел КНР. План развития сельскохозяйственной механизации на пятую пятилетку (2021–2025): директива. – Пекин, 2021. – С. 35–38.