

В. В. Азаренко¹, А. А. Жешко², Д. Н. Бондаренко³, П. П. Бегун²

¹Президиум Национальной академии наук Беларуси

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: azarenko@presidium.bas-net.by

²РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: azeshko@gmail.com

³УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»

г. Минск, Республика Беларусь

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

Аннотация. В статье рассмотрены особенности определения аэродинамических свойств твердых минеральных удобрений для последующего моделирования процесса их внесения методом дискретных элементов.

Ключевые слова: минеральные удобрения, аэродинамические свойства, метод дискретных элементов, вычислительная гидродинамика.

V. V. Azarenka¹, A. A. Zheshka², D. N. Bondarenka³, P. P. Behun²

¹Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus

Minsk, Republic of Belarus

E-mail: azarenko@presidium.bas-net.by

²RUE “SPC NAS of Belarus of Agricultural Mechanization”

Minsk, Republic of Belarus

E-mail: azeshko@gmail.com

³UE “Belarusian State Agrarian Technical University”

Minsk, Republic of Belarus

RESULTS OF THE STUDY OF AERODYNAMIC PROPERTIES OF SOLID MINERAL FERTILIZERS

Abstract. The article discusses the features of determining the aerodynamic properties of solid mineral fertilizers for subsequent modeling of the process of their application using the discrete element method.

Keywords: mineral fertilizers, aerodynamic properties, discrete element method, computational fluid dynamics.

Введение

В процессе выполнения технологических операций рабочие и вспомогательные органы машин химизации взаимодействуют с удобрениями различного вида и гранулометрического состава и от их свойств во многом зависит правильность выбора параметров, закладываемых на стадиях проектирования, и настроек машин в процессе эксплуатации.

Свойства минеральных удобрений можно разделить на группы согласно схеме, представленной на рисунке 1. Необходимо отметить, что большинство свойств взаимосвязаны и могут изменяться в довольно широких пределах, что может приводить к неточным настройкам машин химизации земледелия и, как следствие, снижению качества распределения удобрений по площади поля.

Заводами Республики Беларусь, а также стран СНГ совершенствуются технологии и осваивается производство новых форм минеральных удобрений. Например, ОАО «Гомельский химический завод» производит более десятка наименований твердых и жидких минеральных удобрений [1], ОАО «Гродно Азот» – несколько сортов карбамида, сульфат аммония и другие удобрения [2], ОАО «Беларуськалий» – десяток разновидностей калийных удобрений и тукосмесей [3].



Рисунок 1 – Классификация свойств минеральных удобрений

Кроме того, совершенствование конструктивно-кинематических свойств рабочих машин для внесения минеральных удобрений, а также конструкционных материалов для их изготовления требуют уточнения физико-механических свойств. Знание свойств удобрений также необходимо для оценки адекватности моделей, построенных методом дискретных элементов.

В соответствии с рисунком 1 свойства минеральных удобрений можно разделить на агрохимические, технологические и физико-механические. Агрохимические свойства позволяют охарактеризовать содержание питательных элементов и растворимость минеральных удобрений в почве. Технологические свойства описывают состояние удобрений в процессе их транспортирования и длительного хранения, например, такие показатели, как слеживаемость и сыпучесть. К физическим свойствам относятся влажность и гигроскопичность, плотность и пористость.

Большую группу представляют механические свойства минеральных удобрений. Прежде всего это подгруппа фрикционных свойств, которые описываются коэффициентами внешнего и внутреннего трения, сопротивления удобрений сдвигу, углам естественного откоса и обрушения. Подгруппа прочностных свойств представлена сопротивлением сжатию, разрыву, резанию. Фракционные свойства характеризуют гранулометрический состав удобрений, а аэродинамические описывают процесс взаимодействия удобрений с воздушной средой во время их рассеивания распределяющими рабочими органами.

Большинство из показателей группы физико-механических свойств в отдельности и в совокупности влияют на адекватность результатов (правильность) моделирования методом дискретных элементов (DEM) для обоснования параметров машин для внесения твердых минеральных удобрений, а также на правильность моделирования методом вычислительной гидродинамики (CFD) при поиске оптимальных конструктивных схем машин для внутрипочвенного и поверхностного внесения жидких минеральных удобрений. В этой связи определенный научный интерес представляет уточнение физико-механических свойств производимых в настоящее время твердых минеральных удобрений и сопоставление полученных данных с моделями, построенными методом дискретных элементов. Данный подход использовали в своих научных работах многие ученые, например, M. Ucgul, S. Yinyana, M. R. Arturo, Z. E. Ismail, M. M. Ibrahim, P. Angel, B. E. Kassem [4–10].

В настоящей статье рассмотрены особенности определения аэродинамических свойств твердых минеральных удобрений для последующего моделирования процесса их внесения методом дискретных элементов.

Основная часть

При движении частиц удобрений, перемещаемых воздушным потоком, создаваемым пневматическими устройствами, а также при высеве их рабочими органами как центробежного, так и штангового типов присутствует фаза свободного их движения в воздушном потоке. В этой связи исследование величины сопротивления различных видов минеральных удобрений движению

в воздушной среде является актуальной задачей при решении вопросов равномерного распределения удобрений по поверхности поля, в том числе обоснования рациональной конструкции ветрозащитных устройств, а также при совершенствовании существующих методик оценки качества функционирования машин химизации земледелия.

Ввиду того, что минеральные удобрения являются плохообтекаемыми телами, во время их движения в воздушном потоке возникают завихрения возле их поверхности, которые приводят к возникновению дополнительной силы сопротивления. Для частиц небольшого размера при их медленном движении в вязкой жидкости сопротивление можно определить по формуле Джорджа Стокса.

В случае определения сопротивления воздушной среды для частиц, по размерам сопоставимым с минеральными удобрениями, целесообразно использовать формулу, предложенную Н. Е. Жуковским. Для определения силы сопротивления воздушной среды необходимо знать площадь проекции частицы минеральных удобрений на плоскость, которая перпендикулярна направлению вектора ее скорости. Кроме того, необходимо вычислить величину коэффициента лобового сопротивления. Значения данных переменных могут изменяться под воздействием целого ряда факторов, в этой связи аналитический их учет затруднителен.

Схема движения частиц минеральных удобрений в горизонтальном воздушном потоке представлена на рисунке 2. Для частиц сферической формы, таких как суперфосфат двойной, карбамид и аммиачная селитра, характерно образование зоны *a* встречи частицы с воздушным потоком и его отсоединения *b*, а также зон вихрей в кормовой части *c*, зона развития вихрей *d*. При этом на частицу в форме пространственного многогранника дополнительно действуют силы, приводящие к ее вращению (зона *e*).

Ввиду того что геометрические размеры большинства современных твердых минеральных удобрений изменяются в пределах от 1 до 6 мм, вычисление коэффициента сопротивления возможно лишь относительно некоторых групп, сформированных по гранулометрическому составу. По этой причине для характеристики сопротивления минеральных удобрений воздушному потоку целесообразно использовать среднее значение коэффициента парусности $K_{par.}$

Для определения скорости витания частиц в вертикальном воздушном потоке U_{krt} и коэффициента парусности K_{par} использовался парусный классификатор кафедры сельскохозяйственных машин УО «БГАУ» [11, с. 152–161], схема которого представлена на рисунке 3.

В соответствии с рисунком 3 классификатор состоит из электродвигателя 1, насадки всасывающей 2, затвора 3, обечайки 4, конического отстойника 5, фильтра 6, трубопровода 7, трубы вертикальной 8, заслонки 9 и вентилятора 10. Электродвигатель 1 приводит во вращение вентилятор 10. Частота вращения вентилятора 10 регулируется посредством клиноременного вариатора, тем самым изменяется скорость воздушного потока в рабочем контуре классификатора. Дополнительной регулировкой является перекрытие трубопровода 7 воздушного канала заслонкой 9. Для определения положения заслонки 9 в конструкции классификатора предусмотрен указатель.

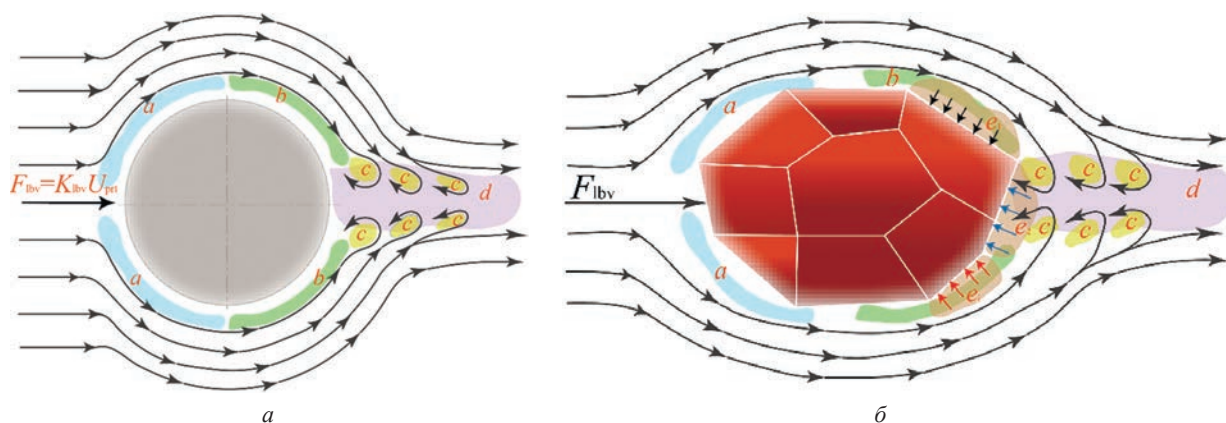


Рисунок 2 – Схема движения частицы удобрений в горизонтальном воздушном потоке:

a – сферическая форма частиц (суперфосфат, карбамид, аммиачная селитра);

б – пространственный многогранник (хлористый калий)

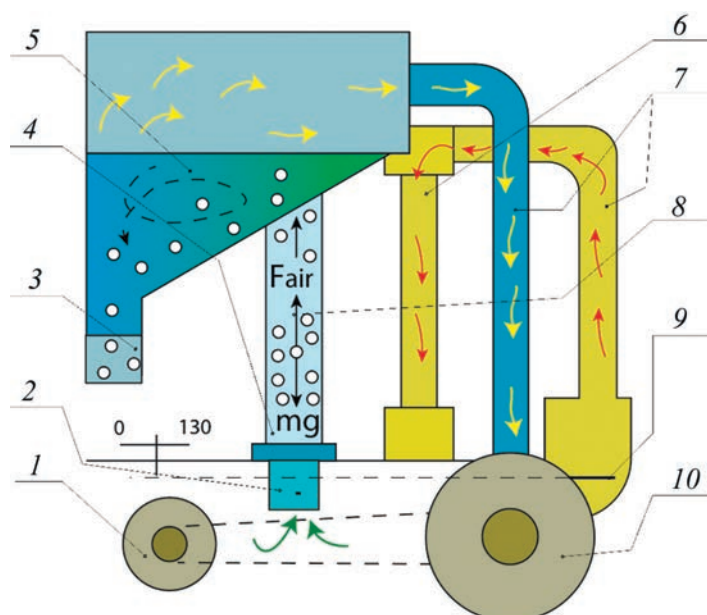


Рисунок 3 – Схема парусного классификатора: 1 – электродвигатель; 2 – насадка всасывающая; 3 – затвор; 4 – обечайка; 5 – отстойник конический; 6 – фильтр; 7 – трубопровод; 8 – труба вертикальная; 9 – заслонка; 10 – вентилятор

Исследуемый материал помещается в сетчатую обечайку 4 для исследования аэродинамических свойств. Далее в системе создается разрежение. Исследуемый материал поднимается по вертикальной трубе 8 и выносится воздушным потоком в конический отстойник 5, после чего осаждается в стакан, расположенный над затвором 3. Давление воздушного потока в контуре классификатора определяется посредством трубки Пито с гидростатическим манометром, что позволяет фиксировать полное и статическое давление в системе, а затем вычислять динамический напор как разность полного и статического напоров.

Перед началом исследований определяли гранулометрический состав порций удобрений (рисунок 4). Фракции удобрений (суперфосфат двойной, хлористый калий, аммиачная селитра и карбамид), отсортированные на группы с размером части у частиц 7–5; 5–4,5; 4,5–3,5; 3,5–3; 3–2; 2–1 мм (в зависимости от вида удобрений число групп составляло от 3 до 5), поочередно закладывались в сетчатую обечайку парусного классификатора. При этом масса одной навески составляла 60–80 г.



Рисунок 4 – Лабораторные кюветы с пробами минеральных удобрений для исследования гранулометрического состава: а – карбамид; б – селитра аммиачная; в – суперфосфат двойной; г – хлористый калий

Также определяли положение нулевой отметки жидкости в трубке и выбирали необходимый масштаб шкалы путем изменения угла наклона трубки к горизонту. Далее устанавливали минимальное количество оборотов вентилятора при полностью закрытой заслонке 9 (рисунок 3), включали классификатор и путем увеличения оборотов вентилятора 10 с одновременным открытием заслонки 9 фиксировали момент начала выделения наиболее легких компонентов в размерной группе удобрений. Затем увеличивали скорость воздушного потока до полного выведения удобрений из вертикальной трубы 8 и определяли величину динамического напора.

Силу, действующую на частицу в вертикальном воздушном потоке, определим по формуле И. Ньютона

$$F_{air} = k_{lbv} S_{mds} (v_{prs} - v_{vzd})^2, \quad (1)$$

где k_{lbv} – коэффициент лобового сопротивления частицы удобрений; S_{mds} – площадь проекции частицы минеральных удобрений на перпендикулярную направлению скорости $v_{prs} - v_{vzd}$ плоскость (миделево сечение), м²; v_{prs} – абсолютная скорость движения частицы, м/с; v_{vzd} – абсолютная скорость движения воздушного потока, м/с.

Для определения критической скорости движения частицы в вертикальном воздушном потоке использовали выражение

$$U_{krt} = \frac{1}{10\sqrt{5}} \sqrt{\frac{\gamma_{spt}}{\gamma_{vz}} H_{dnm} g \sin \alpha_{mnt}}, \quad (2)$$

где γ_{spt} – плотность спирта в трубке микроанометра, кг/м³; γ_{vzd} – плотность воздуха, кг/м³; H_{dnm} – динамический напор, мм; g – ускорение свободного падения, м/с²; α_{mnt} – угол наклона трубки микроанометра, град.

Для определения коэффициента парусности K_{par} (м⁻¹), из формулы (2), получим

$$K_{par} = \frac{g}{U_{krt}^2} = \frac{500 \gamma_{vzd} \csc \alpha_{mnt}}{H_{dnm} \gamma_{spt}}, \quad (3)$$

где $\csc \alpha_{mnt}$ – косеканс угла α_{mnt} .

Коэффициент лобового сопротивления k_{lbv} , входящий в формулу (1), зависит от режима движения частицы удобрений и ее формы. Во время своего движения частица совершает сложное поступательно-вращательное движение, что является следствием изменения миделевого сечения S_{mds} . В то же время форму тела и режим движения можно характеризовать числом Рейнольдса [12, с. 133].

$$Re = \frac{v_{otn} d_{udb} \gamma_{vzd}}{g \mu_{vzd}}, \quad (4)$$

где v_{otn} – относительная скорость движения частицы удобрений в воздушном потоке, м/с; d_{udb} – эквивалентный диаметр частицы удобрений, мм; μ_{vzd} – динамический коэффициент вязкости воздуха, кг·с/м².

Для частиц сферической формы С. И. Назаров [13, с. 90] получил следующую формулу для определения коэффициента лобового сопротивления:

$$k_{lbv} = \frac{2 g \gamma_{udb} d_{udb}}{3 \gamma_{vzd} v_{otn}^2}, \quad (5)$$

где γ_{udb} – удельный вес частиц удобрений, кг/м³.

Для определения зависимости коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса воспользуемся выражением, полученным С. И. Назаровым [13, с. 90]

$$k_{lbv} = \frac{2 \gamma_{udb} \gamma_{vzd} d_{udb}^3}{3 g \mu_{vzd}^2 Re^2}. \quad (6)$$

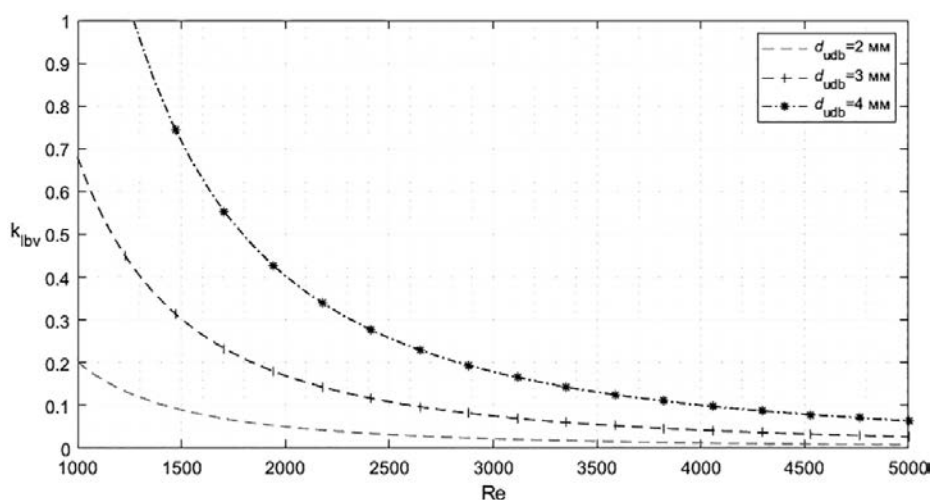


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента лобового сопротивления частиц минеральных удобрений от значения числа Рейнольдса

На рисунке 5 представлена зависимость коэффициента лобового сопротивления частиц минеральных удобрений от значения числа Рейнольдса.

Результаты измерения коэффициента парусности и критической скорости некоторых твердых минеральных удобрений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерения коэффициента парусности и критической скорости некоторых твердых минеральных удобрений

Наименование минеральных удобрений	Плотность, кг/м ³	Средняя масса 1 частицы, г	Средний диаметр частиц, мм	Скорость витания (min/max), м/с	Среднее значение коэффициента парусности
Аммиачная селитра	823,52	0,664	3,67	5,5/9,8	0,167
Карбамид	774,67	0,312	2	0,9/9,3	0,377
Суперфосфат двойной	1 086,67	0,660	4,3	4,2/10,6	0,206
Хлористый калий	1 070,47	0,349	3,25	5,5/9,9	0,165

Из таблицы 1 видно, что скорость витания частиц карбамида изменяется в сравнительно широком диапазоне – от 0,9 до 9,3 м/с в зависимости от размера частиц. Такой широкий размах данного показателя усложняет процесс моделирования методом дискретных элементов для материала. Аммиачная селитра, суперфосфат и хлористый калий схожи по усредненным показателям скорости витания, различие между минимальной и максимальной скоростью витания не превышает 45 %, однако средняя масса частиц хлористого калия и его геометрические параметры усложняют моделирование поведения частиц в вертикальном воздушном потоке.

Результаты определения критического напора для удобрений, разделенных на фракции, представлены на рисунке 6. Для построения графиков брали 3–5 фракций удобрений различного вида. Затем навеску 0,07 кг удобрений помещали на приемную сетку парусного классификатора. После включения в работу электродвигателя повышали скорость воздушного потока путем увеличения частоты вращения вентилятора и регулировки заслонки.

По результатам попадания в стакан затвора частиц удобрений по микроанометру определяли динамический напор H_{dnm} . Через 1 минуту отбирали удобрения из стакана затвора и определяли их массу, стакан устанавливали на место, а динамический напор увеличивали на 5 мм. Опыты повторяли до полного выхода всех удобрений на приемную сетку парусного классификатора.

По полученным данным построены графики, представленные на рисунке 5. По оси ординат отложен процент выхода удобрений P_{udb} из взятой навески в зависимости от величины динамического напора H_{dnm} . Далее по полученным графикам определяли напор, который соответствует пик.

На рисунке 7 представлены результаты определения зависимости критической скорости и коэффициента парусности от размеров частиц удобрений D_{frc} .

Полученные данные позволили вычислить критическую скорость витания частиц в вертикальном воздушном потоке U_{krt} и коэффициент парусности K_{par} по формулам (2) и (3) соответственно.

Для построения имитационной модели процесса витания частиц твердых минеральных удобрений в вертикальном воздушном потоке использовали вычислительный модуль динамики

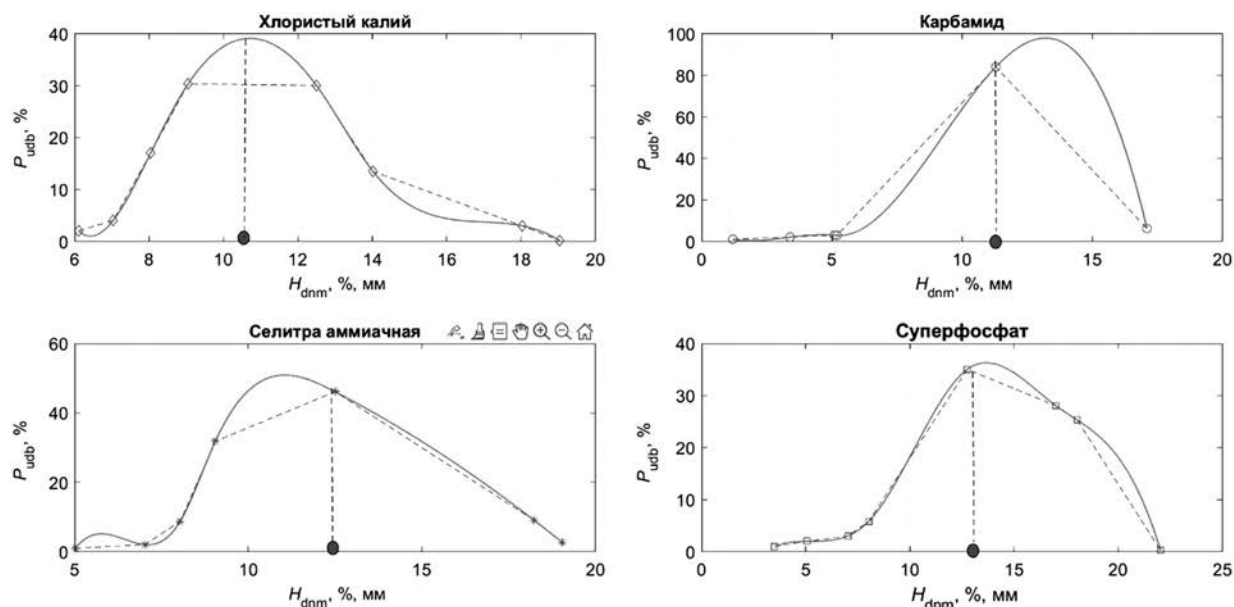


Рисунок 6 – Результаты определения критического напора для удобрений, разделенных на фракции

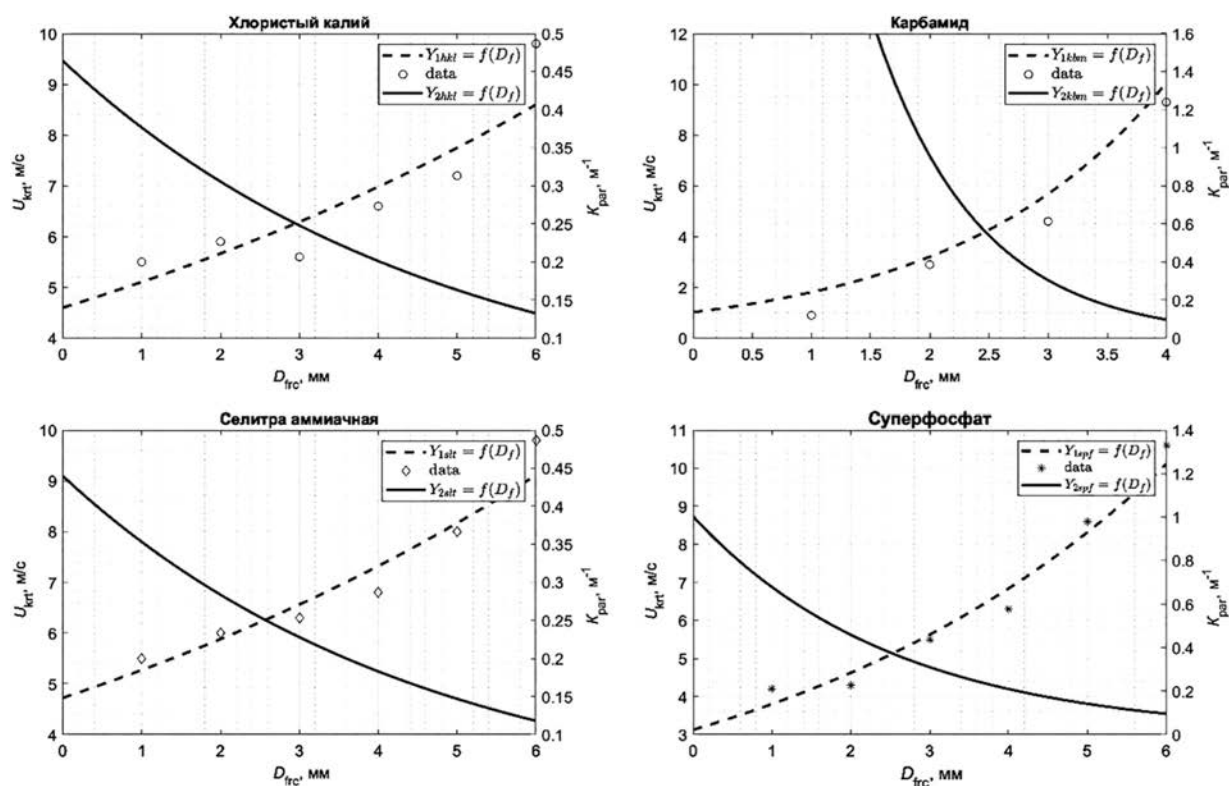


Рисунок 7 – Результаты определения зависимости критической скорости и коэффициента парусности от размеров частиц удобрений

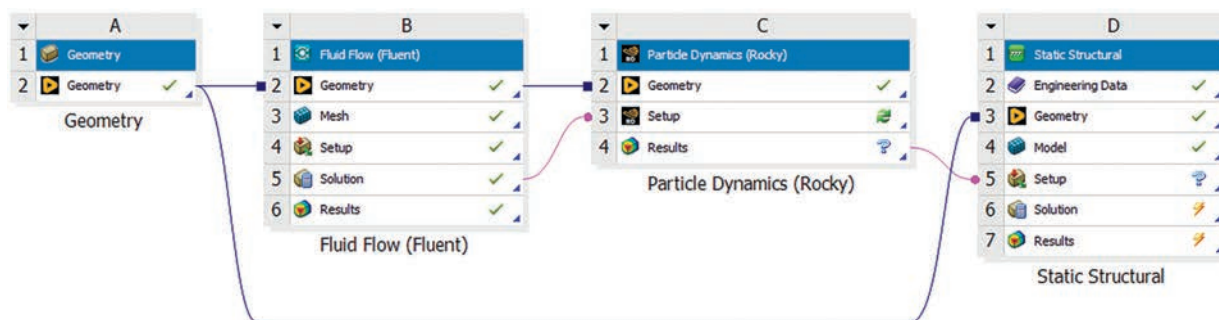


Рисунок 8 – Схема проекта CFD – DEM-модели

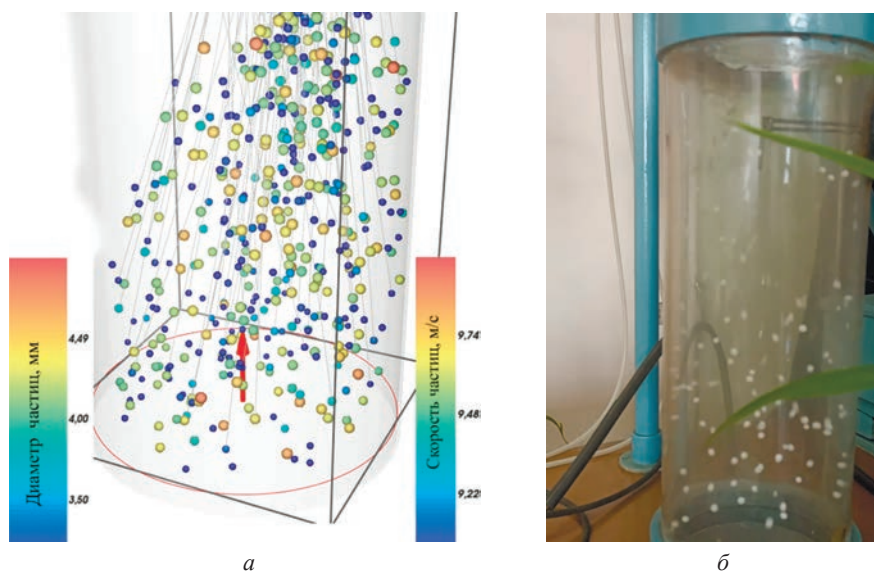


Рисунок 9 – CFD – DEM-модель и ее физический эквивалент для определения скорости витания частиц в вертикальном воздушном потоке: а – CFD – DEM-модель, б – экспериментальная установка

жидкости и газов *CFD* и модуль моделирования динамики частиц дискретным методом *DEM* пакета *Ansys* (рисунок 8).

На рисунке 9, а представлена *CFD – DEM*-модель, на рисунке 9, б – экспериментальная установка для проверки сходимости модельных данных.

В таблице 2 представлены результаты моделирования процесса витания частиц твердых двойного суперфосфата в вертикальном воздушном потоке (фрагмент данных).

Таблица 2 – Результаты моделирования процесса витания частиц твердых минеральных удобрений (суперфосфат двойной) в вертикальном воздушном потоке (фрагмент)

Время моделирования, с	Средний эквивалентный диаметр частиц, мм	Средние значения поступательной скорости (проекция на оси координат XYZ), м/с		
		X	Y	Z
1,50	–0,03	3,58	0,03	–0,98
1,60	–0,03	3,56	0,03	–1,07
1,70	–0,03	3,53	0,02	–1,15
1,80	–0,02	3,39	0,01	–1,12
1,90	–0,01	3,15	–0,00	–0,98
2,00	–0,01	3,04	–0,01	–0,88
2,10	0,00	3,01	–0,01	–0,85
2,20	0,00	3,01	–0,01	–0,83

Время моделирования, с	Средний эквивалентный диаметр частиц, мм	Средние значения поступательной скорости (проекция на оси координат XYZ), м/с		
		X	Y	Z
2,30	–0,01	3,00	–0,00	–0,78
2,40	–0,01	3,00	0,00	–0,77
2,50	0,00	3,00	–0,00	–0,78
2,60	0,01	3,00	–0,03	–0,73
2,70	0,02	3,00	–0,03	–0,69
2,80	0,02	3,00	–0,03	–0,72
2,90	0,02	3,00	–0,03	–0,76
3,00	0,01	3,00	–0,03	–0,80

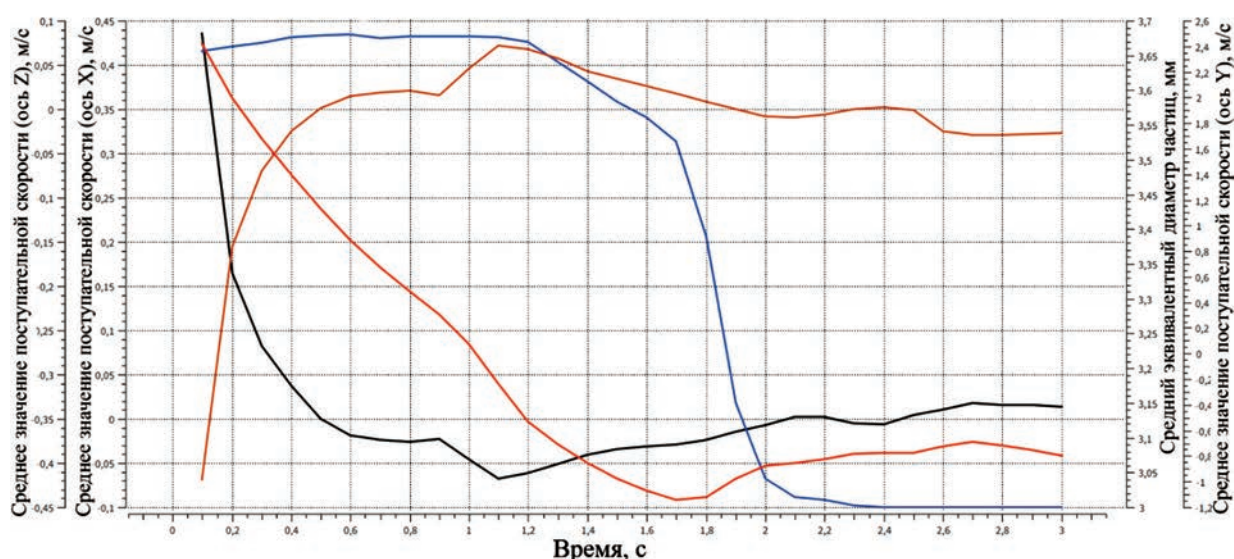


Рисунок 10 – Значения основных показателей моделирования движения частиц твердых минеральных удобрений в вертикальном воздушном потоке

На рисунке 10 представлены графики изменения проекций поступательной скорости частиц удобрений и эквивалентного диаметра в зависимости от времени моделирования.

Заключение

Следует отметить высокую сходимость экспериментальных данных, полученных при физическом моделировании и результатов, полученных методом дискретного моделирования, где расхождение не превысило 8 %. Для проверки адекватности модели, полученной методом дискретного моделирования, использовали проверку корректности, сравнивали результаты с реальными данными, выполнили анализ чувствительности модели и проверку на устойчивость. Таким образом, полученные результаты целесообразно использовать для обоснования основных конструктивно-технологических параметров подающих и распределяющих рабочих органов машин химизации земледелия [14].

Список использованных источников

1. ОАО «Гомельский химический завод» : офиц. сайт. – Гомель, 2016–2025. – URL: <https://belfert.by/news/all> (дата обращения: 18.04.2025).
2. ОАО «Гродно Азот» : офиц. сайт. – Гродно, 2012–2025. – URL: <https://azot.by/products/osnovnoe-proizvodstvo> (дата обращения: 22.07.2024).
3. ОАО «Беларускалий» : офиц. сайт. – Солигорск, 2025. – URL: <https://belaruskali.by> (дата обращения: 22.07.2024).

4. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader / P. V. Liedekerke, E. Tijssens, E. Dintwa [et al.] / Powder Technology. – 2009. – P. 348–360.
5. Yinyana, S. Numerical simulation of spreading performance and distribution pattern of centrifugal variable-rate fertilizer applicator based on DEM software / Sh. Yinyana, Ch. Manb, W. Xiaochana // Computers and Electronics in Agriculture. – 2018. – P. 249–259.
6. Arturo, M. R. Model and Software for the Parameters Calculation in Centrifugal Disk of Fertilizer Spreaders / M. R. Arturo, M. V. Gómez-Águila, M. S. Escobar // Ciencias Técnicas Agropecuarias. – 2021. – Vol. 30. – № 1. – P. 82–101.
7. Ismail, Z. E. Agitator Unit in Auger Metering Device for Fertilizer Applicator / Z. E. Ismail, M. M. Ibrahim, M. A. El-Saadany // Agricultural mechanization in Asia, Africa, and Latin America. – 2011. – Vol. 42. – P. 36–41.
8. The engineering parameters affecting the auger-type metering devices for fertilizing distribution / M. M. Ibrahim, Z. E. Ismail, M. A. El-Saadany, O. A. Fouda // Farm Machinery and Power. – Misr J. Ag. Eng. – 2008. – 25(3). – P. 641–654.
9. Angel, P. Auger-type granular fertilizer distributor: mathematical model and dynamic simulation / P. Angel, N. Garcia, Nelson // Eng. Agric., Japoticabal. – 2012. – Vol. 32. – № 1. – P. 151–163.
10. A Semi-Automated DEM Parameter Calibration Technique of Powders Based on Different Bulk Responses Extracted from Auger Dosing Experiments / B. E. Kassem, N. Salloum, T. Brinz [et al.] // KONA Powder and Particle Journal. – 2021. – № 38. – P. 235–250.
11. Машины и оборудование в растениеводстве. Практикум : учеб.-метод. пособие в 3 ч. / В. П. Чеботарев, Г. А. Радишевский, Н. П. Гурнович [и др.]. – Мн. : БГАТУ, 2021. – Ч. 3. – 256 с.
12. Адамчук, В. В. Теория центробежных рабочих органов машин для внесения минеральных удобрений : монография / В. В. Адамчук. – К. : Аграрная наука, 2010. – 178 с.
13. Назаров, С. И. Экспериментально-теоретические основы механизации процесса сплошного внесения минеральных удобрений : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Назаров Сергей Иванович ; ЦНИИМСХ. – Мн., 1969. – 393 л.
14. Степук, Л. Я. Недобор и потери урожая как следствие наличия проблем в сфере технического обеспечения сельского хозяйства / Л. Я. Степук, В. Р. Петровец, И. В. Барановский // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – Горки, 2017. – № 2. – С. 132–136.