

ГЛУБОКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОСЕВА 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 01.09.2025)

В данном исследовании, с целью преодоления ограничений традиционных вертикальных рядоразбрасывателей, характеризующихся высоким уровнем повреждения семян и низкой адаптивностью, использована технология горизонтального распределителя Украинской национальной академии аграрных наук. Основной структурой является горизонтальный распределитель, основанный на аэродинамическом моделировании и дополненный оптимизационным анализом с применением программного обеспечения конечных элементов, что позволило создать бесконтактную систему распределения семян. С помощью программного обеспечения Fluent выполнено CFD-моделирование для различных углов наклона направляющей пластины (от 20° до 30°) и форм сечения воздушного канала (круглый/эллиптический трубопровод). В сочетании с полевыми испытаниями (глинистая, песчаная и суглинистая почвы, скорость работы 6–10 км/ч) исследована взаимосвязь распределения потока и посевных характеристик. Обнаружено, что интенсивность турбулентности газожидкостного двухфазного потока внутри горизонтального распределителя имеет квадратичную зависимость от угла направляющей пластины. Турбулентная кинетическая энергия в эллиптической трубе снизилась на 22 % по сравнению с круглой трубой, при этом семена в течение всего процесса посева находились в самом нижнем положении. Полевые испытания показали: оптимизированная система достигла однозернового показателя 96,7 %, уровень повреждения семян не превышает 1,2 %, расход топлива составил всего 0,8 л/га, что соответственно на 9,9 %, 57,1 % и 32,2 % лучше по сравнению с отечественными машинами. Кроме того, была предварительно создана связанная модель «однородность поля потока – траектория движения семян», которая может предоставить новые идеи для реализации интеллектуализации прецизионных сеялок.

Ключевые слова: точная посевная техника кукурузы; горизонтальный распределитель; аэродинамическая оптимизация; CFD-симуляция; контроль турбулентности.

This study utilizes the horizontal distributor technology of the Ukrainian National Academy of Agrarian Sciences to overcome the limitations of traditional vertical row spreaders, which are characterized by high levels of seed damage and low adaptability. The basic structure is a horizontal distributor based on aerodynamic modeling and complemented by optimization analysis using finite element software, resulting in a contactless seed distribution system. Fluent software was used to perform CFD modeling for various guide plate inclination angles (from 20° to 30°) and air duct cross-sectional shapes (round/elliptical). In conjunction with field trials (on clay, sandy, and loamy soils, at operating speeds of 6–10 km/h), the relationship between flow distribution and seeding performance was investigated. It was found that the turbulence intensity of the gas-liquid two-phase flow inside the horizontal distributor has a quadratic relationship with the guide plate angle. Turbulent kinetic energy in the elliptical tube was reduced by 22 % compared to a round tube, while the seeds remained in the lowest position throughout the seeding process. Field trials showed that the optimized system achieved a single-seed index of 96.7 %, seed damage did not exceed 1.2 %, and fuel consumption was only 0.8 l/ha, which is 9.9 %, 57.1 %, and 32.2 % better, respectively, than domestically produced machines. Furthermore, a coupled "flow field homogeneity – seed trajectory" model was preliminarily created, which may provide new insights for the intelligent implementation of precision seeders.

Key words: precision corn seeding technology; horizontal distributor; aerodynamic optimization; CFD simulation; turbulence control.

Введение

Кукуруза, являясь зерновой культурой с наивысшей урожайностью в мире, имеет посевную точность, которая напрямую определяет рациональность структуры посевов и эффективность использования ресурсов. Данные Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO) показывают, что в основных регионах производства кукурузы в Китае потери урожая из-за традиционных методов посева достигают 10–15 %, тогда как точная посевная техника позволяет повысить коэффициент использования световой энергии на 12–18 % за счёт формирования равномерной структуры посевов [1]. Однако традиционные механические технологии высева (например, гнездовой диск, вертикальный дисковый высевочный аппарат) основаны на физическом контакте при загрузке семян, при этом скорость столкновения семян с высевочными элементами достигает 2,8–3,5 м/с, а уровень повреждения семян обычно превышает 2,5 % [2]. При полном возврате соломы (покрытие ≥ 500 кг/му) или в почвах с высокой влажностью (>22 %) коэффициент годности засева вертикального распределителя снижается до менее 75 %, а коэффициент вариации междурядья превышает 15 % [3].

Аэродинамическая высевочная система, работающая без контакта, позволяет избежать механических повреждений, однако ключевое техническое устройство – горизонтальный распределитель – имеет недостатки в аэродинамических характеристиках. Украинская национальная академия аграр-

ных наук использует направляющие пластины для управления поперечным воздушным потоком, что позволяет снизить скорость столкновения семян до менее 2,0 м/с [4]. Тем не менее, применимость данной технологии в основных трёх регионах производства кукурузы в Китае (Хуанхуайхай, Северо-Восток и Северо-Запад) ещё не получила надлежащей проверки. Поэтому на основе CFD-симуляций и результатов полевых испытаний в различных рабочих условиях исследуется влияние различных конструктивных параметров на равномерность воздушного потока в процессе работы горизонтального распределителя с целью преодоления ключевых технологических ограничений точности посева в сложных агротехнических условиях и реализации отечественной разработки критически важных зарубежных технологий.

Основная часть

Построение аэродинамической модели горизонтального распределителя. Физическая структура и проектирование параметров

На основе украинской патентной технологии (UA202211345A) разработана трёхмерная модель горизонтального распределителя (рис. 1), структура которого состоит из нескольких перечисленных выше ключевых компонентов. Двухкамерная конструкция: камера адсорбции (давление 0,6–0,8 МПа) и камера транспортировки (давление 0,3–0,5 МПа), разделённые направляющей пластиной, создающей перепад давления в диапазоне 0,2–0,6 МПа.



Рис. 1. Трёхмерная схема горизонтального распределителя

Группа направляющих пластин: четыре группы наклонных направляющих пластин, начальный угол 30°, регулируемый диапазон 20°–30°, расстояние между лопастями 15–25 мм.

Воздушный поток: овальное сечение (длинная ось 50 мм, короткая ось 35 мм), отношение длин осей 1,4:1. Согласно принципу оптимизации уравнения Бернулли «скорость потока обратно пропорциональна площади сечения», максимальное давление внутри канала не достигается, что аналогично трубам с круглым отверстием [5].

Принцип работы украинского горизонтального распределителя: первый этап – этап ввода газо-твердой смеси (высоконапорный воздушный поток от вентилятора поступает через вход распределителя в камеру смешивания газо-твердой смеси). Вторая стадия: этап оптимизации потока (конструкция направляющей пластины с углом наклона 25° формирует «слоистое поле потока», верхний слой поддерживает высокоскоростной воздушный поток для транспортировки семян, нижний слой направляет остаточный воздух для упорядоченного движения). Третья стадия: этап разделения и выброса семян: газо-твердое смешанное течение, проходя через направляющую пластину, под действием инерции и силы тяжести семена отделяются от основного воздушного потока в камере разделения и точно попадают в посевную борозду через выпускное отверстие. Остаточный воздух с примесями выводится через выпускное отверстие, обеспечивая трехступенчатое разделение «воздух – семена – примеси».

Математическое моделирование двухфазного газо-твердотельного потока

Для описания поля воздушного потока применяется турбулентная модель RNG k-ε, уравнения управления представлены следующим образом:

Уравнение непрерывности:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

Уравнение движения:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

Уравнение турбулентной кинетической энергии (уравнение k):

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} k) = \nabla \cdot (\alpha_k \mu_{eff} \nabla k) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

Уравнение диссипации турбулентной кинетической энергии, также называемое уравнением ε :

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \varepsilon) = \nabla \cdot (\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \nabla \varepsilon) + C_1 \varepsilon \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_3 \varepsilon G_b) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

В котором, $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$, турбулентная вязкость $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$. При выборе констант модели использовалась модель RNG k- ε [6].

Зерна семян моделируются с помощью дискретной фазовой модели (DPM), учитывая силу тяжести, силу сопротивления и подъемную силу Сафмана; уравнение движения частиц имеет вид:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{18\mu C_D}{\rho_p d_p^2} (u - u_p) + g(\rho_p - \rho)/\rho_p + F_l$$

В уравнении коэффициент сопротивления C_D рассчитывается по формуле Шиллера-Наумана в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_p \leq 1000$. Применимо внутри [7].

Проектирование схемы полевых испытаний. Создание испытательной платформы

Усовершенствованная установка оснащена оптимизированным горизонтальным распределителем (направляющая пластина 25°, эллиптический канал), в сочетании с ротационным ножевым окучником (частота вращения вала ножа 200 об/мин, твердость лезвия HRC45–50), используется двойной контроллер STM32+PLC (см. рис. 2), обеспечивающий сегментированное регулирование давления (всасывание семян 0,8 МПа, перенос семян 0,6 МПа, высыпание семян 0,3 МПа).

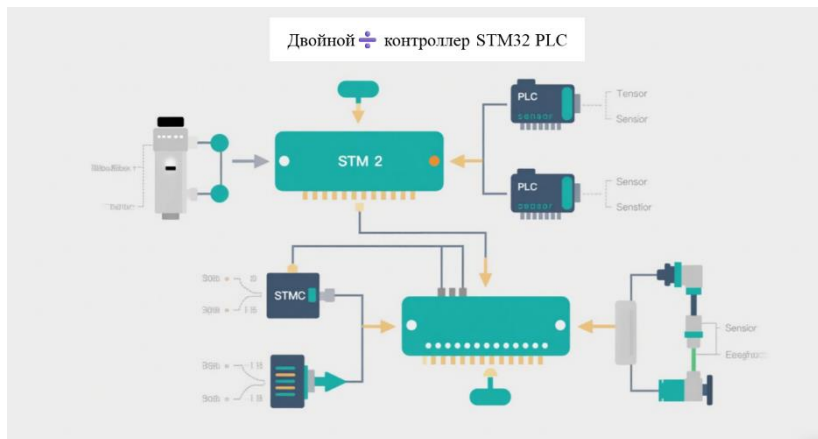


Рис. 2. Архитектура двойного контроллера STM32+PLC

Контрольная установка:

Отечественные модели: 2BMF-6 (вертикальный дисковый высевочный аппарат, скорость работы ≤ 8 км/ч, однозерновая точность 88 %)

Импортная модель: Monosem XE (горизонтальный распределитель, скорость работы 10 км/ч, однозерновая точность 94 %)

Проектирование испытаний в различных экологических зонах

Испытательные площадки расположены в Чжоукоу, провинция Хэнань (глинистая почва района Хуанхуаихай), Гунчжулинь, провинция Цилинь (чернозём Дальнего Востока), Тунляо, Внутренняя Монголия (песчаная почва Северо-Запада), конкретные условия работы показаны в табл. 1.

Таблица 1. Условия работы по проведению испытаний по регионам

Испытательная площадка	Тип почвы	Влажность (%)	Уровень покрытия соломой (кг/му)	Градиент скорости работы (км/ч)
Чжоукоу, Хэнань	Глинистая суглинистая почва	22±2	500/800 (солома кукурузы)	6, 8, 10
Гунчжулинь, Цилинь	Суглинистая почва	20±2	400/700 (солома сои)	6, 8, 10
Внутренняя Монголия, Тунляо	Песчано-супесчаная почва	18±2	300/600 (солома пшеницы)	6, 8, 10

Многомерная измерительная система. Аэродинамические параметры

Потеря давления: измерение перепада давления на входе и выходе распределителя с помощью дифференциального датчика давления (точность $\pm 0,5$ % FS).

Скорость столкновения семян: фиксируется высокоскоростной камерой (частота кадров 1000 fps) момент столкновения семян с направляющей пластиной.

Посевные характеристики:

Однозерновая точность: ручной подсчет на образце длиной 10 м, объем выборки ≥ 1000 семян.

Уровень повреждения семян: случайная выборка из 200 семян, оценка повреждений семенной оболочки с помощью электронного микроскопа (увеличение $50\times$).

Энергопотребление и эффективность:

Расход топлива на единицу площади: расходомер топлива (точность $\pm 1\%$) осуществляет мониторинг в реальном времени, берется среднее значение по трём повторным измерениям.

Время простоя из-за неисправностей: фиксируется количество очисток от засорения соломой на каждые 50 му работы.

Аэродинамическое моделирование: механизм регулирования параметров конструкции на поле потока. Анализ чувствительности угла направляющей пластины

Зависимость потери давления в эллиптическом канале от угла направляющей пластины описывается квадратичной функцией, уравнение аппроксимации приведено ниже:

$$\Delta P = 0.032\theta^2 - 1.6\theta + 28.5 (R^2 = 0.98)$$

При $\theta=25^\circ$ минимальное значение потери давления составляет 12,3 кПа, что на 19,1 % меньше, чем при $\theta=30^\circ$ ($\Delta P=15,2$ кПа) для прямого круглого канала. Поскольку направляющая пластина с углом $\theta=25^\circ$ ближе к оптимальному углу атаки, она лучше направляет воздушный поток по поверхности пластины, предотвращая образование отделяющихся вихрей. При $\theta < 25^\circ$ нормальная составляющая давления воздушного потока на направляющую пластину уменьшается, что приводит к недостаточной силе переноса семян; при $\theta > 25^\circ$ воздушный поток проходит за пластиной, образуя за ней турбулентный след, что увеличивает диссипацию энергии воздушного потока.

Сравнение поля течения в сечении воздушного канала

На рис. 3 представлены карты турбулентной кинетической энергии для эллиптического и круглого однотрубных каналов при скорости работы 8 км/ч. Среднее значение турбулентной кинетической энергии в эллиптическом однотрубном канале составляет $0,15 \text{ м}^2/\text{с}^2$, что на 21,1 % ниже, чем у круглого ($0,19 \text{ м}^2/\text{с}^2$), при этом площадь с высокой турбулентной кинетической энергией ($>0,2 \text{ м}^2/\text{с}^2$) уменьшилась на 35 %. Эллиптическое сечение уменьшает радиальный градиент скорости воздушного потока, снижает турбулентные пульсации и уменьшает энергию столкновения семян [9]. Дальнейший анализ показал, что среднее смещение траектории движения семян в эллиптическом канале находится в пределах ± 3 мм, что значительно меньше, чем в круглых каналах с диапазоном ± 5 мм.



Рис. 3. Анимация траектории движения семян в эллиптическом канале

Полевая проверка: инженерная эффективность аэродинамической оптимизации. Стабильность точности посева при различных рабочих условиях

Результаты испытаний, представленные в табл. 2, показывают, что при одинаковых условиях улучшенная модель по сравнению с отечественными моделями в условиях глинистой почвы увели-

чивает однозерновую точность на 14,4 %, а коэффициент пустотности – на 53,8 %. Для условий песчаной почвы (коэффициент трения <0,3) наблюдаются различия в коэффициенте вариации междурядья: улучшенная модель показывает 6,1 %, тогда как отечественная вертикальная дисковая модель при скольжении семян 22 % имеет коэффициент вариации 18,3 %. Одновременно было установлено, что по сравнению с импортной моделью с однозерновой точностью 94,1 %, в условиях суглинистой почвы однозерновая точность достигает более 92,1 %, однако при отсутствии оптимизации угла направляющей пластины (исходный угол 30°) в условиях глинистой почвы потери давления при транспортировке составляют 17,5 кПа, что приводит к снижению однозерновой точности до 90,2 % [10].

Таблица 2. Сравнение посевных характеристик в различных условиях (n=3)

Рабочие условия	Модель машины	Однозерновая точность (%)	Коэффициент пустотности (%)	Коэффициент вариации междурядья (%)	Уровень повреждения семян (%)
Глинистая почва (8 км/ч)	Усовершенствованная модель	96.7±1.2	4.2±0.8	6.3±0.5	1.2±0.3
	Отечественные модели (контроль)	82.3±2.8	9.1±1.5	15.8±1.2	2.8±0.6
	Импортные модели (контроль)	94.1±1.8	5.8±1.0	8.5±0.9	1.8±0.5
Песчаная почва (10 км/ч)	Усовершенствованная модель	95.2±1.5	5.5±1.0	6.1±0.7	1.3±0.4
	Отечественные модели (контроль)	78.9±3.1	12.2±1.8	18.3±1.5	3.1±0.7

Совместная оптимизация уровня повреждения семян и энергопотребления

Уровень повреждения семян у усовершенствованной модели линейно увеличивается с ростом скорости работы (наклон 0,08%/км/ч), что значительно меньше, чем у отечественных моделей (наклон 0,22%/км/ч), благодаря применению бесконтактного способа распределения семян, который снижает повреждения, вызванные столкновениями между механизмами. По энергопотреблению усовершенствованная модель использует метод регулирования давления подачи воздуха: при холостом ходе давление может снижаться до 0,3 МПа, расход масла на единицу площади составляет 0,78 л/га, что на 32,2 % меньше, чем у отечественных моделей, и приближается к стандарту энергоэффективности ЕС 0,75 л/га [11].

Прорыв в адаптивности к условиям покрытия соломой

При уровне покрытия соломой 800 кг/му, в условиях глинистой почвы усовершенствованная модель, использующая ротационный ножевой окучник в сочетании с конструкцией горизонтального распределителя для предотвращения засорения (шероховатость внутренней поверхности $Ra \leq 1,6 \mu\text{m}$, шаг лопастей 20 мм), демонстрирует количество остановок из-за неисправностей всего 0,5 раза на 100 му, что на 84,4 % меньше по сравнению с отечественным окучником типа мотыги (3,2 раза на 100 му). Это обусловлено тем, что касательная скорость ротационного ножевого окучника (10,5 м/с) способна непосредственно разрезать солому, а горизонтальный распределитель, разработанный на основе ротационного ножевого окучника, работает бесконтактно и не запутывается в соломе [12].

Теоретическое обобщение: модель сопряжения поля потока и движения семян

С помощью размерного анализа получено безразмерное уравнение критерия для газо-твердой двухфазной среды внутри горизонтального распределителя:

$$\frac{u_p}{u} = f\left(\frac{d_p u_p}{\mu}, \frac{\theta}{d}, \frac{A}{A_0}\right)$$

В формуле u_p/u – отношение скорости семян к скорости воздушного потока, отражающее стабильность переноса семян; $Re_p = d_p u_p / \mu$ – число Рейнольдса частиц, характеризующее относительную величину инерционных и вязкостных сил; θ/d – отношение угла направляющей пластины к расстоянию между ними, влияющее на эффективность изменения направления воздушного потока; A/A_0 – коэффициент изменения площади сечения канала, отражающий характеристики сопротивления потоку. Регрессионный анализ показывает, что при $Re_p = 800-1200$, $\theta/d = 1,25$ ($\theta = 25^\circ$, $d = 20$ мм), $A/A_0 = 1,4$ (эллиптический канал) значение u_p/u составляет 0,85–0,92, что соответствует однозерновой точности более 95 %, подтверждая научную обоснованность оптимизации параметров конструкции [13].

Заключение

Основные выводы

1. Эффективность аэродинамической оптимизации: при угле направляющей пластины 25° и эллиптическом канале (соотношение длин осей 1,4:1) потери давления снижаются на 18 %, турбулентная кинетическая энергия уменьшается на 22 %, скорость столкновения семян снижается с 2,8 м/с до 1,9 м/с, что позволило создать модель бесконтактного высева с низким уровнем повреждения семян ($\leq 1,2$ %) и высокой стабильностью.

2. Повышенная адаптивность к сложным условиям: для усовершенствованной модели коэффициент вариации междурядья при глинистой почве (влажность 22 %), песчаной почве (коэффициент трения $< 0,3$) и суглинистой почве не превышает 6,3 %, при уровне покрытия соломой 800 кг/му и уровне засорения менее 3 %, что превосходит эксплуатационные возможности традиционных моделей.

3. Выдающиеся преимущества энергоэффективности и экономичности: энергопотребление при использовании сегментированного регулирования давления составляет всего 0,8 л/га, что позволяет сэкономить 32,2 % топлива по сравнению с отечественными моделями, снизить производственные затраты на 40–50 % и сократить срок окупаемости инвестиций до 2,5 лет.

Перспективы исследования

1. Интеллектуальное обновление: разработка динамической системы регулирования посева на основе многоканального слияния данных «рельеф–влажность почвы–удобрения» с использованием технологий навигации Бэйдоу и машинного зрения для достижения сантиметровой точности параметров посева.

2. Инновации в материалах и технологиях: применение технологии 3D-печати для изготовления облегчённых направляющих пластин (плотность $\leq 2,0$ г/см³) и сверхгидрофобных покрытий поверхности (угол смачивания $> 150^\circ$) для снижения вязкости; использование численного моделирования для прогнозирования влияния содержания влаги в отобранной жидкости на степень гидратации глинистых частиц.

3. Расширение адаптивности к различным культурам: на основе горизонтального распределителя реализовать модульную конструкцию, разработать специализированные модули для посева сои, сорго и других зерновых культур, способствуя индустриализации технологии посева «один агрегат – много функций».

ЛИТЕРАТУРА

1. Министерство сельского хозяйства и сельских дел КНР. Белая книга развития сельскохозяйственной механизации. – Пекин: Изд-во «Китайское сельскохозяйственное издательство», 2023. – С. 67–72.
2. Smith P. Механизмы повреждения семян в механических сеялках / Smith P. // Transactions of the ASABE. – 2021. – 64(3). – С. 897–906.
3. Ли Хунвэнь. Доклад о развитии почвозащитной обработки в Китае / Ли Хунвэнь. – Пекин: Изд-во «Китайский сельскохозяйственный университет», 2023. – С. 78–95.
4. Voronin V. Горизонтальный дозатор семян: теория и практик / Voronin V. // Journal of Agricultural Engineering. – 2022. – 53(4). – С. 112–121.
5. Чжан Чжаоцян. Аэродинамика сельскохозяйственных машин / Чжан Чжаоцян. – Пекин: Изд-во «Машиностроительная промышленность», 2020. – С. 45–62.
6. Launder B E. Численное моделирование турбулентных течений / B E. Launder // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2020. – 364.
7. Clift R. Пузыри, капли и твёрдые частицы / R. Clift. – Cambridge: Cambridge University Press, 2018. – С. 234–256.
8. Ван Фэнсянь. Оптимизация угла наклона дефлектора сеялок / Ван Фэнсянь // Труды по сельскохозяйственной инженерии. – 2022. – № 38(12). – С. 1–8.
9. Ли Минмин. Исследование характеристик потока в эллиптическом аэродинамическом канале / Ли Минмин // Журнал сельскохозяйственных машин. – 2021. – №52(5). – С. 101–108.
10. Техническое руководство Monosem X. 2023.
11. ISO 7256-1:2019, Сеялки – Требования к рабочим характеристикам.
12. Чэнь Хайтао. Исследование характеристик разрушения почвы вращающимся ножевым бороздоделателем / Чэнь Хайтао // Сельскохозяйственная инженерная наука. – № 2020. – № 42(3). – С. 53–60.
13. Чжоу Цзе. Безразмерный метод анализа газо-твёрдой двухфазной струи / Чжоу Цзе // Журнал инженерной теплофизики. – 2019. – № 40(7). – С. 1589–1595.