

## Цифровой двойник системы очистки и транспортировки зерна селекционного комбайна

М.Е. Чаплыгин<sup>1</sup>, А.В. Бутовченко<sup>2</sup>, К.А. Степанов<sup>1</sup>, С.В. Белоусов<sup>3,4</sup>, А.С. Овчаренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральний научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия;

<sup>2</sup> Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону, Россия;

<sup>3</sup> Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия;

<sup>4</sup> Аграрный научный центр «Донской», Зерноград, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** В статье рассмотрен процесс моделирования движения зерна и зерносоломистых примесей, увлекаемых потоком воздуха, в системе транспортировки и очистки зерна селекционного комбайна, что необходимо для повышения качества очистки зерна и оптимизации разработки и настройки подобных систем очистки.

**Цель исследования** — создание цифрового двойника системы транспортировки и очистки с возможностью симуляции движения частиц в воздушном потоке.

**Методы.** В качестве объекта исследования была принята цифровая модель системы транспортировки и очистки зерна. Моделирование процесса и исследование движения частиц в воздушном потоке с использованием метода дискретных элементов проводилось в Донском инженеринговом центре. Параметры частиц выбирались исходя из замеров реальных примесей в зерновом ворохе пшеницы сорта «Анфиса».

**Результаты.** Уточнен состав зернового вороха, определены геометрические размеры и массы основных типовых частиц – зерновок, половы, остей и др., созданы их цифровые модели. Создана цифровая модель системы транспортировки и очистки зерна селекционного комбайна, с помощью которой проведено исследование движения частиц в воздушном потоке, в частности — их траекторий, скоростей движения. Был смоделирован маршрут движения зернового вороха от момента попадания с решет в зернозаборник до момента прохождения циклонного фильтра системы очистки. Проведены замеры основных параметров воздушного потока на физическом образце пневматической системы транспортировки и очистки зерна, установленной на селекционном комбайне.

**Заключение.** Для повышения качества очистки зерна в селекционном зерноуборочном комбайне и оптимизации разработки и настройки подобных систем очистки рассмотрена возможность проведения исследования в цифровой среде для конструкции, нуждающейся в оптимизации множества параметров, на примере созданного цифрового двойника системы транспортировки и очистки зерна с возможностью симуляции движения частиц в воздушном потоке.

**Ключевые слова:** селекционное зерно; системы очистки зерна; циклонный фильтр, селекционный комбайн.

### КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Чаплыгин М.Е., Бутовченко А.В., Степанов К.А., Белоусов С.В., Овчаренко А.С. Цифровой двойник системы очистки и транспортировки зерна селекционного комбайна // Тракторы и сельхозмашины. 2025. Т. 92, № 6. С. x–y. DOI: 10.17816/0321-4443-677065 EDN: FZENRU

## The Digital Twin of the Grain Cleaning and Transportation System of a Breeding Combine Harvester

Mikhail E. Chaplygin<sup>1</sup>, Andrey V. Butovchenko<sup>2</sup>, Kirill A. Stepanov<sup>1</sup>, Sergey V. Belousov<sup>3,4</sup>, Aleksander S. Ovcharenko<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia;

<sup>2</sup> Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia;

<sup>3</sup> Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia;

<sup>4</sup> Agricultural Research Center "Donskoy", Zernograd, Russia

### ABSTRACT

**BACKGROUND:** The paper discusses the process of modeling the motion of grain and foreign impurities carried by the air flow in the grain transportation and cleaning system of a breeding combine harvester, which is necessary to improve the quality of grain cleaning and to optimize the development and adjustment of such cleaning systems.

**AIM:** Building a digital twin of the transportation and cleaning system with the ability to simulate the motion of particles in the air flow.

**METHODS:** A digital model of the grain transportation and cleaning system was used as the object of study. The study of particle motion in the air flow was carried out in a digital environment using the finite element method. The particle parameters were selected based on measurements of real impurities in the grain heap of the Anfisa wheat variety.

**RESULTS:** The composition of the grain heap was clarified, the geometric dimensions and masses of typical particles - grains, chaff, awns, etc. - were measured, their digital models were created. A digital model of the grain transportation and cleaning system of a breeding combine harvester was created, with the help of which a study of the motion of particles in the air flow was carried out, in particular - their paths, motion velocities. The grain heap motion route was modeled from the time it enters the grain intake from the sieves by the time it passes the cyclone filter of the cleaning system. Some air flow parameters were measured on a physical sample of the pneumatic grain transportation and cleaning system installed on a breeding combine harvester.

**CONCLUSION:** To improve the quality of grain cleaning in a selective combine harvester and optimize the development and configuration of such cleaning systems, the possibility of conducting research in a digital environment for a design requiring optimization of many parameters is considered, using the example of a digital twin of a grain transportation and cleaning system with the ability to simulate particle motion in an air stream.

**Keywords:** breeding grain; grain cleaning systems; cyclone filter; breeding combine harvester.

### TO CITE THIS ARTICLE:

Chaplygin ME, Butovchenko AV, Stepanov KA, Belousov SV, Ovcharenko AS. The Digital Twin of the Grain Cleaning and Transportation System of a Breeding Combine Harvester. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2025;92(6):x-y. DOI: [10.17816/0321-4443-677065](https://doi.org/10.17816/0321-4443-677065) EDN: FZEHRU

**ОБОСНОВАНИЕ**

В соответствии с Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации уровень самообеспечения по семенам основных сельскохозяйственных культур отечественной селекции должен составлять не менее 75%. По последним данным Министерства сельского хозяйства Российской Федерации обеспеченность отечественными семенами по яровым, зерновым и зернобобовым культурам составляет 70,14%. С учётом сложной геополитической обстановки, санкционного давления и международной изоляции со стороны в том числе крупнейших международных поставщиков семенного материала, проблема производства семян отечественной селекции для обеспечения продовольственной безопасности является как никогда актуальной, а создание современной высокотехнологичной селекционной и семеноводческой техники отечественного производства, которая отвечает специфическим задачам производителей семенного материала и современным требованиям, обладая высокими показателями экономической эффективности, экологичности, охраны труда является актуальной задачей. При совершенствовании существующей техники, а также при создании новой необходима проработка значительного количества идей и вариантов с целью выявления наиболее перспективных, однако для получения информации о протекании технологических процессов внутри систем необходимо изготовление опытных образцов, существенно увеличивает стоимость и сроки проектирования и тестирования гипотез. Цифровые двойники отдельных элементов систем, позволяют проводить моделирование технологических процессов протекающих при использовании рабочих органах сельскохозяйственных машин, при этом варьировать физико-механическими свойствами обрабатываемых сельскохозяйственных культур.

В современном селекционном и семеноводческом производствах ключевым параметром является технологическая обеспеченность работ, а также высокий уровень используемой техники. По оценкам экспертов, уровень обеспеченности ведущих специализированных центров селекционной техникой для подготовки делянок, посева и ухода за посевами не превышает 33%, для уборки семян — 28%, для послеуборочной доработки семян — 25%, а уровень её износа превышает 70%. Стоит также учитывать тот факт, что селекционно-семеноводческая техника является узкоспециализированной, и в большинстве случаев создаётся для решения определённых задач в сфере механизации и автоматизации селекционных работ [1]. Дефицит данной техники, её сильный износ, приводят к сохранению высокой доли ручного труда в отрасли, снижению скорости выполнения работ, несоблюдению сроков работ, нарушению агротехнических требований, повышенным потерям дорогостоящего семенного материала, высоким материальным затратам на производство. Таким образом, низкий уровень технического обеспечения является одним из сдерживающих факторов развития отечественной селекции и расширенного воспроизводства отечественного посевного материала [2]. Согласно распоряжению Правительства РФ от 23 ноября 2023 г. № 3309-р, цифровые технологии должны внедряться на всех этапах производственного цикла, включая разработку самоходной техники и совершенствовании подходов к разработке и использованию цифровых продуктов.

К селекционным и семеноводческим комбайнам предъявляются специфические требования, касающиеся очистки убираемого зерна: так, число сорных примесей не должно превышать 0,3% от массы зерна, при этом повреждение или дробление ценных дорогостоящих семян также не должно превышать 0,3%. Для повышения эффективности уборочных работ и снижения потерь зерна целесообразно применять дополнительные системы очистки и транспортировки [3-4]. Проектирование, отладка и калибровка таких систем является непростой инженерной задачей, требующей к тому же существенных временных и материальных затрат. С целью оптимизации процесса разработки, в соответствии с современными веяниями, проектирование проводится в среде CAD

программных комплексах, первичная отладка и оптимизация конструкции — в программных комплексах для моделирования физических процессов, к которым относятся системы позволяющие моделировать движение отдельных частиц. Итогом такого моделирования является цифровая модель, которая с определённой долей вероятности позволяет получать характеристики технологического процесса на стадии проектирования, выявлять достоинства и недостатки проектируемой машины.

В данной работе приводится последовательность создания цифровой модели системы пневмотранспортирования семенного зернового вороха по трубопроводу к циклону.

Проблемами пневмотранспортирования, в том числе компонентов зернового вороха, как в горизонтальных так и вертикальных участках труб, а также описанию данных процессов с помощью цифровых моделей посвящено значительное количество работ [15, 16, 19, 23, 24, 29] позволяющих получить представление о существующем уровне моделирования данного процесса. По окончании процесса транспортирования происходит осаждение частиц в циклоне с разделением частиц [12, 18, 25]. Для моделирования процесса движения частиц под действием сил движущегося воздушного потока необходимо определять поля скоростей и давлений в каждой точке объёма, а также кинематические параметры движение всех дискретных частиц и их взаимодействие [13, 14, 19, 21]. При этом необходимо учитывать свойства транспортируемого материала [17, 20, 22, 26, 27, 28, 38].

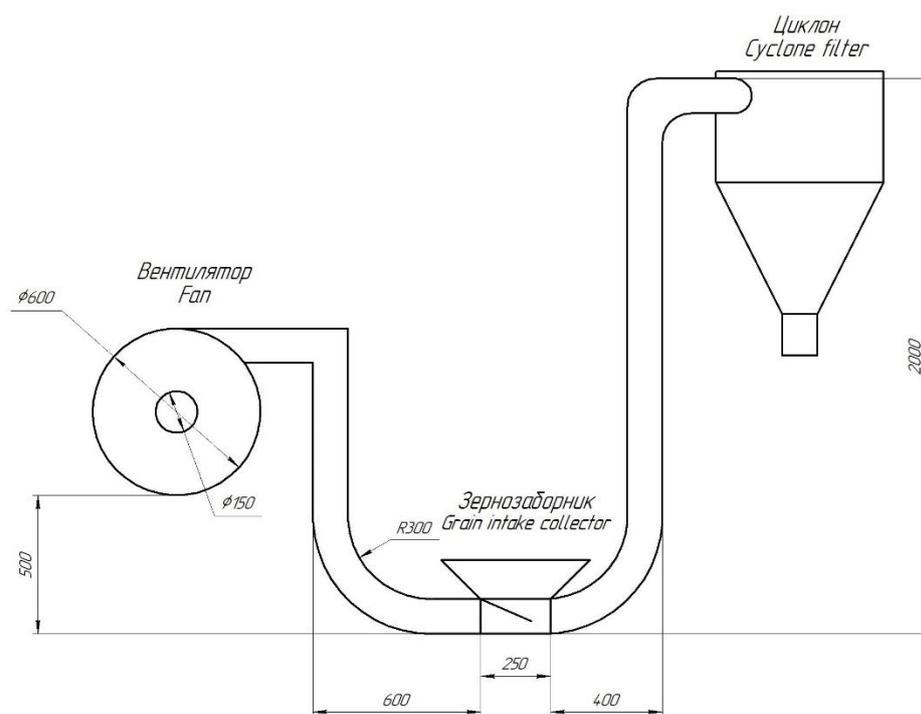
**Цель** — создание цифрового двойника системы транспортировки и очистки с возможностью симуляции движения частиц в воздушном потоке.

### **Задачи работы:**

- построение и оптимизация цифровой геометрической модели для возможного использования в имитационном моделировании протекающих в системе процессов;
- исследование состава зернового вороха и его характеристик;
- создание цифровых моделей транспортируемых частиц, имеющих схожие характеристики с реальными частицами зернового вороха;
- проведение имитационного моделирования движения частиц в воздушном потоке с использованием метода дискретно-элементного моделирования.

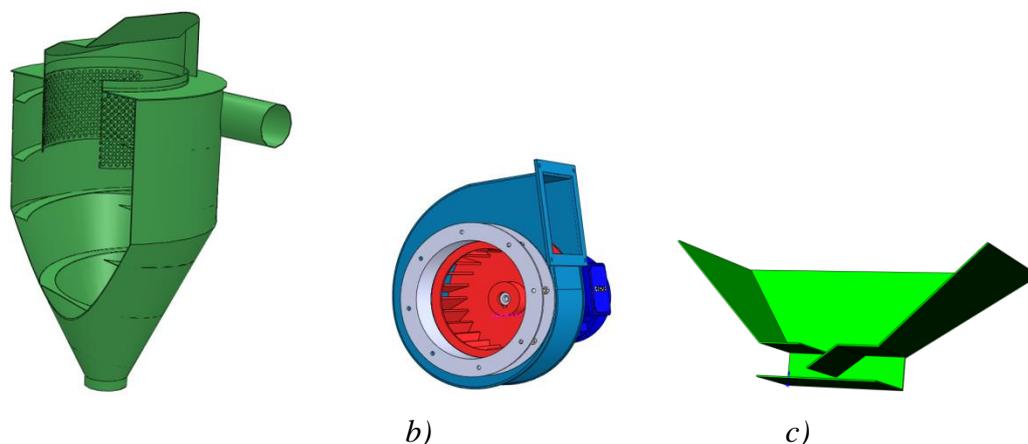
## **МЕТОДЫ**

В основе данного исследования лежит метод дискретных элементов, разработанный Cundall и Strack в 1979 [31]. Моделирование процесса и исследование движения частиц в воздушном потоке проводилось в Донском инженеринговом центре с использованием метода дискретных элементов. В начале исследования была составлена расчётная схема взаимного расположения основных элементов системы транспортировки и циклонной очистки зерна геометрические параметры которой соответствовали проектируемой системе для селекционного комбайна [5-7] (рис. 1.)



**Рис. 1.** Компоновочная схема системы очистки и транспортировки зерна.  
**Fig. 1.** Layout diagram of the grain cleaning and transportation system.

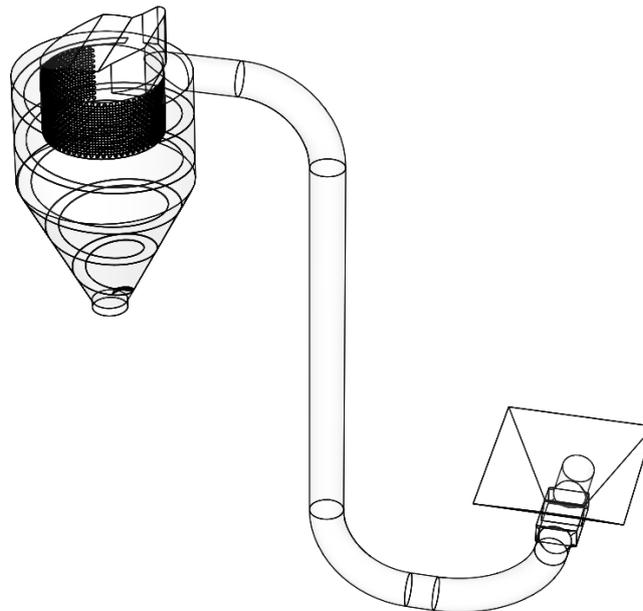
Используя основные геометрические характеристики элементов и компоновочной схемы, были спроектированы 3D модели основных узлов системы очистки и транспортировки зерна — циклон, центробежный вентилятор, диффузор зернозаборника, трубопроводы и т.д., часть данных узлов представлены на рис. 2.



**Рис. 2.** Основные узлы системы транспортировки и очистки: *a* — циклон; *b* — центробежный вентилятор; *c* — диффузор зернозаборника.

**Fig. 2.** Main units of the transportation and cleaning system: *a*, cyclone; *b*, centrifugal fan; *c*, grain intake collector.

Для оптимизации конструкции и проведения дискретно-элементного моделирования процесса транспортирования была получена модель внутреннего пространства системы транспортировки и очистки зерна, заполненного воздухом [8], которая фактически является составляющей цифрового двойника. Общий вид модели представлен на рис. 3.



**Рис. 3.** Модель внутреннего пространства системы транспортировки и очистки зерна.  
**Fig. 3.** Model of the internal space of the grain transportation and cleaning system.

Для проведения моделирования необходимо определение характеристик воздушного потока в каждом дискретном объёме системы и задание характеристик транспортируемых им частиц. Для этого был проведён анализ физических параметров зерна и примесей, поступающих в систему транспортировки и отчистки. В качестве примесей в зерновом ворохе присутствовали полова, ости, частицы соломин, мелкие обломки зерна, а также пыль с размером частиц около 50 мкм. Для определения средних размерных характеристик зерновок и примесей использовалось по 10 образцов зерновок сорта «Анфиса» и каждой из групп засорителей зернового вороха. Замеры масс частиц производились на аналитических весах OHAUSEX224/AD, процесс взвешивания представлен на рис. 4



*a)*



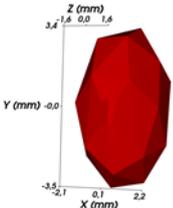
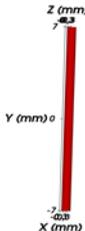
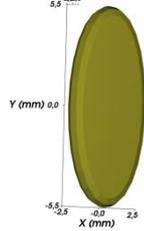
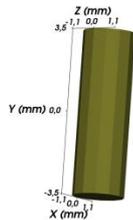
*b)*

**Рис. 4.** Взвешивание на аналитических весах зерна и сорных примесей: *a* — зерновка; *b* — ости.

**Fig. 4.** Weighing of grain and weed impurities using analytical scales: *a*, grain, *b*, awns.

Геометрические параметры измерены при помощи электронного штангенциркуля с точностью измерений до 0,01 мм. Средние значения параметров частиц и их моделей приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Параметры частиц и их моделей  
**Table 1.** Parameters of particles and their models

Описание примеси	Изображение	Описание модели	Изображение модели
Зерновка Ср. размеры 7,5×Ø3.3 Ср. масса 50 мг		Зерновой материал, форма — полигедрон, количество граней — 25, насыпной плотностью 720кг/м <sup>3</sup> , удельной плотностью — 1200 кг/м <sup>3</sup>	<p>Grain</p> 
Ост Ср. размеры 14×Ø0.6 Ср. масса 1,2 мг		Ост, форма — цилиндр, количество граней — 24, насыпной плотностью 120 кг/м <sup>3</sup> , удельной плотностью — 200 кг/м <sup>3</sup>	<p>Ost</p> 
Полова Ср. размеры 11×R2.5×5 Ср. масса 0,7мг		Примеси — полова, форма – сферополигон, количество граней – 25, насыпной плотностью 120 кг/м <sup>3</sup> , удельной плотностью – 200 кг/м <sup>3</sup>	<p>Polova</p> 
Солома (обрезок) Ср. размеры 7×Ø2,2 Ср. масса 5мг		Примеси — частицы соломы, форма – цилиндр, количество граней — 24, насыпной плотностью 120 кг/м <sup>3</sup> , удельной плотностью — 200 кг/м <sup>3</sup>	<p>Soloma_cut</p> 

Полученные данные использовались как исходные данные в дальнейшем моделировании в среде Ansys с дополнительными надстройками. Задана область генерации частиц в зернозаборнике, их масса и размеры, скорость воздушного потока.

При моделировании цифровой системы транспортировки и очистки зерна, и моделирование процесса пневмотранспортирования зерновой массы с её последующим осаждением в циклоне использовалась односторонняя постановка задачи, когда полученные характеристики воздушного потока передаются для последующего моделирования перемещения частиц, при этом не учитывается изменение воздушного потока за счёт наличия в воздушной среде частиц. При этом следует отметить, что

односторонняя постановка задачи требуеткратно меньше вычислительных мощностей и адекватно позволяет моделировать движение частиц с их малой плотностью относительно занимаемого ими объёма, как следствие не существенно изменяющимися параметры воздушного потока.

При столкновении частиц со стенками системы и между собой учитывались силы гравитации, силы трения, нормальные и тангенциальные силы [33-37]. Нормальные силы, описанные законом Walton O. R. и Braun R. L. [32] упругой гистерезисной моделью, нормальная составляющая которой к плоскости контакта равна:

$$F_n^t = \begin{cases} \min(K_{nl}s_n^t, F_n^{t-\Delta t} + K_{nu}\Delta s_n), \Delta s_n \geq 0, \\ \max(F_n^{t-\Delta t} + K_{nu}\Delta s_n, \lambda K_{nl}s_n^t), \Delta s_n < 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$\Delta s_n = s_n^t - s_n^{t-\Delta t},$$

где  $K_{nl}$  и  $K_{nu}$  — значение нагрузочной и разгрузочной контактных жёсткости;

$F_n^t$  и  $F_n^{t-\Delta t}$  — нормальные упругопластические контактные силы в текущий момент времени  $t - \Delta t$ ;  $\Delta t$  — шаг моделирования;  $\Delta s_n$  — изменение нормального перекрытия контактов частиц в течение текущего времени (положительное, когда частицы приближаются друг к другу, и отрицательное, когда отдаляются);  $s_n^t$  и  $s_n^{t-\Delta t}$  — значение нормального перекрытия в текущий и предыдущий момент времени;  $\lambda$  — константа,  $\lambda = 0,001$ .

Упругофрикционная тангенциальная составляющая вычисляется по предельной упругой модели Кулона (Linear spring Coulomb limit model):

$$F_{\tau,e}^t = F_{\tau}^{t-\Delta t} - K_{\tau}\Delta s_{\tau}; \quad (2)$$

$$F_{\tau}^t = \min\left(\left|F_{\tau,b}^t\right|, \mu F_n^t\right) \frac{F_{\tau,b}^t}{\left|F_{\tau,b}^t\right|}, \quad (3)$$

где  $F_n^{t-\Delta t}$  — значение тангенциальной силы в предыдущий момент времени;  $\Delta s_{\tau}$  — тангенциальное относительное смещение частиц в течение временного интервала;  $K_{\tau}$  — тангенциальная жёсткость,  $\mu$  — коэффициент трения.

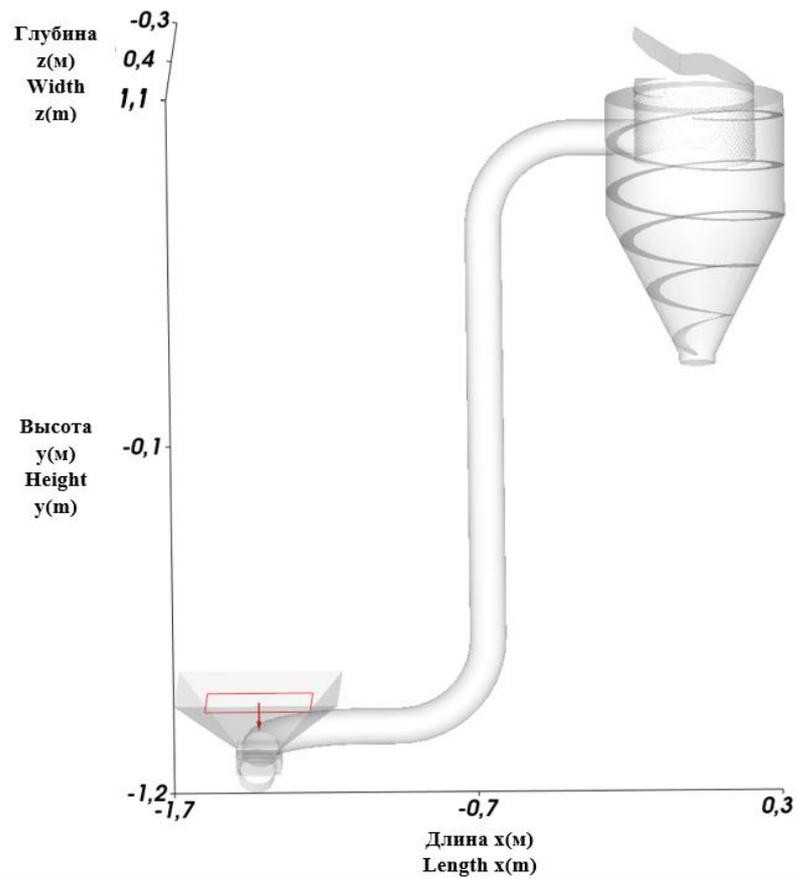
Исходная геометрия пневмотранспортирующей системы представлена на рис. 5.

Состав зернового вороха и его характеристики задавались с параметрами идентичными натуральным, представленным в табл. 1.

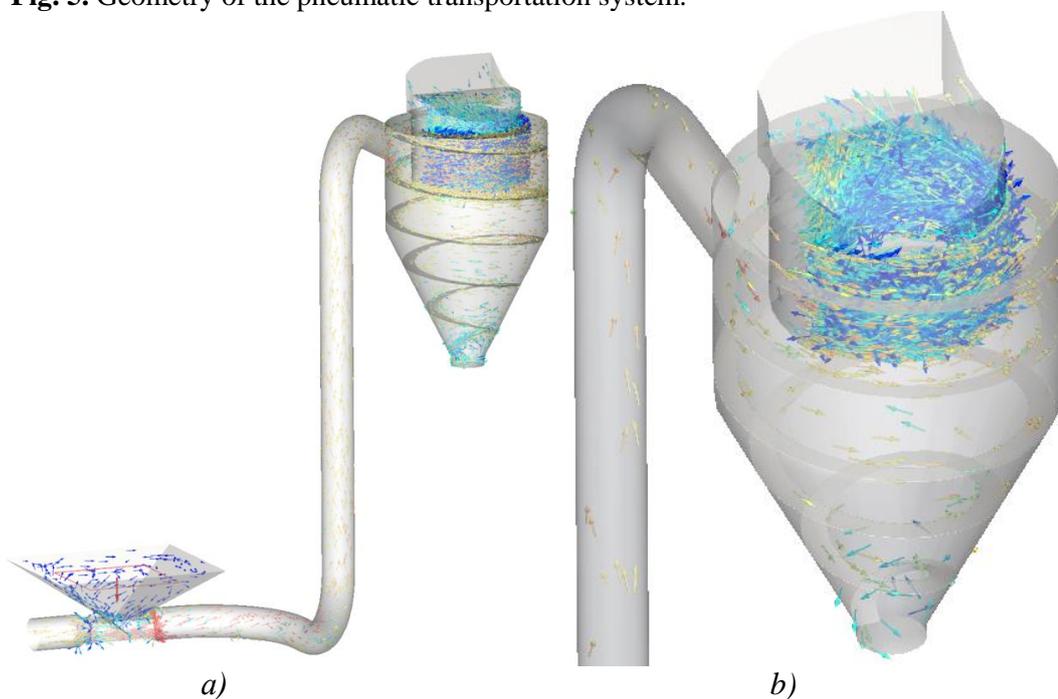
При моделировании воздушных потоков скорость на входе в транспортирующе-сепарирующую систему составляла 30 м/с [9]. Визуализация скоростей и направлений воздушного потока представлены на рис. 6.

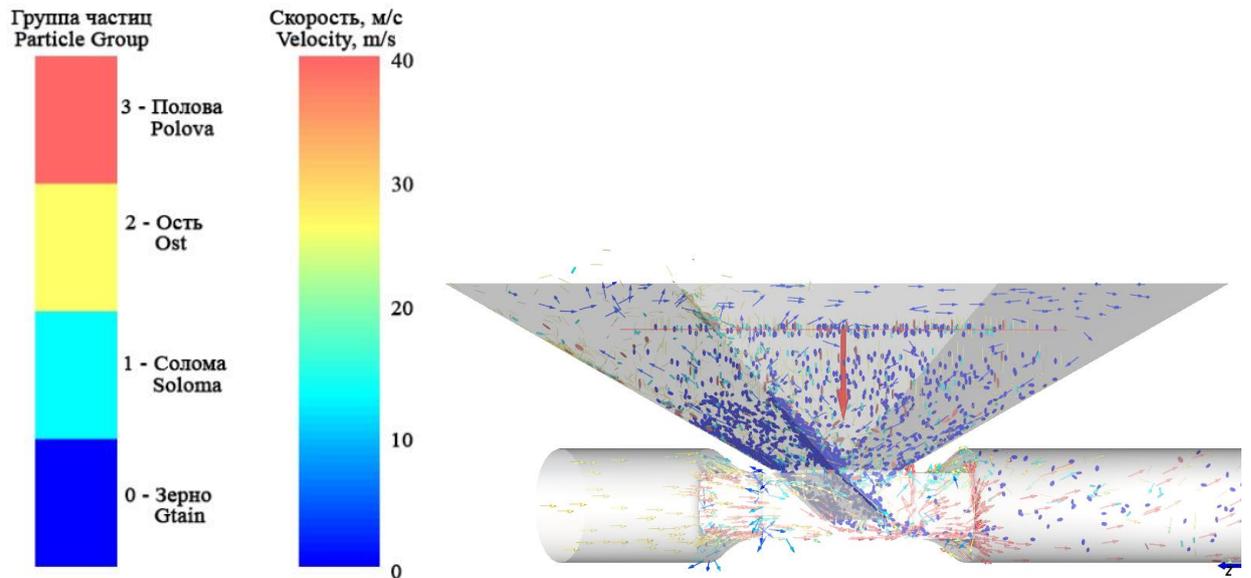
Генерация частиц производилась согласно указанным выше параметрам в прямоугольной области над зернозаборником, обозначенной красным прямоугольником на рис. 7.

Для определения корректности геометрических параметров модели и определения возможности группы частиц преодолеть расстояние от места генерации до конечной точки по заданной траектории было проведено моделирование процесса движения примитивных частиц в воздушном потоке. Траектории движения частиц представлены на рис. 8.



**Рис. 5.** Геометрия системы пневмотранспортировки.  
**Fig. 5.** Geometry of the pneumatic transportation system.

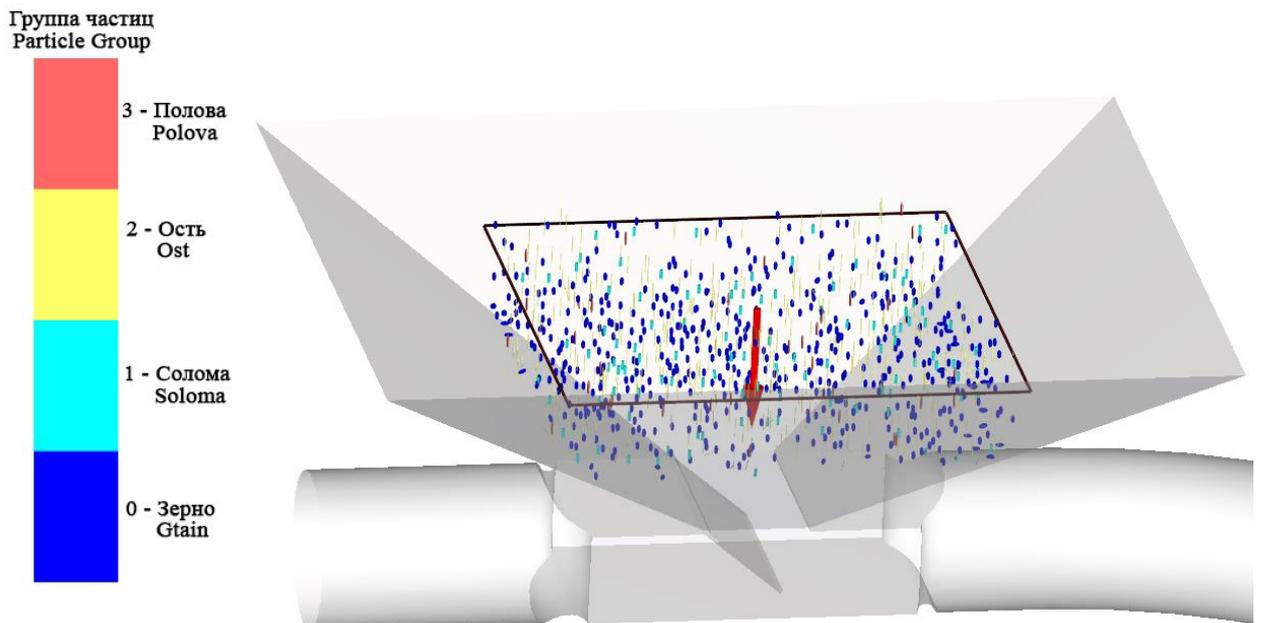




c)

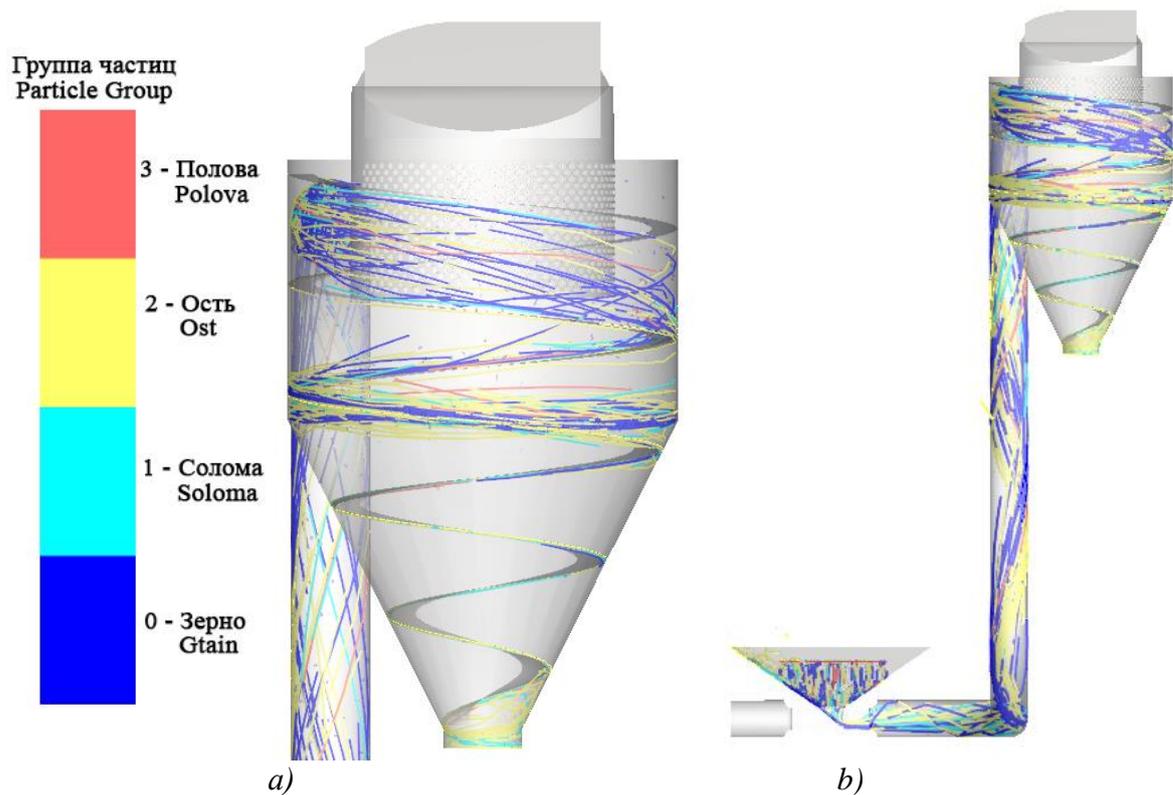
**Рис. 6.** Визуализация скоростей и направлений воздушного потока: *a* — общий вид; *b* — в циклоне; *c* — в зернозаборнике,

**Fig. 6.** Visualization of velocities and directions of air flow: *a*, general view; *b*, in the cyclone; *c*, in the grain intake collector.



**Рис. 7.** Область генерации частиц зернового вороха.

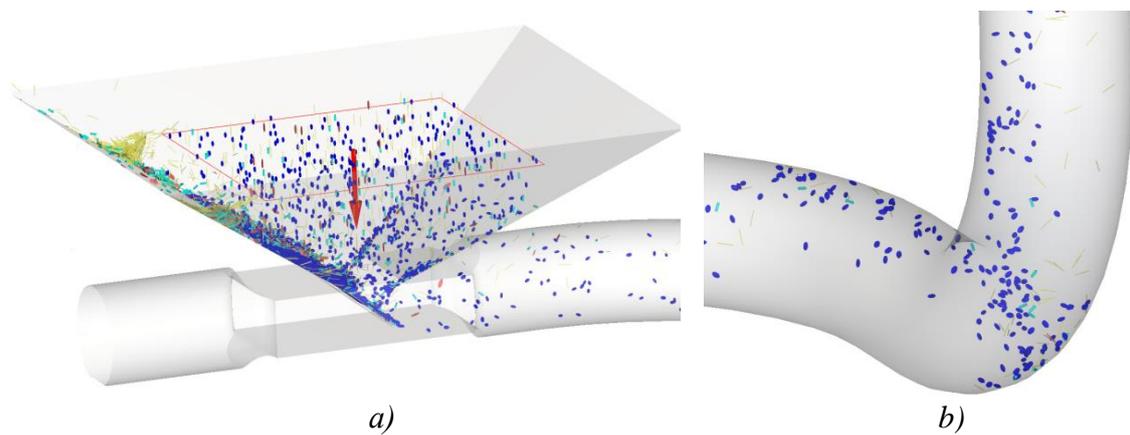
**Fig. 7.** Area of grain pile particle generation.

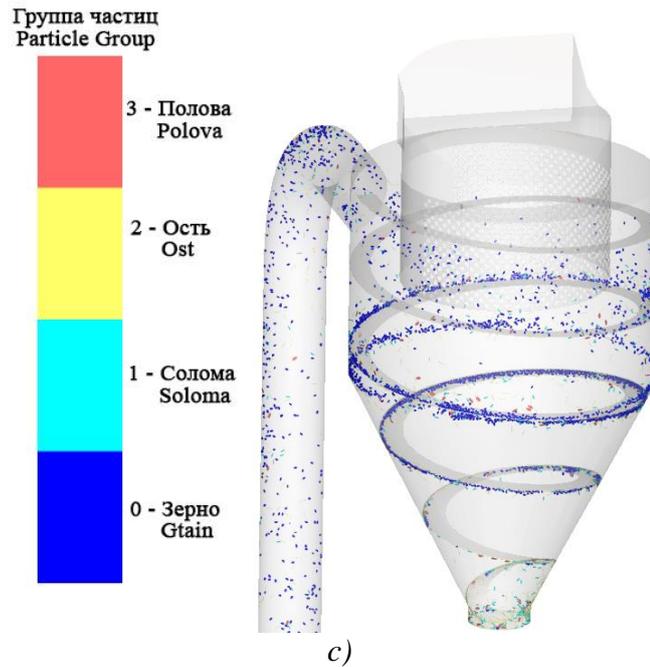


**Рис. 8.** Визуализация траекторий движения частиц в воздушном потоке: *a* — в циклоне; *b* — общий вид.

**Fig. 8.** Visualization of particle paths in an air flow: *a*, in a cyclone; *b*, general view.

Симуляция движения зернового вороха по системе транспортировки и очистки зерна представлена на рис. 9.

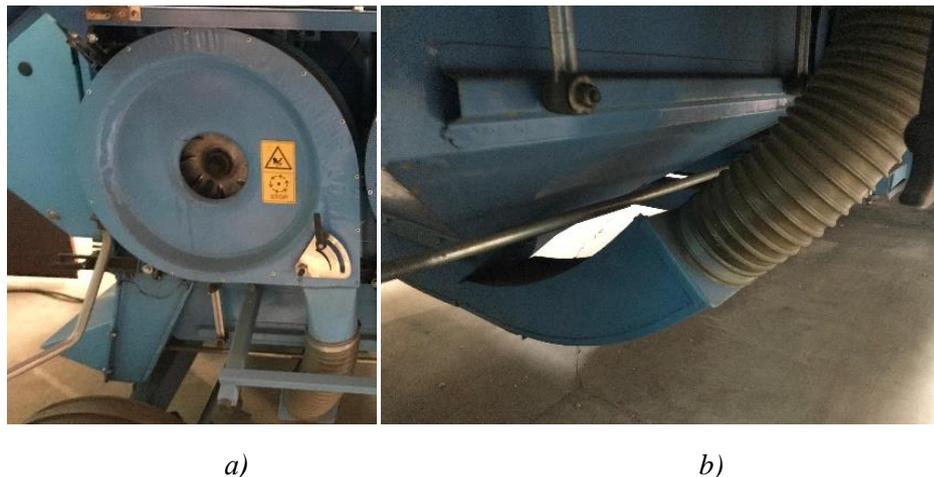




**Рис. 9.** Визуализация движения частиц зернового вороха в системе транспортировки и очистки: *a* — в зернозаборнике; *b* — в изгибе трубопровода; *c* — в циклоне.  
**Fig. 9.** Visualization of grain pile particle motion in the transportation and cleaning system: *a*, in the grain intake collector; *b*, in the pipeline bend; *c*, in the cyclone.

Экспериментальное исследование параметров воздушного потока в системе пневматической транспортировки и очистки зерна селекционного комбайна

Проведены замеры параметров скорости и расхода воздушного потока в системе пневматической транспортировки и очистки зерна селекционного комбайна с электроприводом рабочих органов. На рис. 10 представлена система транспортировки и очистки зерна селекционного комбайна.

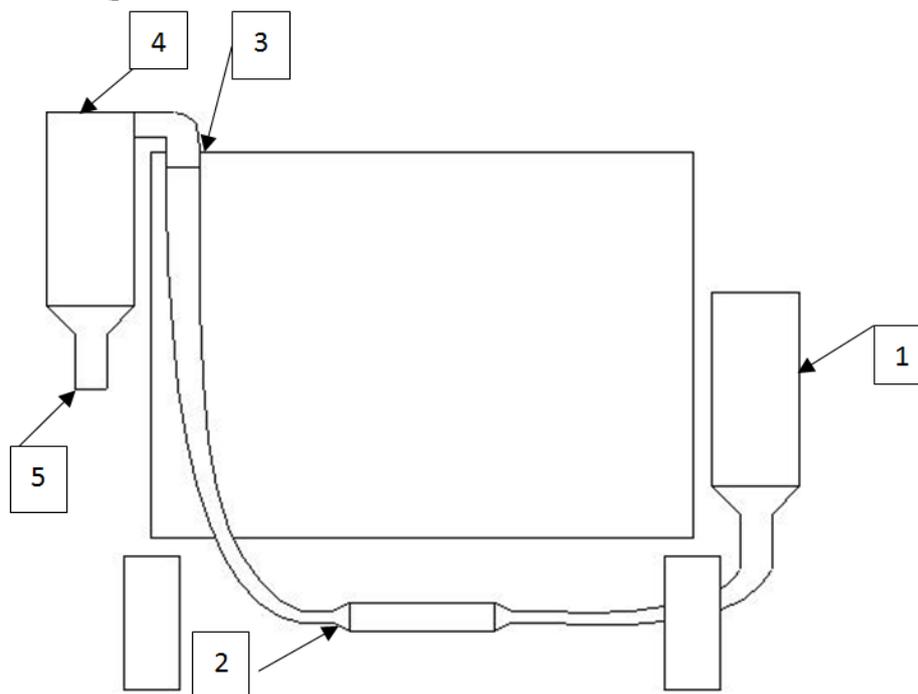


**Рис. 10.** Селекционный комбайн с электроприводом рабочих органов: *a* — центробежный вентилятор; *b* — зернозаборник.

**Fig. 10.** Breeding combine harvester with electric drive of working bodies: *a*, centrifugal fan; *b*, grain intake collector.

Программа и методика испытаний подготовлена в соответствии с ГОСТ 12.3.018-79 «Система стандартов безопасности труда. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний». Отбор проб параметров проводился в пяти мерных

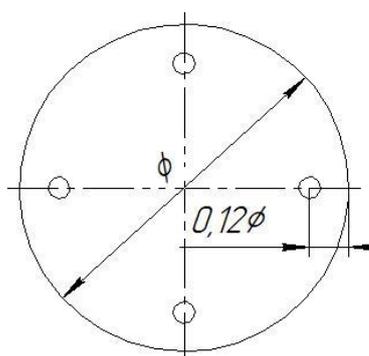
сечениях: вход вентилятора, выход из диффузора, вход в циклон, 1-й выход из циклона, 2-й выход из циклона (рис. 11).



**Рис. 11.** Схема системы транспортировки и очистки зерна комбайна, мерные сечения отбора проб: 1 — вентилятор (вход); 2 — выход после зернозаборника; 3 — вход в циклон; 4 — верхний выход из циклона; 5 — нижний выход из циклона.

**Fig. 11.** Layout of the system of the grain transportation and cleaning system of a combine harvester, measured sections of sampling: 1, fan (inlet); 2, outlet after grain intake collector; 3, entrance to cyclone; 4, upper outlet from cyclone; 5, lower outlet from cyclone.

Сечения имеют цилиндрическую форму, диаметром  $D$  до 300 мм. В сечении 1-3 и 5 диаметр сечения составлял 120 мм, в сечении 4 — 300 мм. Координаты точек измерения скоростей определялись, как  $0,12D$  с погрешностью отклонений не более  $\pm 10\%$  от величины координаты (рис. 12).



**Рис. 12.** Координаты измерения скоростей в воздуховодах цилиндрического сечения при  $D \leq 300$  мм.

**Fig. 12.** Coordinates of velocity measurement in cylindrical ducts at  $D \leq 300$  mm.

На каждой точке проведено по 6 измерений. Измерения проведены цифровым анемометром Testo405-v1 с диапазоном измерения скорости воздушного потока  $0 \dots 10$  м/с (рис. 13). Результаты измерений по сечениям представлены в табл. 2.



**Рис. 13.** Измерение частоты вращения вала вентилятора и скорости воздушного потока.  
**Fig. 13.** Measuring fan shaft velocity and airflow rate.

Измерения частоты вращения вала проводились цифровым контактным тахометром DT 6236В. Однако, из-за ограниченного диапазона измерений анемометра Testo405-v1 проведение замеров оказалось возможным только при оборотах вращения вала вентилятора  $1300 \text{ мин}^{-1}$ , при дальнейшем повышении оборотов скорость воздушного потока существенно превышала  $10 \text{ м/с}$ .

Характер изменения скорости в одной точке, а также средних значений относительно разных сечений позволяет сделать вывод о степени равномерности движения потока воздуха в системе селекционного комбайна с электроприводом [10].

Равномерность скорости потока воздуха оценивалась коэффициентом вариации интервалов между соседними колосьями, определяемый по формуле:

(4)

где  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}, \text{ м/с} \quad (5)$$

где  $x_i$  — текущее значение измерения скорости потока воздуха, м/с;

К расчёту коэффициента вариации принимаются значения измерения скорости  $x_i$ , определяемые по правилу трёх сигм:

г (6)

Е Согласно формуле 4 и данных таблицы все значения могут быть использованы при расчётах.

Поток воздуха можно считать равномерным, если коэффициент равномерности не превышает 33%.

q

u

a

t

i

o

n

ТЕОРИЯ, КОНСТРУИРОВАНИЕ, ИСПЫТАНИЯ

**Таблица 2.** Скорости потока воздуха  $v_{пв}$ , м/с в точках сечений и средние значения по сечению при частоте вращения вала вентилятора  $n_b=1300$  об/мин  
**Table 2.** Air flow velocity  $v_{pv}$ , m/s at the cross-section points and average cross-section values at fan shaft velocity  $v_{pv}=1300$  rpm

№ точки № сечения	т.1	т.2	т.3	т.4	ср. з.
1	6,62/6,7/6,52/6,5/6,9/6,3 2 (ср. з. <b>6,59</b> )	6,05/6,1/5,89/5,24/5,91/6, 22 (ср. з. <b>5,9</b> )	5,2/5,34/5,37/5,76/5,08/4,98 (ср. з. <b>5,28</b> )	5,03/5,16/5,25/5,19/5,03/5,06 (ср. з. <b>5,12</b> )	5,72
2	7,2/7,33/7,32/7,1/7,15/7, 04 (ср. з. <b>7,19</b> )	9,66/9,47/9,5/9,44/9,57/9, 38 (ср. з. <b>9,5</b> )	6,66/6,13/6,08/5,96/5,86/6,03 (ср. з. <b>5,14</b> )	9,75/9,84/9,69/9,6/9,77/9,68 (ср. з. <b>9,72</b> )	7,88
3	7,61/6,74/7,05/7,35/6,74 /7,62 (ср. з. <b>7,18</b> )	8,84/8,68/8,63/8,55/8,62/ 8,43 (ср. з. <b>8,62</b> )	7,06/7,75/7,32/7,43/7,08/7,55 (ср. з. <b>7,36</b> )	7,07/6,79/6,23/7,09/7,11/6,98 (ср. з. <b>6,87</b> )	7,5
4	1,11/1,14/1,27/1,33/1,26 /1,38 (ср. з. <b>1,24</b> )	0,4/0,37/0,28/0,31/0,32/0, 31 (ср. з. <b>0,33</b> )	0,7/0,75/0,62/0,55/0,57/0,65 (ср. з. <b>0,64</b> )	0,44/0,39/0,38/0,4/0,35/0,34 (ср. з. <b>0,38</b> )	0,64
5	1,24/1,01/1,07/0,99/0,95 /0,97 (ср. з. <b>1,03</b> )	0,98/1,07/1,24/1,39/1,41/ 1,38 (ср. з. <b>1,24</b> )	3,76/3,84/3,76/3,87/3,9/3,89 (ср. з. <b>3,83</b> )	3,31/3,24/3,99/3,78/3,5/3,96 (ср. з. <b>3,62</b> )	2,43

## THEORY, DESIGN, TESTING

В соответствии формулами (4), (5) и данными таблицы 2 установлено, что коэффициент вариации в сечении 1 составляет 11%, в сечении 2 — 27%, в сечении 3 — 10%, в сечении 4 — 57%, в сечении 5 — 56%. Значения коэффициента равномерности в сечениях 4 и 5 говорит о неравномерности потоков, тем не менее, не влияющих на качество работы системы транспортировки и очистки зерна.

Расход воздуха определяли по формуле:

$$L = F * \overline{v_{ns}} * 3600, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (6)$$

где  $F, \text{ м}^2$  — площадь поперечного сечения.

Для круга  $F = 0.25\pi D^2$ .

Тогда расход воздуха по средним значениям скорости потока воздуха составит для сечений 1-5: 332,8; 320,8; 305,3; 162,8; 98,9 м<sup>3</sup>/ч соответственно.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Был создан цифровой двойник системы транспортировки и очистки с возможностью симуляции движения частиц в воздушном потоке, для чего выполнено построение 3D-моделей для визуализации и симуляции процессов. Исследован состав частиц зернового вороха, проведены измерения их масс и геометрических размеров, построены 3D-модели типовых частиц. Проведено имитационное моделирование движения и сепарации частиц в воздушном потоке, позволяющее более глубоко оценить работоспособность системы.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненные виртуальные исследования позволяют проводить симуляции работы различных систем комбайна, варьируя различными параметрами и характеристиками системы — геометрическими размерами отдельных узлов, скоростью воздушного потока, составом и размерами частиц. Таким образом, возможно получить предварительные данные для различных по производительности машин, разных культур и их сортов, а современный уровень развитие методов моделирования и количество вычислительных мощностей обеспечивает достаточно высокую точность получаемых результатов. Создание цифровых двойников существенно оптимизирует процесс разработки, сокращая временные и экономические затраты, позволяя сократить необходимое количество дорогостоящих и сложных в производстве экспериментальных образцов, продолжительных испытаний, привязанных ко времени года, а используемые цифровые модели служат основой для производственной документации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения качества очистки зерна в селекционном зерноуборочном комбайне и оптимизации разработки и настройки подобных систем очистки рассмотрена возможность проведения исследования в цифровой среде для конструкции, нуждающейся в оптимизации множества параметров, на примере созданного цифрового двойника системы транспортировки и очистки зерна с возможностью симуляции движения частиц в воздушном потоке.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** М.Е. Чаплыгин — научное руководство, формулирование основной концепции исследования ее целей и задач, анализ литературных источников, визуализация материалов, доработка текста и оформление материалов, формирование частных и общих выводов, итоговая переработка статьи; А.В. Бутовченко — разработка теоретических предпосылок, визуализация

## ТЕОРИЯ, КОНСТРУИРОВАНИЕ, ИСПЫТАНИЯ

материалов, проведение имитационного моделирования, описание полученных результатов, обработка и анализ данных, обсуждение результатов; К.А. Степанов — разработка методики испытаний, практическое участие в проведении испытаний, обработка и анализ данных, визуализация материалов; С.В. Белоусов — обработка и анализ данных, визуализация материалов; А.С. Овчаренко — подготовка первоначального варианта текста, доработка текста, анализ состава зернового вороха, создание 3D-моделей системы пневмотранспортировки и очистки, участие в проведении испытаний, обработка полученных результатов, формирование общих выводов. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты настоящей работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

**Этическая экспертиза.** Неприменимо.

**Источники финансирования.** Отсутствуют.

**Раскрытие интересов.** Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими организациями), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

**Оригинальность.** При проведении исследования и создании настоящей статьи авторы не использовали ранее полученные и опубликованные сведения (данные, текст).

**Доступ к данным.** Все данные, полученные в настоящем исследовании, представлены в статье.

**Генеративный искусственный интеллект.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

**Рассмотрение и рецензирование.** Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Author contributions:** M.E. Chaplygin: scientific guidance, formulation of the basic concept of the study of its goals and objectives, analysis of literary sources, visualization of materials, revision of the text and design of materials, formation of particular and general conclusions, final revision of the manuscript; A.V. Butovchenko: development of theoretical prerequisites, visualization of materials, simulation modeling, description of the results obtained, data processing and analysis, discussion of the results; K.A. Stepanov: development of test methods, practical participation in conducting tests, data processing and analysis, visualization of materials; S.V. Belousov: data processing and analysis, visualization of materials; A.S. Ovcharenko: preparation of the initial version of the text, revision of the text, analysis of the composition of the grain pile, creation of the 3D models of the pneumatic transportation and cleaning system, participation in conducting tests, processing the results obtained, forming general conclusions. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

**Ethics approval:** Not applicable.

**Funding sources:** No funding.

**Disclosure of interests:** The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

**Statement of originality:** No previously obtained or published material (text or data) was used in this study or article.

**Data availability statement:** All data obtained in this study are available in this article.

**Generative AI:** No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

**Provenance and peer review:** This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard

procedure. The peer review involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Жалнин Э. В., Чаплыгин М. Е. Совершенствование конструкции зерноуборочных комбайнов путём гармонизации их базовых технических параметров // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 3. С. 403–416. DOI: 10.15507/2658-4123.033.202303.403-416. EDN: HQCPHM.
2. Давыдова С.А., Чаплыгин М.Е. Техническая оснащённость селекции и семеноводстве кукурузы // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. Т. 14. № 3. С. 66-74. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-3-66-74. EDN: TYGT XU.
3. Мусин, А. М. Результаты опытов по изучению влияния пневмотранспортировки зерна на выживаемость вредителей и качество зерна. (Канада) / А. М. Мусин // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. – 2001. – № 1. – С. 187. EDN: ECFLLJ.
4. Исследование работы пневматической машины для очистки зерна / А. В. Черняков, М. А. Бегунов, В. С. Коваль, Д. Н. Коростелев // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2022. № 2(46). С. 167-174. DOI 10.48136/2222-0364\_2022\_2\_167.
5. Ряднов, А. И. Обоснование конструктивно-технологической схемы пневмотранспортера зерна соргоуборочного комбайна / А. И. Ряднов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2014. – № 3(35). – С. 200-205. EDN: SPWSWT
6. Богданов, И.Н. Пневматический транспорт в сельском хозяйстве [Текст] / И.Н. Богданов - М.: Росагропромиздат, 1991. - 128 с.
7. Koval V, Chernyakov A, Shevchenko A, et al. Determination of Separator Constructive Parameters, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019;582(1): 012-040
8. Панова, Т. В. Обоснование предельно допустимой скорости потока в пневмотранспорте / Т. В. Панова, М. В. Панов // Сельский механизатор. – 2021. – № 8. – С. 24-26. – EDN CDTOVX.
9. Лабораторная установка пневмотранспорта для определения гидравлических характеристик регулирующего устройства / А.А. Ездина [и др.] // International science project. 2020. Ч. 1. № 36. С. 9-11. EDN: VJMZVD
10. Tang Z., Yu L., Wang F., Li N., Chang L., Cui N. Effect of Particle Size and Shape on Separation in a Hydrocyclone // Water (Switzerland). 2018;11.1:16. DOI: 10.3390/w11010016
11. Zhou H., Wang G., Jia C., Li C. A Novel, Coupled CFD-DEM Model for the Flow Characteristics of Particles Inside a Pipe // Water (Switzerland). 2019;11.11: 2381. DOI: 10.3390/w11112381
12. Yuan J., Jin C., Ye F., Hu Z., Chen H. Dust Suppression Analysis of a New Spiral Hopper Using CFD-DEM Simulations and Experiments // Processes. 2020;8.7: 783. DOI: 10.3390/pr8070783.
13. Guzman L., Chen Y., Landry H. Coupled CFD-DEM Simulation of Seed Flow in an Air Seeder Distributor Tube // Processes. 2020;8. 12: 1597. DOI: 10.3390/pr8121597.
14. Xu D., Li Y., Xu X., Zhang Y., Yang L. Numerical Study of Wheat Particle Flow Characteristics in a Horizontal Curved Pipe // Processes. 2024; 12. 5:900. DOI: 10.3390/pr12050900.
15. Klinzing G. E. A review of pneumatic conveying status, advances and projections // *Powder Technology*. 2018; 333: 78-90. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.04.012.
16. Coetzee C. J. Review: Calibration of the discrete element method // *Powder Technology*. 2017; 310: 104-142. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.01.015.
17. Liu, W.; Zeng, S.; Wu, Z. Parameter Optimization of Spiral Step Cleaning Device for Ratooning Rice Based on Computational Fluid Dynamics-Discrete Element Method Coupling. *Agriculture* 2024;14: 2141. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122141>
18. Kieckhefen P., Pietsch S., Dosta M., Heinrich S. Possibilities and Limits of Computational Fluid Dynamics–Discrete Element Method Simulations in Process Engineering: A Review of Recent Advancements and Future Trends // *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*. 2020; 11.1: 397-422. DOI: 10.1146/annurev-chembioeng-110519-075414.
19. Wang M., Zhu W., Qiaoqun S., Zhang X. A DEM simulation of dry and wet particle flow behaviors in riser // *Powder Technology*. 2014; 267: 221-233. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.07.026.

20. Tsuji Y., Kawaguchi T., Kawaguchi T., Tanaka T., Tanaka T. Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed // *Powder Technology*. 1993; 77. 1: 79-87. DOI:10.1016/0032-5910(93)85010-7.
21. Makkawi Y., Yu X., Ocone R., Generalis S. C. Continuum Modeling of Slightly Wet Fluidization with Electrical Capacitance Tomograph Validation // *Energies*. 2024; 17. 11. : 2656. DOI: 10.3390/en17112656.
22. Guzman L., Chen Y., Landry H. Coupled CFD-DEM Simulation of Seed Flow in Horizontal-Vertical Tube Transition // *Processes*. 2023; 11. 3: 909. DOI: 10.3390/pr11030909.
23. Wang C., Li W., Li B., Jia Z., Jiao S., Ma H. Study on the Influence of Different Factors on Pneumatic Conveying in Horizontal Pipe // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023; 13.9: 5483. DOI: 10.3390/app13095483.
24. LIU W., Zeng S., Chen X. Vortex Cleaning Device for Rice Harvester: Design and Bench Test // *Agriculture (Switzerland)*. 2024; 14. 6: 866. DOI: 10.3390/agriculture14060866.
25. Ding B., Liang Z., Qi Y., Ye Z., Zhou J. Improving Cleaning Performance of Rice Combine Harvesters by DEM-CFD Coupling Technology // *Agriculture (Switzerland)*. 2022; 12. 9: 1457. DOI: 10.3390/agriculture12091457
26. Liang Y Q, Tang Z, Zhang H, Li Y M, Ding Z, Su Z. Cross flow fan on multi-dimensional airflow field of air screen cleaning system for rice grain. *Int J Agric & Biol Eng*, 2022; 15(4): 223–235. DOI: 10.25165/j.ijabe.20221504.6949
27. Raheman H., V. K. Jindal Drag coefficients of agricultural grains in vertical pneumatic conveying // *Applied Engineering in Agriculture*. 2003; 19. 2. DOI: 10.13031/2013.13095
28. Cui H., Grace J. R. Pneumatic conveying of biomass particles: a review // *China PARTICUOLOGY*. 2006;4. 3-4. pp. 183-188. DOI: 10.1016/s1672-2515(07)60259-0.
29. Zhao H., Huang Y., Liu Z., Liu W., Zheng Z. Applications of Discrete Element Method in the Research of Agricultural Machinery: A Review // *Agriculture (Switzerland)*. 2021;11. 5. p. 425. DOI:10.3390/agriculture11050425.
30. Cundall P.A., Strack O.D.L. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. *Geotechnique*. 1979; 29(1):47-65. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>.
31. Walton O. R., Braun R. L., Braun R. Viscosity, granular-temperature, and stress calculations for shearing assemblies of inelastic, frictional disks // *Journal of Rheology*. 1986; 30.5: 949-980. DOI: 10.1122/1.549893
32. Horabik J., Molenda M. Parameters and Contact Models for DEM Simulations of Agricultural Granular Materials: A Review. *Biosystems Engineering*. 2016; 147:206-225. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.02.017>.
33. Sharaby, N. N. Simulation of Sesame Seeds Outflow in Oscillating Seed Metering Device Using DEM / N. N. Sharaby, A. A. Doroshenko, A. V. Butovchenko // *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30. 2: 219-231. DOI 10.15507/2658-4123.030.202002.219-231.
34. Sharaby, N. Modelling and verification of sesame seed particles using the discrete element method / N. Sharaby, A. Doroshenko, A. Butovchenko // *Journal of Agricultural Engineering*. – 2022; 53. 2. DOI 10.4081/jae.2022.1286.
35. Chen P., HAN Y., Jia F., Meng X., Xiao Y., Bai S. DEM simulations and experiments investigating the influence of feeding plate angle in a rubber-roll paddy grain huller // *Biosystems Engineering*. 2021; 201: 23-41. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2020.11.003.
36. Fan J., Wang H., Sun K., Zhang L., Wang L., Zhao J., Yu J. Experimental verification and simulation analysis of a multi-sphere modelling approach for wheat seed particles based on the discrete element method // *Biosystems Engineering*. 2024;245: 135-151. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2024.07.009
37. Petre Miu, Combine Harvesters: Theory, Modeling, and Design (CRC Press Taylor and Francis, 2015). <https://www.doi.org/10.1201/b18852/>.

## REFERENCES

1. Zhalnin EV, Chaplygin ME. Improving the design of combine harvesters by harmonizing their basic technical parameters. *Engineering technologies and systems*. 2023;33:403-416 (In Russ.) doi: 10.15507/2658-4123.033.202303.403-416

2. Davydova SA, Chaplygin ME. Technical equipment of corn breeding and seed production. *Agricultural machinery and technologies*. 2020;14(3):66-74 (In Russ.) doi: 10.22314/2073-7599-2020-14-3-66-74
3. Musin AM. Results of experiments to study the effect of pneumatic grain transportation and grain quality. (Canada). *Engineering and technical support of the agro-industrial complex*. Abstract journal. 2001.1:187 (In Russ.) EDN: ECFLJ.
4. Chernyakov AV, Begunov MA, Koval VS, Korostelev DN. Investigation of the operation of a pneumatic grain cleaning machine. *Bulletin of Omsk State Agrarian University*. 2022;2(46):167-174 doi 10.48136/2222-0364\_2022\_2\_167 (In Russ.)
5. Ryadnov AI. Substantiation of the design and technological scheme of the pneumatic grain conveyor of a sorghum harvester. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and higher professional education*. 2014;3(35):200-205 (In Russ.) EDN: SPWSW
6. Bogdanov IN. Pneumatic transport in agriculture [Text] / IN Bogdanov, Moscow: *Rosagropromizdat*, 1991:128 (In Russ.)
7. Koval V, Chernyakov A, Shevchenko A, et al. Determination of Separator Constructive Parameters, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;582(1): 012-040
8. Panova TV. Justification of the maximum permissible flow velocity in a pneumatic transport / TV Panova, MV Panov // *Rural mechanizer*. 2021;8:24-26. EDN CDTOVX.
9. Laboratory installation of a pneumatic transmission for determining the hydraulic characteristics of a regulating device / AA Yezdina [et al.] // *International science project*. 2020;Part 1(36);9-11 (In Russ). EDN: OOVFGX
10. Tang Z., Yu L., Wang F., Li N., Chang L., Cui N. Effect of Particle Size and Shape on Separation in a Hydrocyclone // *Water (Switzerland)*. 2018;11.1:16. DOI: 10.3390/w11010016
11. Zhou H., Wang G., Jia C., Li C. A Novel, Coupled CFD-DEM Model for the Flow Characteristics of Particles Inside a Pipe // *Water (Switzerland)*. 2019;11.11: 2381. DOI: 10.3390/w11112381
12. Yuan J., Jin C., Ye F., Hu Z., Chen H. Dust Suppression Analysis of a New Spiral Hopper Using CFD-DEM Simulations and Experiments // *Processes*. 2020;8.7: 783. DOI: 10.3390/pr8070783.
13. Guzman L., Chen Y., Landry H. Coupled CFD-DEM Simulation of Seed Flow in an Air Seeder Distributor Tube // *Processes*. 2020;8. 12: 1597. DOI: 10.3390/pr8121597.
14. Xu D., Li Y., Xu X., Zhang Y., Yang L. Numerical Study of Wheat Particle Flow Characteristics in a Horizontal Curved Pipe // *Processes*. 2024; 12. 5:900. DOI: 10.3390/pr12050900.
15. Klinzing G. E. A review of pneumatic conveying status, advances and projections // *Powder Technology*. 2018; 333: 78-90. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.04.012.
16. Coetsee C. J. Review: Calibration of the discrete element method // *Powder Technology*. 2017; 310: 104-142. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.01.015.
17. Liu, W.; Zeng, S.; Wu, Z. Parameter Optimization of Spiral Step Cleaning Device for Ratooning Rice Based on Computational Fluid Dynamics-Discrete Element Method Coupling. *Agriculture* 2024;14: 2141. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122141>
18. Kieckhefen P., Pietsch S., Dosta M., Heinrich S. Possibilities and Limits of Computational Fluid Dynamics-Discrete Element Method Simulations in Process Engineering: A Review of Recent Advancements and Future Trends // *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*. 2020; 11.1: 397-422. DOI: 10.1146/annurev-chembioeng-110519-075414.
19. Wang M., Zhu W., Qiaoqun S., Zhang X. A DEM simulation of dry and wet particle flow behaviors in riser // *Powder Technology*. 2014; 267: 221-233. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.07.026.
20. Tsuji Y., Kawaguchi T., Kawaguchi T., Tanaka T., Tanaka T. Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed // *Powder Technology*. 1993; 77. 1: 79-87. DOI:10.1016/0032-5910(93)85010-7.
21. Makkawi Y., Yu X., Ocone R., Generalis S. C. Continuum Modeling of Slightly Wet Fluidization with Electrical Capacitance Tomograph Validation // *Energies*. 2024; 17. 11.: 2656. DOI: 10.3390/en17112656.
22. Guzman L., Chen Y., Landry H. Coupled CFD-DEM Simulation of Seed Flow in Horizontal-Vertical Tube Transition // *Processes*. 2023; 11. 3: 909. DOI: 10.3390/pr11030909.
23. Wang C., Li W., Li B., Jia Z., Jiao S., Ma H. Study on the Influence of Different Factors on Pneumatic Conveying in Horizontal Pipe // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023; 13.9: 5483. DOI: 10.3390/app13095483.
24. LIU W., Zeng S., Chen X. Vortex Cleaning Device for Rice Harvester: Design and Bench Test // *Agriculture (Switzerland)*. 2024; 14. 6: 866. DOI: 10.3390/agriculture14060866.

25. Ding B., Liang Z., Qi Y., Ye Z., Zhou J. Improving Cleaning Performance of Rice Combine Harvesters by DEM–CFD Coupling Technology // *Agriculture (Switzerland)*. 2022; 12. 9: 1457. DOI: 10.3390/agriculture12091457
26. Liang Y Q, Tang Z, Zhang H, Li Y M, Ding Z, Su Z. Cross flow fan on multi-dimensional airflow field of air screen cleaning system for rice grain. *Int J Agric & Biol Eng*, 2022; 15(4): 223–235. DOI: 10.25165/j.ijabe.20221504.6949
27. Raheman H., V. K. Jindal Drag coefficients of agricultural grains in vertical pneumatic conveying // *Applied Engineering in Agriculture*. 2003; 19. 2. DOI: 10.13031/2013.13095
28. Cui H., Grace J. R. Pneumatic conveying of biomass particles: a review // *China PARTICUOLOGY*. 2006;4. 3-4. pp. 183-188. DOI: 10.1016/s1672-2515(07)60259-0.
29. Zhao H., Huang Y., Liu Z., Liu W., Zheng Z. Applications of Discrete Element Method in the Research of Agricultural Machinery: A Review // *Agriculture (Switzerland)*. 2021;11. 5. p. 425. DOI:10.3390/agriculture11050425.
30. Cundall P.A., Strack O.D.L. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. *Geotechnique*. 1979; 29(1):47-65. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>.
31. Walton O. R., Braun R. L., Braun R. Viscosity, granular-temperature, and stress calculations for shearing assemblies of inelastic, frictional disks // *Journal of Rheology*. 1986; 30.5: 949-980. 10.1122/1.549893
32. Horabik J., Molenda M. Parameters and Contact Models for DEM Simulations of Agricultural Granular Materials: A Review. *Biosystems Engineering*. 2016; 147:206-225. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.02.017>.
33. Sharaby, N. N. Simulation of Sesame Seeds Outflow in Oscillating Seed Metering Device Using DEM / N. N. Sharaby, A. A. Doroshenko, A. V. Butovchenko // *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30. 2: 219-231. DOI 10.15507/2658-4123.030.202002.219-231.
34. Sharaby, N. Modelling and verification of sesame seed particles using the discrete element method / N. Sharaby, A. Doroshenko, A. Butovchenko // *Journal of Agricultural Engineering*. – 2022; 53. 2. DOI 10.4081/jae.2022.1286.
35. Chen P., HAN Y., Jia F., Meng X., Xiao Y., Bai S. DEM simulations and experiments investigating the influence of feeding plate angle in a rubber-roll paddy grain huller // *Biosystems Engineering*. 2021; 201: 23-41. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2020.11.003.
36. Fan J., Wang H., Sun K., Zhang L., Wang L., Zhao J., Yu J. Experimental verification and simulation analysis of a multi-sphere modelling approach for wheat seed particles based on the discrete element method // *Biosystems Engineering*. 2024;245:135-151. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2024.07.009
37. Petre Miu, *Combine Harvesters: Theory, Modeling, and Design* (CRC Press Taylor and Francis, 2015). doi: 10.1201/b18852/

## ОБ АВТОРАХ / AUTHORS' INFO

**\* Степанов Кирилл Александрович,**

младший научный сотрудник отдела  
«Технологии и оборудование для зерновых,  
зернобобовых и масличных культур»;  
адрес: Россия, 109428, Москва, 1-й  
Институтский пр-д, д. 5;  
ORCID: 0009-0004-1511-4307;  
eLibrary SPIN: 6831-0519;  
e-mail: 89999878895@mail.ru

Соавторы:

**Чаплыгин Михаил Евгеньевич,**

канд. техн. наук,  
ведущий научный сотрудник отдела  
«Технологии и оборудование для зерновых,  
зернобобовых и масличных культур»;  
ORCID: 0000-0003-0031-6868;  
eLibrary SPIN: 2268-6927;

**\* Kirill A. Stepanov,**

Junior researcher of the Technologies and  
Equipment for Cereals, Legumes and Oilseeds  
Department;  
address: 5 1<sup>st</sup> Institutsky dr, Moscow, Russia,  
109428;  
ORCID: 0009-0004-1511-4307;  
eLibrary SPIN: 6831-0519;  
e-mail: 89999878895@mail.ru

Co-Authors:

**Mikhail E. Chaplygin,**

Cand. Sci. (Engineering),  
Leading researcher of the Technologies and  
Equipment for Cereals, Legumes and Oilseeds  
Department;  
ORCID: 0000-0003-0031-6868;  
eLibrary SPIN: 2268-6927;

THEORY, DESIGN, TESTING

e-mail: misha2728@yandex.ru

**Бутовченко Андрей Владимирович,**

д-р техн. наук, доцент,

профессор;

ORCID: 0000-0002-9335-9586;

eLibrary SPIN: 7205-4573;

e-mail: ButovchenkoAV@yandex.ru

**Белоусов Сергей Витальевич,**

канд. техн. наук,

доцент кафедры «Процессы и машины в агробизнесе»;

ORCID: 0000-0002-8874-9862;

eLibrary SPIN: 6847-7933;

e-mail: sergey\_belousov\_87@mail.ru

**Овчаренко Александр Сергеевич,**

младший научный сотрудник лаборатории «Технологии и машины для посева и уборки зерна и семян в селекции и семеноводстве»,

ORCID: 0000-0002-1407-6757;

eLibrary SPIN: 8452-3589;

e-mail: peterbilt@list.ru

e-mail: misha2728@yandex.ru

**Andrey V. Butovchenko,**

Dr. Sci. (Engineering), assistant professor,

Professor;

ORCID: 0000-0002-9335-9586;

eLibrary SPIN: 7205-4573;

e-mail: ButovchenkoAV@yandex.ru

**Sergey V. Belousov,**

Cand. Sci. (Engineering),

Assistant professor of the Processes and Machines in Agribusiness Department;

ORCID: 0000-0002-8874-9862;

eLibrary SPIN: 6847-7933;

e-mail: sergey\_belousov\_87@mail.ru

**Alexander S. Ovcharenko,**

Junior researcher of the Technologies and Equipment for Cereals, Legumes and Oilseeds Department;

ORCID: 0000-0002-1407-6757;

eLibrary SPIN: 8452-3589;

e-mail: peterbilt@list.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author