

Цифровой двойник пневматической системы посевного комплекса на основе сопряжённого CFD-DEM моделирования

С. Г. Мударисов✉, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Мехатронные системы и машины аграрного производства»

И. М. Фархутдинов, доктор технических наук, доцент кафедры «Мехатронные системы и машины аграрного производства»

В. Х. Имангулов, младший научный сотрудник кафедры «Мехатронные системы и машины аграрного производства»

Р. Т. Гареев, соискатель кафедры «Мехатронные системы и машины аграрного производства»

ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ

450001, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34

✉salavam@gmail.com

Резюме. Равномерность распределения семян в пневматических системах напрямую определяет эффективность использования широкозахватных посевных комплексов, однако именно при движении семян через распределительную головку наблюдаются явления, приводящие к наибольшему снижению точности высева. В статье предлагается подход, в котором аэродинамика двухфазного потока «воздух – семена пшеницы» рассматривается не абстрактно, а через заранее идентифицированный режим течения: по результатам экспериментальных измерений массовой концентрации, равной 0,33, скоростей семян в пределах 1,7...1,95 м/с и межфазного числа Рейнольдса $Re_p \approx (5,3...5,9) \cdot 10^3$ с использованием штатных узлов посевного комплекса John Deere 1910. Такой поток отнесён к сильно запылённым турбулентным течениям с автомодельным режимом обтекания частиц. Это позволило обосновать выбор стандартной $k-\epsilon$ модели турбулентности и постоянного коэффициента сопротивления частиц $C_D = 0,424$ как базиса для построения сопряжённой CFD-DEM-модели. Численный эксперимент выполнен с модернизированной вертикальной распределительной головкой с девятью выходами, в которой роль стабилизирующего элемента играет внутренняя спиральная вставка треугольного поперечного сечения в нагнетательную трубу распределителя. Варьируя геометрию спирали по трём параметрам (углу при основании треугольного поперечного сечения витка спирали α , количеству витков n и высоте сечения спирали h), исследовано распределение семенного потока как отклик сложной газодинамико-частичной системы, а не как набор локальных эмпирических коэффициентов. Поверхность отклика коэффициента вариации показывает, что именно высота сечения спирали формирует область оптимальных режимов, что позволяет существенно снизить неравномерность распределения семян при рабочих скоростях, характерных для современных посевных агрегатов. Такой формат цифрового эксперимента превращает CFD-DEM-модель в практический инструмент конструирования распределительных устройств нового поколения.

Ключевые слова: равномерность, распределение, семена, семяпровод, посевной комплекс, пневматическая система, вертикальный распределитель, гидродинамика, метод дискретных элементов, CFD-DEM моделирование, воздушно-зерновая смесь.

Для цитирования: Цифровой двойник пневматической системы посевного комплекса на основе сопряжённого CFD-DEM моделирования С. Г. Мударисов, И. М. Фархутдинов, В. Х. Имангулов, Р. Т. Гареев // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. №1 (73). С. 166-176. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-166-176

A digital twin of a seeding complex pneumatic system based on coupled cfd-dem modeling

S.G. Mudarisov, I.M. Farkhutdinov, V.Kh. Imangulov, R.T. Gareev

FSBEI HE Bashkir State Agrarian University

450001, Ufa, 50-letiya Oktyabrya St., 34

✉salavam@gmail.com

Abstract. The uniformity of seed distribution in pneumatic systems directly determines the efficiency of wide-cut seeding complexes. However, phenomena leading to the greatest reduction in seeding accuracy are observed particularly during the seed movement through the distribution head. The article proposes an approach in which the aerodynamics of a two-phase air-wheat seed flow is considered not in the abstract, but through a pre-identified flow regime. It is based on the results of experimental measurements of a mass concentration of 0.33, seed velocities in the range of 1.7...1.95 m/s and an interfacial Reynolds number $Re_p \approx (5.3...5.9) \cdot 10^3$ using standard units of a John Deere 1910 seeding complex. This flow is classified as a highly dusty turbulent flow with a self-similar flow regime around particles. This enables to justify the choice of the standard $k-\epsilon$ turbulence model and a constant particle drag coefficient $C_D = 0.424$ as the basis for constructing a conjugate CFD DEM model. A numerical experiment was performed using an improved vertical distributor head with nine outlets, where an internal spiral insert with a triangular cross-section in the distributor's discharge pipe serves as a stabilizing element. By varying the spiral geometry by three parameters (the base angle of the triangular cross-section of the

spiral turn α , the number of turns n and the spiral cross-sectional height h), seed flow distribution was studied as the response of a complex gas-dynamic particle system, rather than as a set of local empirical coefficients. The response surface of the variation coefficient shows that it is the spiral cross-sectional height that determines the appropriate range, which significantly reduces seed distribution unevenness at operating speeds typical of modern seeding units. This digital experiment format transforms the CFD DEM model into a practical tool for designing next-generation distributors.

Keywords: uniformity, distribution, seeds, seed tube, seeding system, pneumatic system, vertical distributor, hydrodynamics, discrete element method, CFD-DEM modeling, air-grain mixture.

For citation: A digital twin of a seeding complex pneumatic system based on coupled cfd-dem modeling / S.G. Mudarisov, I.M. Farkhutdinov, V. Kh. Imangulov, R.T. Gareev // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 166-176 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-166-176

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-10070
(<https://rscf.ru/project/23-76-10070/>)

Введение

Современные широкозахватные посевные комплексы оснащены пневматическими системами для распределения и транспортировки семян и удобрений от бункеров до сошников. Для распределения семян и удобрений существует большое разнообразие распределительных устройств, отличающихся между собой конструктивными особенностями. Большую популярность приобрели горизонтальные и вертикальные распределительные устройства. В зависимости от ширины захвата посевного комплекса устанавливаются одноступенчатые и многоступенчатые распределители. Для сеялок шириной более 4 м применяют преимущественно двухступенчатое распределение, поскольку увеличивается длина семяпроводов между сошниками, что крайне негативно влияет на качество распределения. Наилучшие показатели по качеству распределения семян получили распределители вертикальной конструкции. Согласно исследованиям [1, 2], неравномерность распределения семян в таких конструкциях доходит до 19,8 %, что непосредственно влияет на урожайность высеваемой культуры. В связи с этим совершенствование существующих и разработка новых конструкций распределительных устройств, обеспечивающих качественное распределение семенного материала по сошникам, является актуальной задачей.

На современном этапе развития агроинженерии математическое моделирование становится неотъемлемой частью проектирования, в том числе в сельскохозяйственном машиностроении. Особую актуальность представляет моделирование пневматических высевающих систем, функционирующих как двухфазные потоки (газ – твердые частицы). Высокая вариативность свойств посевного материала требует тщательной идентификации физико-механических характеристик семян для валидации параметров моделей. Применение сопряженного метода вычислительной гидродинамики (CFD) и дискретных элементов (DEM) при правильном его применении позволяет сформировать адекватный цифровой двойник пневмотранспортного процесса, который является надежной основой для оптимизации конструктивных параметров распределительных устройств.

В работе [1] исследовано влияние геометрии распределительной головки на точность посева в

пневматических сеялках с использованием метода CFD-DEM. Для моделирования воздушного потока в CFD-модели применена стандартная k - ϵ модель турбулентности, а для частиц (семян) в DEM-модели – контактная модель Герца-Миндлина. Авторы с помощью своей модели исследовали равномерность распределения для трех типов семян (рапс, пшеница, рис) для трёх типов конструкций распределительных головок с шестью выходами. Для одного из вариантов конструкции была достигнута высокая равномерность высева: погрешность составляет 0,1 % для рапса, 2,5 % - для пшеницы и 3,1 % – для риса. Исследование показало, что оптимизация геометрии распределительной головки с использованием CFD-DEM модели позволяет значительно улучшить точность посева.

Han D. и соавторы [2] исследовали влияние аэродинамических параметров на работу высевающего аппарата, используя подход сопряжения CFD-DEM и натурные испытания. Оптимизация впускного канала посевного комплекса показала, что определяющим фактором равномерности является скорость воздушного потока: оптимум (коэффициент вариации 19,89 %) достигается при 7 м/с. Превышение порога в 11 м/с ведет к ухудшению показателей. Авторы доказали высокую прогностическую точность CFD-DEM моделей при обосновании конструктивных параметров и режимов работы посевной машины.

Fogal M. и соавторы [3] продемонстрировали применимость CFD-моделирования (ANSYS CFX, k - ϵ модель турбулентности) для оптимизации аэродинамических характеристик посевных машин. На примере двух типов радиальных вентиляторов, работающих при 4000 мин⁻¹, показано преимущество конструкции А1: снижение рециркуляционных потоков позволило повысить ее эффективность на 70 % относительно аналога В1. Обеспечение выходной скорости свыше 25 м/с гарантировало бесперебойную подачу удобрений. Валидация модели показала высокую сходимость результатов: отклонение численных значений от экспериментальных не превысило 4,3 %.

В исследовании Guzman, L. и др. [4] методами вычислительной гидродинамики CFD и дискретных элементов DEM была смоделирована динамика движения семян гороха в горизонтальном трубопроводе пневматической сеялки. Авторы пришли к выводу,

что предложенная CFD-DEM модель адекватно предсказывает среднюю скорость частиц и корректно фиксирует факты их соударений, что подтверждается удовлетворительным согласованием результатов моделирования с экспериментальными данными.

В исследовании Liao Y. и соавторов [5] методом CFD-DEM проанализированы характеристики движения бинарной смеси семян люцерны и коостреца безостого в пневматическом конвейере типа Вентури. Моделирование турбулентного воздушного потока выполнялось с использованием стандартной $k-\epsilon$ модели, а для описания взаимодействия частиц применялась контактная модель Герца-Миндлина. Результаты показали, что повышение скорости воздуха приводит к снижению количества межчастичных столкновений. Однако чрезмерное увеличение скорости негативно сказывается на равномерности распределения семян в потоке. Эффективность оптимизированной конструкции была подтверждена натурными испытаниями, которые продемонстрировали высокую стабильность состава смеси на выходе: отклонение от заданного соотношения семян не превышало 4 %.

Работа Gu, B. и соавторов [6] посвящена моделированию движения семян пшеницы в пневматической системе высева. Авторы применяли метод дискретных элементов (DEM) и его сопряженную реализацию с вычислительной гидродинамикой (CFD-DEM). Численное моделирование основывалось на стандартной $k-\epsilon$ модели турбулентности для газовой фазы и контактной модели Герца-Миндлина для описания взаимодействия между частицами. Натурные эксперименты подтвердили адекватность предложенного подхода.

Lei, X и соавторы [7] исследовали движение семян пшеницы и рапса в пневматическом высевающем устройстве с центральной дозировкой с использованием сопряженного подхода DEM-CFD. В рамках модели частицы семян описывались в программе EDEM, а газовая фаза - в ANSYS Fluent. Для пшеницы применялась эллипсоидальная форма частицы. Основные параметры контактной модели – коэффициент восстановления, статического и динамического трения, равные 0,42, 0,35 и 0,05 соответственно (для контакта частица–частица). Модель контакта – Hertz-Mindlin. Авторы установили, что основными факторами, определяющими транспортировку семян, являются площадь горловины Вентури-трубы и скорость входного воздушного потока.

Анализ работ по использованию сопряженного CFD-DEM-моделирования пневматических систем посевных машин показывает, что авторы, в основном, используют стандартные подходы к моделированию без обоснования условий их применимости и учета таких важных факторов, как различие режимов течения и взаимодействия по длине транспортных пневмопроводов посевного комплекса, начиная от вентилятора и до сошников. Мухаметдинов А.М. и Мударисов С.Г. в работе [8] на основе экспериментальных

данных показали широкое изменение аэродинамических показателей двухфазного течения «воздушный поток – удобрения» в пневматической системе широкозахватного посевного комплекса. Так объемная концентрация удобрений варьировалась от 0,00022 до 0,008, коэффициент сопротивления частиц – от 0,458 до 0,513, а межфазное число Рейнольдса от 330 до 1319 по длине пневмопроводов.

Мударисов С.Г. и соавторы [9] указывают, что для построения адекватных моделей пневматических систем, в первую очередь, необходимо установить концентрацию воздушно-зерновой смеси в потоке, режимы течения и турбулентности двухфазной среды.

Кроме этого, при моделировании необходимо осознанно подходить и к выбору моделей турбулентности. Моен А. и соавторы [10] сравнивали различные варианты $k-\epsilon$ моделей в задачах истечения и рассеяния газов и показали, что выбор турбулентностной модели существенно влияет на предсказание концентраций и динамики облака.

Liu Z. и соавторы [11] выполнили оценку турбулентных моделей на примере течения со стопорными решетками, демонстрируя, что корректный выбор модели турбулентности улучшает согласование CFD с экспериментом для сложных 3D-течений.

На основе представленных исследований можно сделать заключение, что сопряжение методов CFD и DEM для моделирования процесса работы пневматической системы с семенами может дать адекватные результаты только при должном обосновании режима двухфазного течения. Основным ограничивающим фактором широкого применения методов сопряженного гидродинамического и дискретного моделирования CFD-DEM для описания процесса работы посевных комплексов является сложность определения этих режимов, числа Рейнольдса межфазного взаимодействия и аэродинамического коэффициента твердых частиц.

Цель исследований – разработка модели технологического процесса посевного комплекса сопряженным методом вычислительной гидродинамики (CFD) и дискретных элементов (DEM) на основе экспериментальных аэродинамических показателей двухфазного течения «воздушный поток – семена». На основе уточненной сопряженной CFD-DEM модели течения «воздух-частицы семян пшеницы» необходимо обосновать конструктивные параметры модернизированной вертикальной распределительной головки с девятью выходами и оценить равномерности распределения семян пшеницы.

Материал и методы

Для экспериментального определения аэродинамических показателей двухфазного течения «воздушный поток – семена» разработана лабораторная установка (рис. 1), которая включает в себя бункерную часть посевного комплекса John Deere 1910. Для привода вентилятора 4 посевного комплекса и гидропривода дозирующих катушек высевающего аппарата 3 подключена гидростанция 8, включающая в

себя гидромотор с приводом от электродвигателя и гидрораспределитель. Семена по семяпроводам 7 распределялись вертикальной распределительной головкой 6 типа Аккорд с девятью выходами. Семена с каждого семяпровода собирали отдельно в тару 9.



Рис.1. Лабораторная установка для определения аэродинамических показателей пневматической системы

1 – бункер для семян; 2 – бункер для удобрений; 3 – высевной аппарат; 4 – вентилятор; 5 – распределительный семя-тукопровод; 6 – вертикальный распределитель; 7 – семяпроводы; 8 – гидростанция; 9 – тара для сбора семян

Определение режима течения. Для определения режима течения необходимо рассчитать массовую и объемную концентрации семян в пневматической системе. Массовая концентрация частиц семян [12, 13]:

$$W = \frac{Q \rho_p}{\rho}, \quad (1)$$

где Q – объёмная концентрация частиц; ρ – плотность воздуха, кг/м^3 ; ρ_p – плотность твердых частиц (семян), кг/м^3 ;

Объёмная концентрация частиц

$$Q = \frac{k \pi d_3^3}{6}, \quad (2)$$

где k – счетная концентрация частиц, кг/м^3 ; d_3 – эквивалентный диаметр твердых частиц (семян), м.

Счетная концентрация семян зависит от нормы высева семян Q_c , рабочей скорости V_c и ширины захвата B_p сеялки, а также от массы 1000 штук семян m_h [10]:

$$k = \frac{B_p V_c Q_c}{10 m_h}. \quad (3)$$

В расчетах принимали норму высева семян $Q_c = 180 \text{ кг/га}$, ширину захвата одной секции сеялки $B_p = 8,1 \text{ м}$, рабочую скорость $V_c = 10 \text{ м/с}$, массу 1000 штук семян $m_h = 35...40 \text{ г}$.

В связи с тем, что семена зерновых сельскохозяйственных культур не имеют шарообразной формы и характеризуются тремя параметрами – длиной l , шириной a и толщиной b , в формулах (2, 5) использовали средний эквивалентный диаметр зерновок

$$d_3 = \sqrt[4]{\frac{(l a b)^2}{\pi}}. \quad (4)$$

Для измерений параметров семян использовали микрометр МКЦ-25 «Зубр» с погрешностью 2 мкм. Для определения геометрических размеров семян использованы не менее 1000 семян, отобранных случайным образом из навески. Измерения выполняли в трехкратной повторности.

Для выбора модели турбулентности и коэффициента сопротивления частицы при моделировании двухфазных течений необходимо определить межфазное число Рейнольдса, показывающее относительное запаздывание частиц:

$$Re_p = \frac{d_3 \rho (v - V)}{\eta}, \quad (5)$$

где η – динамическая вязкость воздуха, Па·с; v – скорость воздушного потока, м/с; V – скорость семян, м/с.

Для оценки скорости семян в пневматической системе была установлена прозрачная трубка-вставка перед распределительной головкой (рис. 2). Скорость потока семян фиксировалась фотоаппаратом с разрешением 60 кадров секунду и замедлением в 10 раз. Ввиду того, что даже такое замедление не позволяет точно определить скорость семян, особенно на горизонтальных участках с малым диаметром трубок, дальнейшую обработку видеоизображений выполняли средствами искусственного интеллекта на базе библиотеки OpenCV, реализующей алгоритмы компьютерного зрения для сегментации и автоматического сопровождения частиц в видеопотоке [18, 19]. Метод основан на автоматизированном покадровом анализе движения частиц. На исходном видеоматериале выполняется калибровка пространственного масштаба по объекту с известными размерами (измерительная линейка), после чего осуществляется сегментация семян по цветовому признаку в пространстве HSV (Hue, Saturation, Value – тон, насыщенность, значение), вычисление центроидов и построение их индивидуальных траекторий. Скорость движения отдельных семян определяется как отношение пройденного расстояния к интервалу времени между моментами фиксирования начальной и конечной координаты трека.



Рис. 2. Полет частиц в трубке

Одной из задач экспериментов была оценка равномерности распределения семян пшеницы по выходам из семяпроводов при установленной норме высева пшеницы 180 кг/га. Скорость воздушного потока перед распределительной головкой, согласно измерениям, составила в среднем 30 м/с. Скорость воздушного потока измеряли трубкой Пито в пятикратной повторности.

Равномерность распределения семян оценивали по коэффициенту вариации:

$$k_V = \frac{\mu}{m} 100\%, \quad (6)$$

где μ – стандартное отклонение равномерности высева; m – средняя масса семян, г.

$$m = \frac{\sum_{i=1}^s m_i}{s}, \quad (7)$$

$$\mu = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^s (m_i - m)^2}}{s - 1}, \quad (8)$$

где m_i – масса семян на выходе из семяпровода, г; s – количество выходов (в данном исследовании - 9).

Значимость коэффициентов уравнения регрессии оценивали по критерию Стьюдента, адекватность полученной модели - по критерию Фишера.

Методика моделирования в Ansys-Rocky DEM. При моделирование пневматической системы (распределителя) посевной машины сопряженным методом CFD-DEM использовали программный комплекс Ansys-Rocky DEM.

Для моделирования движения семян зерновых культур методом дискретных элементов DEM на основе предыдущих наших исследований наиболее подходящим является линейная вязкоупругая модель контакта (*Linear Spring Dashpot*) [15]. Параметры контактной модели приведены в таблице 1. Данные получены на основе собственных измерений и литературных источников.

Параметры воздушного потока для CFD-моделирования приведены в таблице 2. Скорость воздушного потока на входе в распределитель $v = 30$ м/с поддерживалась за счет вентилятора посевного комплекса.

Таблица 1. Параметры контактной модели пшеницы

Показатель	Среднее значение	Источник информации
Модуль Юнга E , МПа	100	[6]
Коэффициент Пуассона ν_p	0,3	[6]
Коэффициент статического трения частица-частица f_{st}	0,4	[1]
Коэффициент динамического трения частица-частица f_d	0,3	[1]
Эквивалентный диаметр частиц d , мм	2,8	на основе собственных измерений (таблица 4)
Соотношение сторон по вертикали частиц	2,20	
Соотношение сторон по горизонтали частиц	0,90	
Коэффициент статического трения частица-корпус $f_{st,k}$	0,3	[1]
Коэффициент динамического трения частица-корпус $f_{d,k}$	0,3	[1]

Таблица 2. Параметры воздушного потока

Показатель	Среднее значение	Комментарии
Скорость воздушного потока на входе распределителя, м/с	30	на основе собственных измерений
Начальное избыточное давление, Па	0	[1, 2, 5]
Интенсивность турбулентности, % *	5	[1, 2, 5]
Коэффициент турбулентной вязкости воздуха**	10	[1, 2, 5]
Плотность воздуха, кг/м ³	1,225	[1, 2, 5]
Динамическая вязкость воздуха, кг/(м·с)	$1,7984 \cdot 10^{-5}$	[1, 2]

* Интенсивность турбулентности — это относительная мера пульсаций скорости в потоке. Для труб и каналов - от 3,5 % до 5 % [17].

** Коэффициент турбулентной вязкости воздуха представляет собой эффективную величину, учитывающую эффекты турбулентного перемешивания в моделировании турбулентных потоков, при числе Рейнольдса $Re > 1000$ варьируется от 1 до 15 [17].

Методика сопряженного CFD-DEM моделирования реализована в программном комплексе Ansys Workbench и включает последовательную настройку

связи между модулями Ansys Fluent (CFD) и Rocky DEM (рис. 4). Процедура состоит из следующих основных этапов.

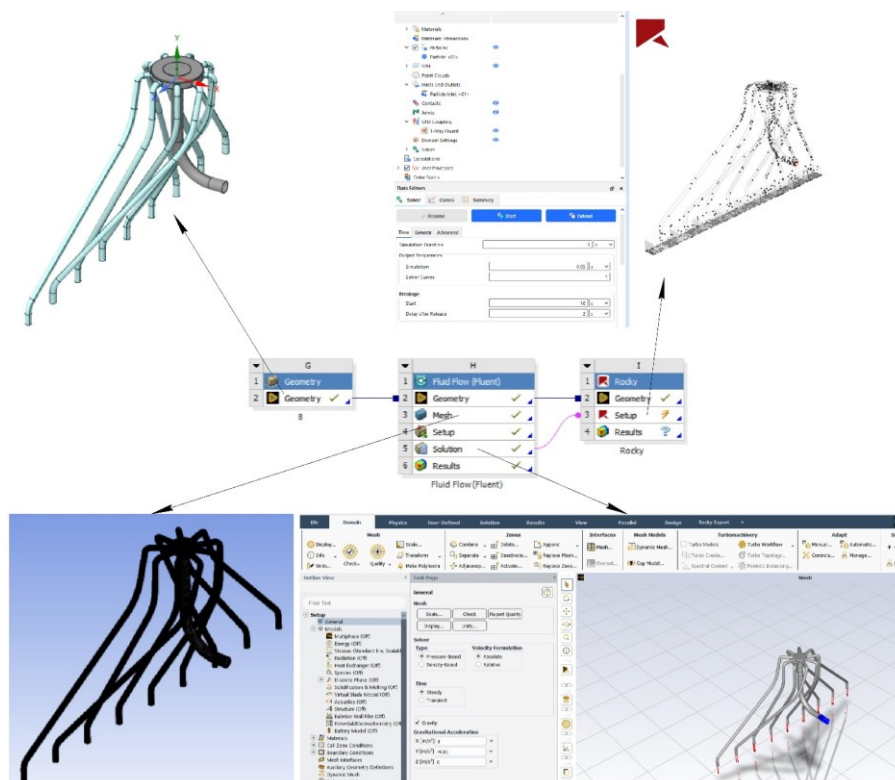


Рис. 4. Процесс сопряженного моделирования CFD-DEM

1. Геометрическое моделирование (Geometry). Трехмерная модель рабочего объема (в нашем случае, распределителя) создается в ANSYS SpaceClaim. Геометрия включает объемную область течения газовой фазы (для расчета в Fluent). Все поверхности, контактирующие с частицами (стенки, препятствия), экспортируются в Rocky DEM для учета взаимодействия.

2. Построение и настройка вычислительной сетки (Meshing). Для задач, учитывающих движение частиц, критически важна точность разрешения потока в пристеночных областях. Для этого использовали слои сгущения (Inflation Layers) у твердых границ. На этом же этапе задавали граничные условия для CFD-расчета: вход (inlet), выход (outlet) и стенки (wall). Пример заданных граничных условий для модели распределителя представлен на рисунке 5.

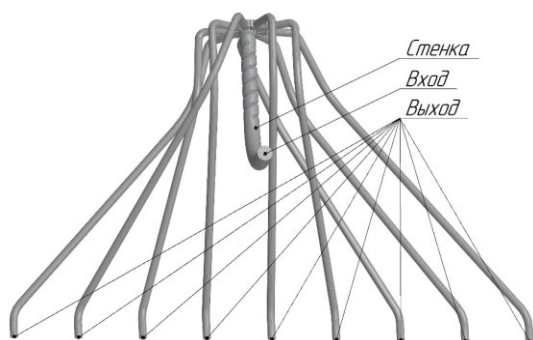


Рис. 5. Граничные условия распределителя

3. Настройка параметров CFD-модели (Setup – Fluen). В модуле Fluent задавали параметры модели газового потока. На основании анализа литературных данных [3, 4, 5] для моделирования турбулентного течения воздуха в пневматических системах была предварительно выбрана стандартная $k-\epsilon$ (k -epsilon) модель, обеспечивающая удовлетворительный компромисс между вычислительной эффективностью и точностью. Для ранее заданных границ определили условия: на входе устанавливали скорость потока (velocity inlet), на выходе – статическое давление (pressure outlet).

4. Настройка параметров DEM-модели (Setup – Rocky DEM). В модуле Rocky DEM определяли свойства моделируемых частиц (семян пшеницы): геометрические характеристики (размер, геометрия), плотность, физико-механические свойства, необходимые для расчета контактных взаимодействий. Созданные частицы загружали в расчетную область, соответствующую экспортированной геометрии стенок.

5. Время расчета выбирали, исходя из предварительно выполненных технологических расчетов времени транспортировки семян в пневматической системе.

6. Равномерность распределения семян пшеницы оценивали на основе Эйлеровой статистики путём определения массы семян в отдельно взятых ячейках.

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

Для повышения равномерности распределения семян в нагнетательную трубу распределителя была установлена вставка в форме спирали. Длина данной спирали составила 300 мм. Спираль выполнена в

виде треугольника с углом поперечного сечения α , количеством витков n и высотой поперечного сечения h (рис. 6).

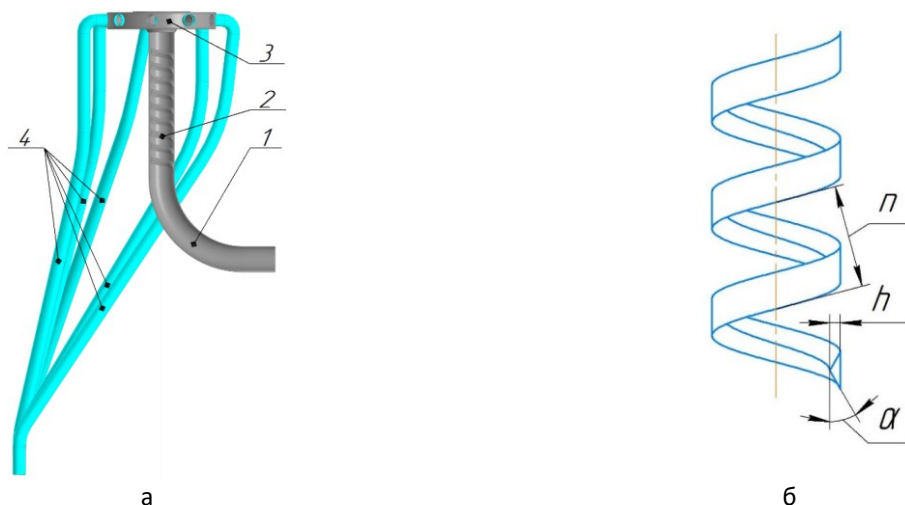


Рис. 6. Экспериментальный вертикальный распределитель со вставкой:

а - трехмерная модель; б – схема вставки в форме спирали; 1 – нагнетательная труба; 2 – вставка в форме спирали; 3 – распределительная головка; 4 – семяпроводы

Оценка равномерности высева с помощью модели. Для изучения влияния вставки в форме спирали на равномерность распределения семян по девяти выходам из распределителя был проведен трехфакторный эксперимент на трех уровнях согласно плану Бокса-Бенкина [14]. По окончании расчета фиксировали массу семян на выходе из семяпроводов. В качестве исследуемых факторов с учетом

предложенной конструкции выбраны: X1 – угол поперечного сечения спирали α в пределах от 25° до 35° ; X2 – количество витков спирали n от 6 до 12 шт., X3 – высота поперечного сечения спирали h от 2,5 мм до 7,5 мм. В качестве выходного параметра принят коэффициент вариации массы семян по выходам k_v . В таблице 3 представлены факторы и интервалы их варьирования.

Таблица 3. Факторы и интервалы их варьирования

Характеристика плана	X1 (α), град. - угол поперечного сечения спирали	X2 (n), шт. - количество витков	X3 (h), мм - высота поперечного сечения спирали
Нижний уровень	25	6	2,5
Нулевой уровень	30	9	5
Верхний уровень	35	12	7,5
Интервал варьирования	5	3	2,5

Результаты

Определение режима течения. Результаты измерений семян пшеницы сорта Ватан показал, что средняя длина l , ширина a и толщина b семян соответственно составили 4,78 мм, 2,62 мм и 2,08 мм.

Концентрацию частиц определяли, исходя из нормы высева семян. Расчет выполняли для нормы высева семян пшеницы 180 кг/га, при скорости движения посевного комплекса 10 км/ч, числе сошников - 54. При расчётной часовой производительности агрегата 8,72 га/ч, за 1 с с одного сошника будет сходиться от 7,3 г до 8,4 г семян. С учетом массы 1000 семян пшеницы равной 35...40 г, за 1 с, согласно формуле (3), один сошник будет высевать от 190 до 225 семян.

Для семяпровода внутренним диаметром 0,06 м расчётный объём на 1 м его длины составит 0,0079 м³. Тогда за 1 с по трубке транспортируется от

21695 до 26121 семян. При этом объёмная концентрация, согласно формуле (2),

$$Q = \frac{(21695 \dots 26121) \cdot 3,14 \cdot 0,0028^3}{6} = 2,5 \dots 3 \cdot 10^{-4},$$

а по формуле (1) массовая концентрация

$$W = \frac{((0,0025 \dots 0,003) \cdot 10^{-4}) \cdot 1400}{1,225} = 0,285 \dots 0,342.$$

Согласно классификации двухфазных течений [12] по объёмной концентрации частиц, при такой массовой концентрации двухфазные течения относят к сильно запылённым и турбулентным.

Согласно формуле (4) межфазное число Рейнольдса

$$Re_p = \frac{(0,0028 \dots 0,0031) \cdot 1,225(30-1,9)}{1,82 \cdot 10^{-5}} = 5295 \dots 5863.$$

Согласно стандартной зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления от числа Рейнольдса [14], в интервале $Re_p \approx (5,3 \dots 5,9) \cdot 10^3$ режим обтекания соответствует автомоделной

области (закону Ньютона), для которой коэффициент лобового сопротивления C_D слабо зависит от Re_p и может быть принят постоянным. В соответствии с литературными данными для стабильного обтекания частиц сферической формы в этом режиме принимают $C_D = 0,424$ [13]. Кроме того, полученный диапазон изменения межфазного числа Рейнольдса доказывает правильность выбора k - ϵ (k -epsilon) модели турбулентности при моделировании двухфазных течений «воздушный поток – семена» в пневматических системах посевных комплексов.

Рассчитанные параметры (Re_p и постоянный C_D) были использованы для настройки модели взаимодействия фаз в рамках имитационного моделирования технологического процесса.

Обоснование конструктивно-технологических параметров экспериментального вертикального распределителя.

В таблице 4 представлены результаты реализации плана матрицы Бокса-Бенкина.

Таблица 4. Результаты реализации матрицы Бокса-Бенкина

№	X1 – угол α , град	X2 – количество витков n , шт.	X3 – высота поперечного сечения h , мм	γ – коэффициент вариации k_V , %
1	25	6	5	12,8
2	25	12	5	12,6
3	35	6	5	12
4	35	12	5	15,5
5	25	9	2,5	24,4
6	25	9	7,5	17,4
7	35	9	2,5	37
8	35	9	7,5	16,1
9	30	6	2,5	18
10	30	6	7,5	12,3
11	30	12	2,5	11,1
12	30	12	7,5	17
13	30	9	5	12,8
14	30	9	5	12,8
15	30	9	5	12,8

Для статистической обработки использовали пакет Statistica 10. В результате получили уравнение регрессии в закодированном виде

$$\gamma = 17,18 - 3,075(X3)^2. \quad (8)$$

Таблица 5. Распределение семян по семяпроводам

№	Масса семян, г									m_{cp}	σ	k_V , %
	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	4,4	4,0	4,6	4,0	5,3	4,7	5,2	3,6	5,0	4,5	1,2	12,8
2	4,4	5,2	4,5	5,3	4,7	5,9	4,1	4,1	4,7	4,8	1,0	12,6
3	4,0	5,0	5,3	4,7	4,2	5,1	4,6	3,7	4,4	4,6	0,7	12,0
4	4,1	5,2	5,6	5,0	4,4	4,5	4,1	3,4	3,8	4,5	0,6	15,5
5	3,3	5,9	5,6	4,1	5,6	4,3	3,9	2,7	5,1	4,5	1,0	24,4
6	5,5	3,9	5,3	5,3	3,4	5,0	4,5	4,1	5,8	4,7	0,8	17,4
7	2,6	6,1	6,2	3,3	3,3	2,9	3,1	2,7	3,6	3,8	1,6	37,0
8	4,3	4,2	5,1	4,9	3,4	4,3	5,5	4,6	5,9	4,7	1,2	16,1
9	5,4	5,0	5,0	3,6	4,0	3,4	4,4	3,4	4,0	4,3	1,6	18,0
10	4,6	5,3	5,3	4,6	4,4	3,9	3,9	4,1	5,2	4,6	1,7	12,3
11	4,5	4,7	4,7	4,5	4,2	3,9	3,8	3,4	4,6	4,2	2,1	11,1
12	4,4	4,5	4,0	4,0	4,9	6,0	4,4	4,4	6,1	4,7	2,3	17,0
13	4,1	5,3	4,4	4,1	5,0	5,0	4,5	3,6	5,3	4,6	2,6	12,8
14	4,1	5,3	4,4	4,1	5,0	5,0	4,5	3,6	5,3	4,6	2,9	12,8
15	4,1	5,3	4,4	4,1	5,0	5,0	4,5	3,6	5,3	4,6	3,2	12,8

Значимым при 95 % уровне значимости является фактор X3 – высота поперечного сечения спирали.

Уравнение (6) в раскодированном виде:

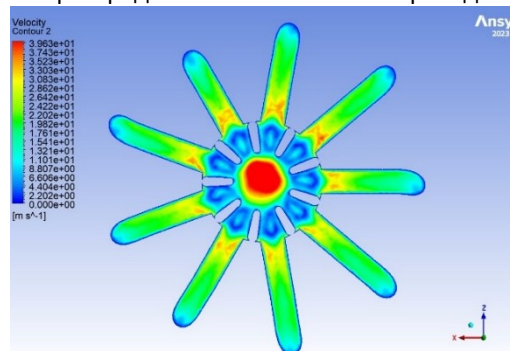
$$k_V = 4,92h - 0,492h^2 + 4,88 \quad (9)$$

Данное уравнение справедливо при h от 2,5 мм до 7,5 мм.

Анализ результатов моделирования CFD-DEM. Результаты моделирования технологического процесса распределителя сопряженным методом CFD-DEM представлены на рисунке 7. Изображенная на рисунке 7б – эпюра скоростей воздушного потока в виде распределения по цветам показывает, что скорости воздушного потока на выходе из распределительной головки примерно одинаковы.



а – распределение семян по семяпроводам



б – эпюра скорости воздушного потока

Рис. 7. Результаты моделирования

В таблице 5 представлены результаты модельного эксперимента по оценке распределения семян по семяпроводам согласно матрице планирования и статистические характеристики.

На рис. 8 представлена гистограмма распределения массы семян пшеницы на выходе из семяпроводов. Несмотря на равномерное распределение воздушного потока на выходе из распределительной головки (рис. 7б) наблюдается относительно небольшая неравномерность распределения семян по семяпроводам (рис. 8).

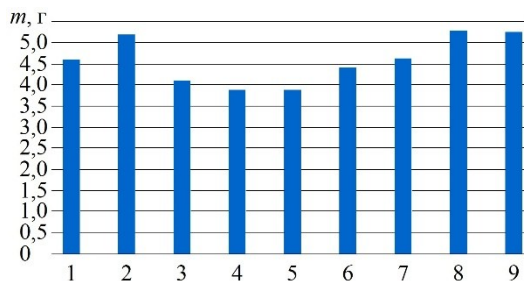


Рис. 8. Гистограмма распределения массы семян по семяпроводам

На рис. 9 представлена в виде поверхности отклика зависимость коэффициента вариации массы семян по выходам k_v от угла поперечного сечения спирали α и высоты поперечного сечения h .

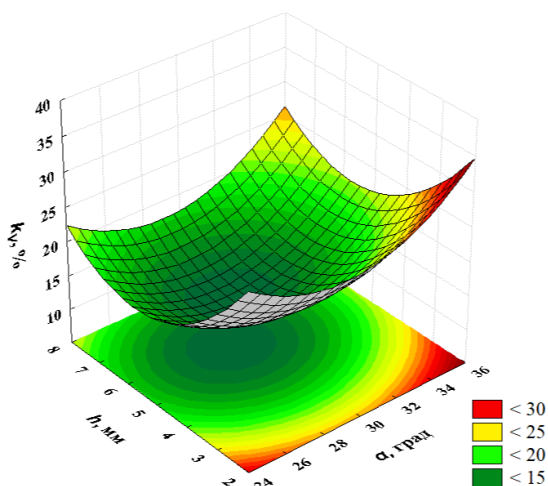


Рис. 9. Зависимость коэффициента вариации массы семян по выходам k_v от угла поперечного сечения спирали α и высоты ее поперечного сечения h

Согласно рис. 9, равномерность распределения семян по семяпроводам повышается при угле поперечного сечения спирали α от 27° до 30° и высоте поперечного сечения h от 4 мм до 6 мм и составляет 11,1 %, что ниже на 1,9 % чем у стандартного вертикального распределителя.

Обсуждение

Проведенные исследования подтверждают высокую эффективность сопряженного CFD-DEM моделирования для анализа и оптимизации пневматических систем посевных комплексов, что согласуется с результатами работ [4, 6, 7]. В отличие от известных исследований, где параметры моделей часто принимают по умолчанию, в данной работе выбор модели

турбулентности и коэффициента аэродинамического сопротивления обоснован на основе экспериментально исследования режима течения. Полученные значения массовой концентрации ($W = 0,285...0,342$) и межфазного числа Рейнольдса ($Re_p \approx 5,3...5,9 \cdot 10^3$) классифицируют исследуемый поток как сильно запыленный турбулентный режим, что коррелирует с выводами [8, 9] о существенной вариативности аэродинамических показателей двухфазного течения по длине пневмопроводов посевного комплекса. Данный результат также согласуется с теоретическими положениями, изложенными в работах Волкова К.Н. [12] и Вараксина А.Ю. [13], где показано, что при таких значениях Re_p коэффициент сопротивления C_D становится слабо зависимым от режима обтекания и может быть принят постоянным ($C_D = 0,424$). Это фундаментальное положение обосновывает выбор стандартной k - ϵ модели турбулентности для CFD-части сопряженной модели, что коррелируется с выводами Moen A. et al. [10], продемонстрировавшими адекватность данной модели для широкого класса задач.

Результаты модернизации распределительной системы с помощью вставки в форме спирали показывают, что коэффициент вариации (k_v) снизился до 11,1 % при оптимальных параметрах. Для сравнения, Albasheer A.H. et al. [1] достигли еще более высокой равномерности (CV 2,5% для пшеницы) за счет использования барьерной конструкции распределительной головки (тип A2). Однако конструкция [1] предполагает наличие 6 выходов и специфических барьеров, тогда как в нашей работе модернизирован стандартный распределитель с 9 выходами типа «Аккорд», что технологически проще при реализации в серийно выпускаемых машинах. Han D. et al. [2] установили, что определяющим фактором равномерности является скорость воздушного потока (оптимум – 7 м/с для высевяющего аппарата), однако в разработанной пневматической системе скорость на входе в распределитель составляет 30 м/с, что обусловлено требованиями пневмотранспорта на предыдущих участках. Полученная нами неравномерность распределения семян по выходам распределителя (11,1 %) является приемлемой для широкозахватных агрегатов и достигнута за счет стабилизации потока перед точкой разделения (рис. 7б), что коррелирует с выводами Liao Y. et al. [5] о важности совершенствования конструкции подающих труб для стабильности транспортировки.

Научная значимость полученных результатов заключается в переходе от эмпирического подбора геометрии распределителей к методике цифрового двойника, основанной на определении режима двухфазного течения. В отличие от многих предыдущих работ, где параметры турбулентности и сопротивления выбирали по умолчанию, данное исследование предлагает иной алгоритм: экспериментальное определение Re_p и концентрации, обоснование выбора модели турбулентности (k - ϵ , постоянный C_D) и оптимизация конструктивных параметров

распределительной системы. Такой подход, сочетающий физическое обоснование с практической инженерной задачей, позволяет сократить объем натурных испытаний и повысить эффективность предлагаемых решений при модернизации существующих и вновь создаваемых пневматических систем посевных комплексов.

Заключение

Экспериментальные исследования на лабораторной установке, созданной на базе посевного комплекса John Deere 1910, позволили определить диапазоны объемной и массовой концентраций семян пшеницы в пневмопроводах, отнести поток к сильно запылённым турбулентным течениям и вычислить межфазное число Рейнольдса $Re_p \approx (5,3...5,9) \cdot 10^3$.

В указанном диапазоне Re_p режим обтекания частиц соответствует автомодельной (ньютоновской) области, что: дает возможность принять коэффициент лобового сопротивления частиц зерна C_D постоянным и равным 0,424; обосновывает использование стандартной k - ϵ модели турбулентности при CFD-моделировании газовой фазы.

Результаты регрессионного анализа показали, что при уровне значимости 95 % существенное влияние на равномерность распределения семян оказывает преимущественно высота поперечного сечения спирали h .

Равномерность распределения семян по семяпроводам повышается и составляет 11,1 %, что на 1,9 % ниже, чем у стандартного вертикального распределителя, при угле поперечного сечения спирали α в диапазоне 27...30°, высоте поперечного сечения h в пределах 4...6 мм и числе витков спирали n от 6 до 12.

Разработанная и верифицированная на экспериментальных данных сопряжённая CFD-DEM-модель может быть использована как инструмент виртуальных исследований при оптимизации геометрии и режимов работы элементов пневматических систем посевных комплексов, сокращая объём натурных экспериментов и повышая эффективность конструкторско-технологических решений по обеспечению равномерности высева.

Литература

1. Design and Optimization of Divider Head Geometry in Air-Assisted Metering Devices for Enhanced Seed Distribution Accuracy / A. H. Albasheer, Q. Liao, L. Wang, et al. // *Agronomy*. 2025. Vol. 15. No. 4. P. 769. doi:10.3390/agronomy15040769
2. Measurement of the seed spacing uniformity of a seed-metering device as a function of the positive pressure inlet structural parameters based on CFD-DEM / D. Han, T. Mo, Y. Wang, et al. // *Measurement*. 2025. doi:10.1016/j.measurement.2025.116893
3. Numerical-experimental comparison of radial fans applied in pneumatic transport of agricultural fertilizer spreaders / M. L. F. Fogal, G. B. Micheli, V. L. Scalon, et al. // *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e*

Ambiental. 2021. Vol. 25. No. 1. P. 58–64. doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v25n1p58-64.

4. Guzman L., Chen Y., Landry H. Coupled CFD-DEM Simulation of Seed Flow in an Air Seeder Distributor Tube // *Processes*. 2020. Vol. 8. No. 12. P. 1597. doi:10.3390/pr8121597.

5. Movement characteristics of mixed alfalfa and awnless brome seeds within a Venturi conveyor based on CFD-DEM / Y. Liao, X. Zhou, Y. You, et al. // *Powder Technology*. 2025. Vol. 455. P. 120735.

6. Establishment of a Discrete Element Model for Wheat Particles Based on the Ellipsoidal Method and CFD-DEM Coupling / B. Gu, C. Hu, J. Xing, et al. // *Agriculture*. 2025. Vol. 15. No. 4. P. 369. doi:10.3390/agriculture15040369.

7. Lei X., Liao Y., Liao Q. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM-CFD coupling approach for rapeseed and wheat // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016. Vol. 131. P. 29–39. doi:10.1016/j.compag.2016.11.006

8. Мухаметдинов А. М., Мударисов С. Г. Экспериментальная оценка параметров двухфазных течений в пневмосистеме посевного комплекса // *Инженерные технологии и системы*. 2025. Т. 35. № 2. С. 243–265. doi:10.15507/2658-4123.035.202502.243-265

9. Мударисов С. Г., Рахимов З. С., Гареев Р. Т. Моделирование пневматических распределительных систем зерновых сеялок методами двухфазных течений // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2018. № 4(44). С. 45–49. doi:10.18286/1816-4501-2018-4-45-49. EDN: YTSMGL

10. Moen A., Mauri L., Narasimhamurthy V. Comparison of k - ϵ models in gaseous release and dispersion simulations using the CFD code FLACS // *Process Safety and Environmental Protection*. 2019. doi:10.1016/J.PSEP.2019.08.016

11. CFD simulation of dilute-phase pneumatic conveying of powders / Z. Miao, S. Kuang, H. Zughbi, et al. // *Powder Technology*. 2019. Vol. 349. P. 0-83doi:10.1016/J.POWTEC.2019.03.031

12. Волков, К. Н. Емельянов В. Н. Течения газа с частицами // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 600 с.

13. Вараксин А. Ю. Турбулентные течения газа с твердыми частицами // М.: ООО Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2003. 185 с.

14. Мельников С. В., Алешкин В. Р., Рощин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л.: Колос, 1980. 168 с.

15. Оценка значимости и выбор параметров контактной модели при моделировании семян гороха методом дискретных элементов / С. Г. Мударисов, И. М. Фархутдинов, В. Х. Имангулов и др. // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2024. Т. 19. № 1(73). С. 54-60. doi:10.12737/2073-0462-2024-54-60.

16. Богус А. Э. Технологические и конструктивные параметры пневматической сеялки с центрально-дозировочной системой // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского*

государственного аграрного университета. 2020. № 159. С. 14-21. doi:10.21515/1990-4665-159-002.

17. Вараксин А. Ю. Влияние частиц на турбулентность несущего потока газа // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53. № 3. С. 441-466.

18. Performance evaluation of a high-speed maize seed-metering device using an improved YOLOv5s object detection and tracking algorithm / P. Zhao, X. Wu, H. Cheng, et al. // Smart Agricultural Technology. 2025. P. 100997. doi:10.1016/j.atech.2025.100997

19. Zhu J., Buchmann C. M., Schurr F. M. Improving measurements of the falling trajectory and terminal velocity of wind-dispersed seeds // Ecology and Evolution. 2022. Vol. 12. No. 8. doi:10.1002/ece3.9183

References

1. Design and Optimization of Divider Head Geometry in Air-Assisted Metering Devices for Enhanced Seed Distribution Accuracy / A. H. Albasheer, Q. Liao, L. Wang, et al. // Agronomy. 2025. Vol. 15. No. 4. P. 769. doi:10.3390/agronomy15040769

2. Measurement of the seed spacing uniformity of a seed-metering device as a function of the positive pressure inlet structural parameters based on CFD-DEM / D. Han, T. Mo, Y. Wang, et al. // Measurement. 2025. doi:10.1016/j.measurement.2025.116893

3. Numerical-experimental comparison of radial fans applied in pneumatic transport of agricultural fertilizer spreaders / M. L. F. Fogal, G. B. Micheli, V. L. Scalon, et al. // Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 2021. Vol. 25. No. 1. P. 58-64. doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v25n1p58-64

4. Guzman L., Chen Y., Landry H. Coupled CFD-DEM Simulation of Seed Flow in an Air Seeder Distributor Tube // Processes. 2020. Vol. 8. No. 12. P. 1597. doi:10.3390/pr8121597

5. Movement characteristics of mixed alfalfa and awnless brome seeds within a Venturi conveyor based on CFD-DEM / Y. Liao, X. Zhou, Y. You, et al. // Powder Technology. 2025. Vol. 455. P. 120735.

6. Establishment of a Discrete Element Model for Wheat Particles Based on the Ellipsoidal Method and CFD-DEM Coupling / B. Gu, C. Hu, J. Xing, et al. // Agriculture. 2025. Vol. 15. No. 4. P. 369. doi:10.3390/agriculture15040369

7. Lei X., Liao Y., Liao Q. Simulation of seed motion in a seed feeding device with a DEM-CFD coupling approach for rapeseed and wheat // Computers and Electronics in Agriculture. 2016. Vol. 131. P. 29-39. doi:10.1016/j.compag.2016.11.006

8. Mukhametdinov A. M., Mudarisov S. G. Experimental evaluation of two-phase flow parameters in the

pneumatic system of a seeding complex // Engineering Technologies and Systems. 2025. Vol. 35. No. 2. P. 243-265. doi:10.15507/2658-4123.035.202502.243-265.

9. Mudarisov S. G., Rakhimov Z. S., Gareev R. T. Modeling of pneumatic distribution systems of grain seeders using two-phase flow methods // Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2018. No. 4(44). P. 45-49. doi:10.18286/1816-4501-2018-4-45-49. EDN: YTSMGL

10. Moen A., Mauri L., Narasimhamurthy V. Comparison of k-ε models in gaseous release and dispersion simulations using the CFD code FLACS // Process Safety and Environmental Protection. 2019. doi:10.1016/J.PSEP.2019.08.016.

11. CFD simulation of dilute-phase pneumatic conveying of powders / Z. Miao, S. Kuang, H. Zughbi, et al. // Powder Technology. 2019. doi: 10.1016/J.POWTEC.2019.03.031.

12. Volkov, K. N., Emelianov, V. N. Gas flows with particles // Moscow: FIZMATLIT, 2008. 600 p.

13. Varaksin, A. Yu. Turbulent flows of gas with solid particles // Moscow: OOO Publishing enterprise "Physical and Mathematical Literature", 2003. 185 p.

14. Melnikov, S. V., Aleshkin, V. R., Roshchin, P. M. Experimental planning in studies of agricultural processes // Leningrad: Kolos, 1980. 168 p.

15. Evaluation of the significance and selection of parameters of the contact model in modeling pea seeds using the discrete element method / S. G. Mudarisov, I. M. Farkhutdinov, V. Kh. Imangulov, et al. // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2024. Vol. 19. No. 1(73). P. 54-60. doi:10.12737/2073-0462-2024-54-60.

16. Bogus A. E. Technological and design parameters of a pneumatic seeder with a central metering system // Polythematic online electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. 2020. No. 159. P. 14-21. doi:10.21515/1990-4665-159-002.

17. Varaksin, A. Yu., The influence of particles on the turbulence of a carrier gas flow // High Temperature Thermophysics, 2015, Vol. 53, No. 3, P. 441-466.

18. Performance Evaluation of a High-Speed Maize Seed-Metering Device Using an Improved YOLOv5s Object Detection and Tracking Algorithm / P. Zhao, X. Wu, H. Cheng, et al. // Smart Agricultural Technology. 2025. P. 100997. doi:10.1016/j.atech.2025.100997

19. Zhu J., Buchmann C. M., Schurr F. M. Improving measurements of the falling trajectory and terminal velocity of wind-dispersed seeds // Ecology and Evolution. 2022. Vol. 12. No. 8. doi:10.1002/ece3.9183