



УДК 631.3

DOI: 10.37128/2520-6168-2023-1-1

**ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ АЕРОДИНАМІЧНОЇ СЕПАРАЦІЇ  
ДРІБНОЗЕРНИСТОГО СИПКОГО МАТЕРІАЛУ**

**Алієв Ельчин Бахтияр огли**, д.т.н., старший дослідник, професор  
Дніпровський державний аграрно-економічний університет  
**Бабин Ігор Анатолійович**, к.т.н., доцент  
Вінницький національний аграрний університет  
**Сокол Сергій Петрович**, к.т.н., доцент  
Дніпровський державний аграрно-економічний університет

**Elchyn Aliiev**, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Professor  
Dnipro State Agrarian and Economic University  
**Ihor Babyn**, Ph.D., Associate Professor  
Vinnytsia National Agrarian University  
**Serhiy Sokol**, Ph.D., Associate Professor  
Dnipro State Agrarian and Economic University

Для чисельного моделювання аеродинамічної сепарації дрібнозернистого сипкого матеріалу можна використовувати різні методи, включаючи методи дискретних елементів методи скінченних елементів та методи обмежених областей. У всіх цих методах рівняння зазначені розв'язуються чисельно, а результати використовуються для визначення траєкторій і швидкостей руху повітря та часток. Метод дискретних елементів (DEM), на базі якого буде проводитися дослідження, призначений для моделювання гранульованого потоку матеріалів. Метою досліджень є моделювання руху дрібнозернистого сипкого матеріалу під дією повітряного потоку і розрахунок параметрів його аеродинамічної сепарації в програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+. В якості фізичних моделей були обрані наступні: газ, двовимірна, роздільна течія, градієнти, ідеальний газ, ізотермічне рівняння енергії рідини, нестационарний неявний, турбулентний, осереднення по Рейнольдсу рівняння Нав'є-Стокса, K-Epsilon модель турбулентності, допустима двошарова K-Epsilon, дистанція стінки, двошарова для будь-яких  $y^+$ , сила тяжіння, Лагранжева багатофазність, модель дискретних елементів DEM, багатофазна взаємодія. В результаті чисельного моделювання руху дрібнозернистого сипкого матеріалу під дією повітряного потоку в програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+ побудовані розподіли їх компонентів в області сепаратора. В якості факторів дослідження прийняті наступні параметри: діаметр частинок ліквідної фракції і домішок  $d$ , швидкість подачі частинок  $f$ , швидкість потоку повітря  $v$ . За результатами обробки отриманого масиву даних в програмному пакеті Wolfram Cloud встановлені закономірності зміни положення лінії перетину розподілу двох фракцій (відстані  $x$ ) і вмісту домішок  $\delta$  в ліквідній зоні сепарації від факторів досліджень. Представлена детальна методика чисельного моделювання може бути використана для дослідження інших способів сепарації дрібнозернистих сипких матеріалів.

**Ключові слова:** сипкий матеріал, частинки, чисельне моделювання, сепарація, метод дискретних елементів, вміст домішок.

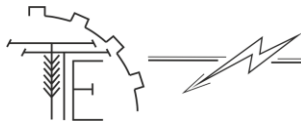
**Ф. 4. Рис. 5. Табл. 3. Літ. 16.**

---

**1. Постановка проблеми**

Аеродинамічна сепарація дрібнозернистого сипкого матеріалу – це процес розділення частинок під дією повітряного потоку. Розділення частинок відбувається за аеродинамічними властивостями, на які впливають їх розмір, форма і щільність [1-2]. Цей процес можна описати за допомогою чисельних методів, зокрема методу обчислення та моделювання фізичних процесів на основі рівнянь Нав'є-Стокса, контактна моделі Джонсона-Кендалла-Роберта, Герца-Міндліна тощо [3-4].

Для чисельного моделювання аеродинамічної сепарації дрібнозернистого сипкого матеріалу можна використовувати різні методи, включаючи методи дискретних елементів методи скінченних елементів та методи обмежених областей. У всіх цих методах рівняння зазначені розв'язуються чисельно, а результати використовуються для визначення траєкторій і швидкостей руху повітря та часток. Основними вхідними параметрами для моделювання аеродинамічної сепарації



дрібнозернистого сипкого матеріалу є властивості матеріалу [5], такі як густина, форма та розмір часток, та параметри повітря [6], такі як швидкість та тиск. Для отримання точних результатів моделювання необхідно враховувати також взаємодію між частками та повітрям.

Отримані результати моделювання можуть бути використані для покращення проектування технологій та обладнання для аеродинамічної сепарації дрібнозернистого сипкого матеріалу, а також для оптимізації процесів виробництва та зниження витрат енергії.

---

## 2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

---

Для того, щоб ефективно розділити частинки за щільністю, потрібно спочатку їх відкалібрувати за геометричними розмірами. Якщо частинка має однакову щільність, то частинки меншої маси будуть летіти далі під впливом повітряного потоку, а частинки більшої маси будуть падати ближче. Однак, орієнтація частинки відносно вектору швидкості повітряного потоку також впливає на її траєкторію руху, оскільки з'являється відповідний діапазон парусності. Залежно від цих факторів, сипкий матеріал може переміщуватись випадковою траєкторією [7].

Однак, для успішного розділення сипкого матеріалу за щільністю потрібно, щоб потік повітря мав рівномірну структуру як за параметрами турбулентності, так і по епюрі швидкості. Для дослідження процесу переміщення частинок сипкого матеріалу під дією повітряного потоку, необхідно враховувати складну взаємодію частинок між собою, що має випадкове початкове положення, та потоку повітря [8]. Це може бути вирішено за допомогою фізико-математичного апарату переміщення матеріальної точки під дією різноманітних сил, а також застосуванням класичних задач газодинаміки двофазних потоків [9-10]. Ці підходи дозволять ефективно розділити частинки сипкого матеріалу за щільністю та забезпечити якісний результат.

Система диференціальних рівнянь процесу переміщення частинок сипкого матеріалу в повітряному потоці в загальному вигляді не вирішується аналітичними методами. Дослідженнями [11- 13] запропоновано вирішення подібних систем методом кінцевих елементів, який реалізовано при моделюванні в програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+.

Сам процес моделювання може здійснюватися за допомогою різних підходів, і на сьогодні їх класифікація включає наступні методи [14]: емпіричний; аналізу структури потоків матеріалу за допомогою функції розподілення часу перебування часток; механіки суцільних середовищ; ентропійно-інформаційні; статистичні.

Метод дискретних елементів (DEM), на базі якого буде проводитись дослідження, призначений для моделювання гранульованого потоку матеріалів, таких як пісок, частинки їжі, порошки, капсули та суспензії. Ці потоки характеризуються високою щільністю частинок, де важлива взаємодія між ними [15]. Встановлена Кандаллом і Страком, модель DEM розширює формулювання Лагранжа, щоб врахувати взаємодію між частинками в рівняннях руху частинок [16]. Частинки DEM можуть приймати різні форми та об'єми.

Simcenter STAR-CCM+ моделює частинки DEM на основі складу пружних частинок, у якому вони можуть перекриватися. Розрахована контактна сила пропорційна перекриттю, а також матеріалу частинок і геометричним властивостям. Ця контактна сила входить у рівняння імпульсу Лагранжа і характеризує пружно-в'язко-пластичну взаємодію.

Враховуючи вищезазначене, чисельне моделювання процесу аеродинамічної сепарації дрібнозернистого сипкого матеріалу будемо проводити в програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+.

---

## 3. Мета досліджень

---

Метою досліджень є моделювання руху дрібнозернистого сипкого матеріалу під дією повітряного потоку і розрахунок параметрів його аеродинамічної сепарації в програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+.

---

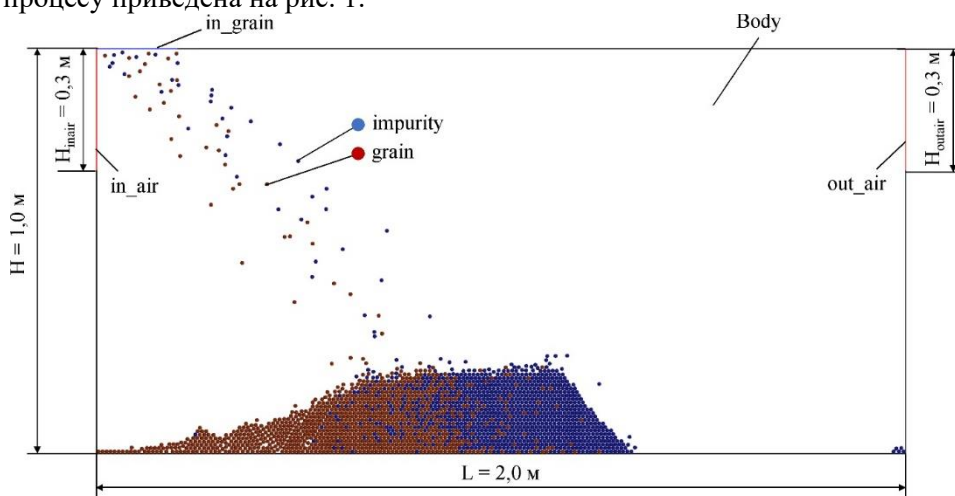
## 4. Виклад основного матеріалу

---

Аеродинамічна сепарація сипкого матеріалу відбувається в прямокутній області. Подача сипкого матеріалу здійснюється із зони in\_grain. Подача повітря здійснюється із зони in\_air. Зона out\_air є відкритою для потоку повітря. Приймаємо, що сипкий матеріал складається із ліквідної фракції (grain) і домішок (impurity). Приймаємо, що геометричні розміри і фізико-механічні властивості ліквідної фракції і домішок є однаковими: коефіцієнт Пуассона (Poisson's Ratio) – 0,2, модуль Юнга (Young's Modulus) – 10,0 МПа. Відрізняються ці два компонента щільністю (Density): для



ліквідної фракції (grain) –  $1000 \text{ кг/м}^3$ , домішок (impurity) –  $500 \text{ кг/м}^3$ . Розрахункова схема і геометричні розміри області процесу приведена на рис. 1.



**Рис. 1. Розрахункова схема дослідження аеродинамічної сепарації дрібнозернистого сипкого матеріалу**

В якості моделей сітки були обрані наступні: тример (Trimmer), генератор поверхневої сітки (Surface Remesher). Базовий розмір сітки (Base Size) складав  $0,01 \text{ м}$ . Після генерації об'ємної сітки, її було перетворено у плоску сітку.

В якості фізичних моделей були обрані наступні: газ (Gas), двовимірний (Two Dimensional), роздільна течія (Segregated Flow), градієнти (Gradients), ідеальний газ (Ideal Gas), ізотермічне рівняння енергії рідини (Segregated Fluid Isothermal), нестационарний неявний (Implicit Unsteady), турбулентний (Turbulent), осереднення по Рейнольдсу рівняння Нав'є-Стокса (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), К-Epsilon модель турбулентності (K-Epsilon Turbulence), допустима двошарова К-Epsilon (Realizable K-Epsilon Two-Layer), дистанція стінки (Wall Distance), двошарова для будь-яких  $y^+$  (Two-Layer All  $y^+$  Wall Treatment), сила тяжіння (Gravity), Лагранжева багатофазність (Lagrangian Multiphase), Модель дискретних елементів DEM (Discrete Element Model DEM), багатофазна взаємодія (Multiphase Interaction).

В якості Лагранжевої фази (Lagrangian Phases) задано ліквідна фракція (grain) і домішки (impurity) з наступними моделями: частинка DEM (DEM Particles), сила градієнта тиску (Pressure Gradient Force), сферичні частинки (Spherical Particles), суцільна (Solid), постійна щільність (Constant Density), сила опору (Drag Force).

Створені всі можливі взаємодії компонентів між собою і стінками області: ліквідна фракція – ліквідна фракція (grain-grain), ліквідна фракція – домішка (grain-impurity), ліквідна фракція – стінка (grain-wall 1), домішка – стінка (impurity-wall 1). В якості моделей обрані наступні: фазова взаємодія DEM (DEM Phase Interaction), Hertz Mindlin, опір кочення (Rolling Resistance).

Для області моделювання (Body) обрано тип рідка область (Fluid Region).

Тип границі in\_air – швидкість на вході (Velocity Inlet). Умови для фаз (Phase Conditions) – непроникні для фаз (Phase Impermeable). Амплітуда швидкості (Velocity Magnitude) – фактор досліджень.

Тип границі out\_air – тиск на виході (Pressure Outlet). Умови для фаз (Phase Conditions) – непроникні для фаз (Phase Impermeable).

Для подачі компонентів сипкого матеріалу створено два інжектора: інжектор ліквідної фракції (Injector grain) і інжектор домішок (Injector impurity). Інжектори мають тип поверхневого інжектора (Surface Injector) на границю Body: in\_grain. Умова швидкості течії (Flow Rate Specification) – швидкість частинок (Particle Flow Rate), випадкове упорскування (Random Injection) увімкнено. Діаметр частинок (Particle Diameter) – фактор досліджень. Швидкість частинок (Particle Flow Rate) – підпорядковується умові  $\$Time < 10 ? v : 0$  (де  $v$  – фактор досліджень).

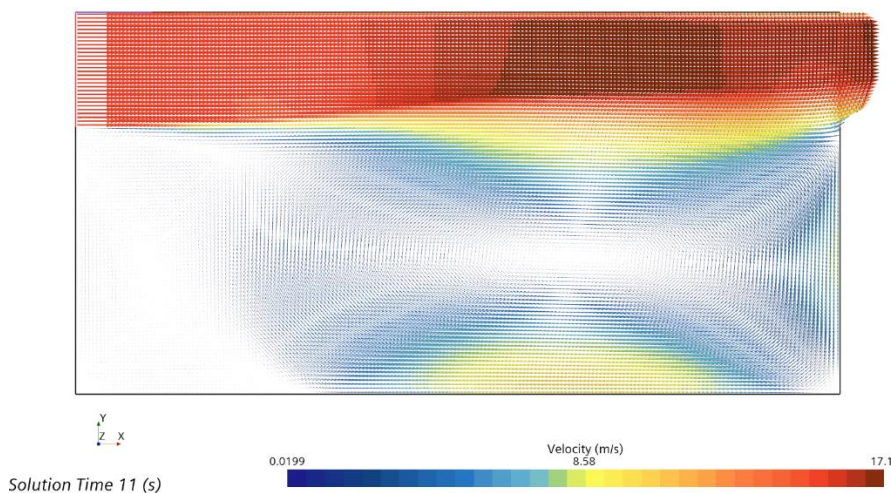
Параметри вирішувача (Solvers): шаг за часом (Time-Step) –  $0,01 \text{ с}$ . Параметри критерію зупинки (Stopping Criteria): Максимальний фізичний час (Maximum Physical Time) –  $11 \text{ с}$ . Maximum Steps – вимкнено.

В результаті моделювання було створено дві сцени відображення результатів і графік розподілу



компонентів сипкого матеріалу в області.

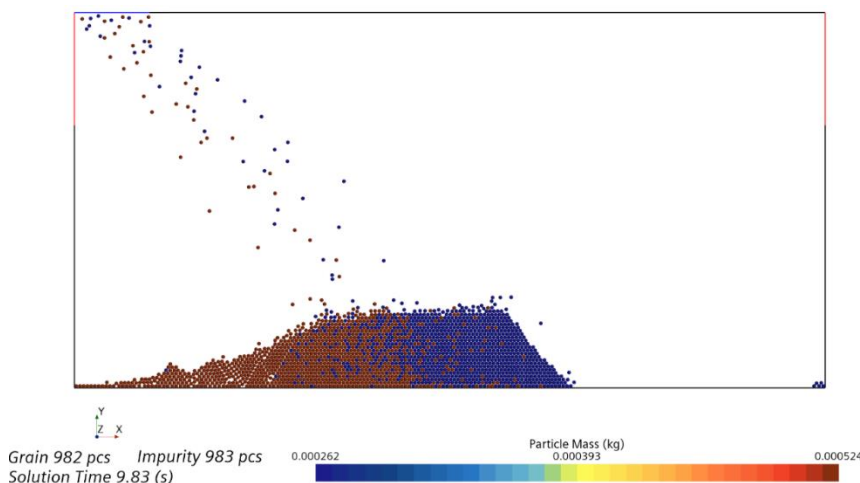
Сцена відображення розподілу швидкості потоку повітря виглядала, як показано на рис. 2. Сцена – векторна. Функція – Velocity. На сцені відображається анотація (Annotations): Solution Time – час моделювання.



**Рис. 2. Сцена відображення розподілу швидкості потоку повітря**

Сцена відображення розподілу компонентів сипкого матеріалу наведена на рис. 3. Сцена – скалярна. Функція – Particle Mass. На сцені відображається анотація (Annotations): Solution Time – час моделювання, grain – число частинок ліквідної фракції, impurity – число частинок домішок. Анотації grain і impurity створювалися користувачем із створеного звіту.

Для подальшої оцінки процесу створено два звіти. Перший звіт – grain – звіт числа елементів (Element Count). Частина (Parts) – зерно (grain). З цього звіту створювалася анотація (Annotations) – grain. В параметрах тексту (Text) було вказано Grain \$grainReport pcs. Аналогічним чином створювався звіт impurity.



**Рис. 3. Візуалізація процесу аеродинамічної сепарації дрібнозернистого сипкого матеріалу**

Для відображення розподілу створено графік distribution. Тип графіка – рисунок діаграми (Histogram Plot). В якості частин рисунку обрані Лагранжеві фази ліквідна фракція (grain) і домішки (impurity). Графік distribution налаштовується таким чином щоб його вигляд був, як на рис. 3.

В якості першого критерію оцінки процесу обрано відстань розмежування  $x$  між розподілами ліквідної фракції і домішок (рис. 3). В якості другого критерію обрано кількісний вміст домішок  $\delta$  в області від 0 до  $x$  по відношенню до загальної кількості компонентів дрібнозернистого сипкого матеріалу в зазначені області (рис. 3):  $\delta = N_{\text{impurity}} / (N_{\text{grain}} + N_{\text{impurity}})$ .

Для розрахунку зазначених показників було імпортовано отримані дані в формат .csv із зазначенням способу розділення – табуляція (tab). Далі отримані дані були оброблені в програмному пакеті Excel і визначені значення  $x$  і  $\delta$ .



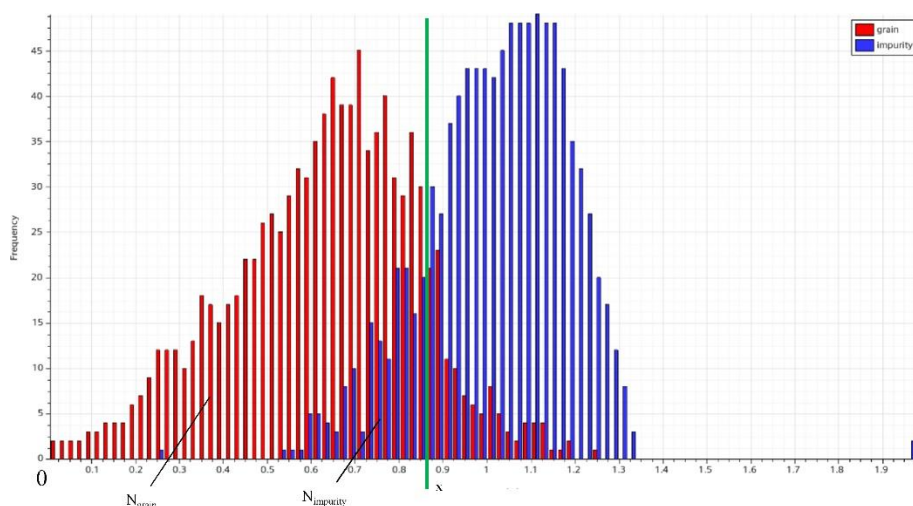


Рис. 3. Графік розподілу компонентів дрібнозернистого сипкого матеріалу в області

В якості факторів дослідження прийняті наступні параметри: діаметр частинок ліквідної фракції і домішок (Particle Diameter)  $d$ , швидкість подачі частинок (Particle Flow Rate)  $f$ , швидкість потоку повітря (Velocity Magnitude)  $v$ . Рівні і межі варіювання факторами в залежності приведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Рівні і межі варіювання факторами досліджень**

| Діаметр компонентів |         | Швидкість подачі частинок |            | Швидкість потоку повітря |           |
|---------------------|---------|---------------------------|------------|--------------------------|-----------|
| $x_1$               | $d$ , м | $x_2$                     | $f$ , шт/с | $x_3$                    | $v$ , м/с |
| -1                  | 0,007   | -1                        | 100        | -1                       | 10        |
| 0                   | 0,010   | 0                         | 150        | 0                        | 15        |
| 1                   | 0,013   | 1                         | 200        | 1                        | 20        |

Планом досліджень передбачено варіювання трьома рівнями за трьома факторами досліджень. Загальна кількість дослідів при цьому  $3^3 = 27$ .

Для кожного дослідів розраховані значення відстані  $x$  і вмісту домішок  $\delta$ .

Провівши моделювання і склавши програму в Wolfram Cloud розраховані рівняння регресії зміни відстані  $x$  і вмісту домішок  $\delta$  від факторів досліджень в закодованому вигляді

$$x = 0,652741 - 0,111539 x_1 + 0,0473944 x_1^2 + 0,0160111 x_2 + 0,0364833 x_1 x_2 + 0,00247778 x_2^2 + 0,153061 x_3 - 0,044725 x_1 x_3 - 0,0324333 x_2 x_3 - 0,0000722222 x_3^2, \quad (1)$$

$$\delta = 0,198095 + 0,0916882 x_1 + 0,0243135 x_1^2 + 0,0555662 x_2 + 0,0194443 x_1 x_2 + 0,00892996 x_2^2 - 0,00809424 x_3 - 0,0575012 x_1 x_3 - 0,0107215 x_2 x_3 + 0,0260484 x_3^2. \quad (2)$$

Дані статистичної обробки рівняння (1) і (2), які отримані в Wolfram Cloud приведені в табл. 2 і 3 відповідно.

Таблиця 2

**Дані статистичної обробки рівняння (1)**

| Коефіцієнт рівняння | Оцінка        | Стандартна помилка | Критерій Стюдента | P-рівень значущості      |
|---------------------|---------------|--------------------|-------------------|--------------------------|
| $a_{00}$            | 0,652741      | 0,0258305          | 25,2701           | $6,35227 \cdot 10^{-15}$ |
| $a_{10}$            | -0,111539     | 0,0119572          | -9,32817          | $4,24837 \cdot 10^{-8}$  |
| $a_{20}$            | 0,0160111     | 0,0119572          | 1,33903           | 0,19819                  |
| $a_{30}$            | 0,153061      | 0,0119572          | 12,8007           | $3,72262 \cdot 10^{-10}$ |
| $a_{12}$            | 0,0364833     | 0,0146445          | 2,49126           | 0,0233617                |
| $a_{13}$            | -0,044725     | 0,0146445          | -3,05404          | 0,00717692               |
| $a_{23}$            | -0,0324333    | 0,0146445          | -2,21471          | 0,0407277                |
| $a_{34}$            | 0,0473944     | 0,0207105          | 2,28843           | 0,03519                  |
| $a_{11}$            | 0,00247778    | 0,0207105          | 0,119639          | 0,906172                 |
| $a_{22}$            | -0,0000722222 | 0,0207105          | -0,00348723       | 0,997258                 |
| $a_{33}$            | 0,652741      | 0,0258305          | 25,2701           | $6,35227 \cdot 10^{-15}$ |



Таблиця 3

## Дані статистичної обробки рівняння (2)

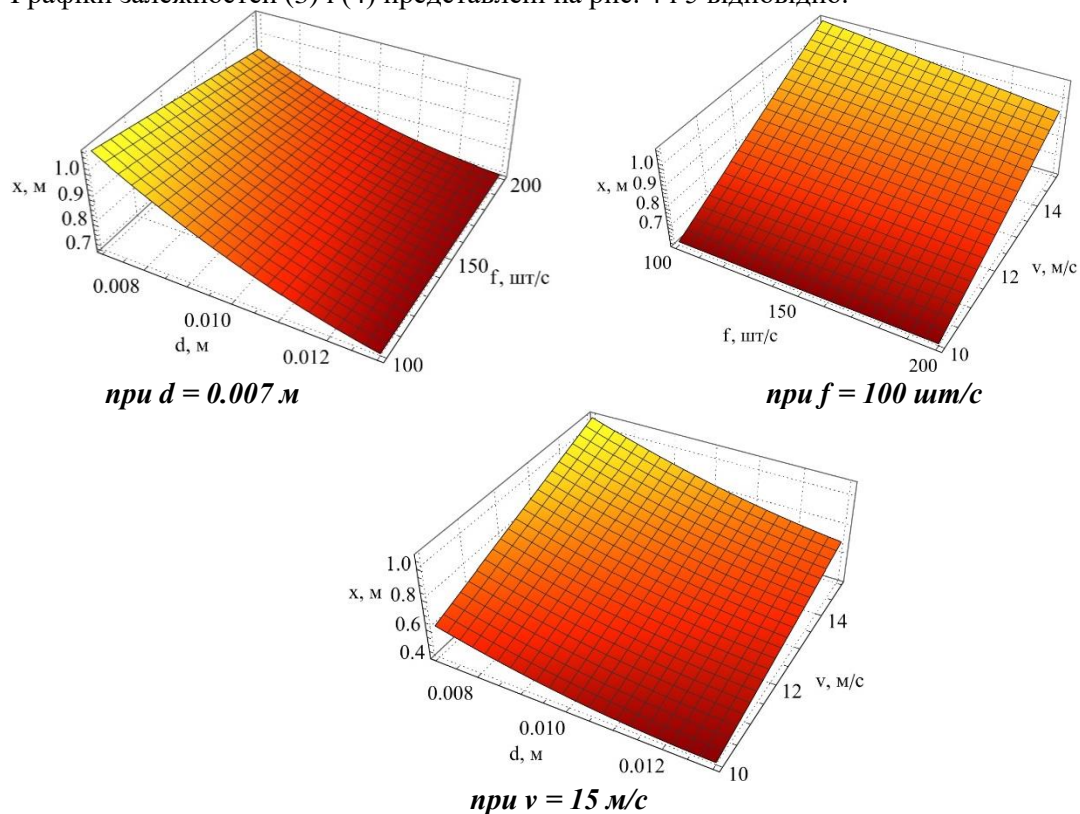
| Коефіцієнт рівняння | Оцінка      | Стандартна помилка | Критерій Стюдента | P-рівень значущості      |
|---------------------|-------------|--------------------|-------------------|--------------------------|
| $a_{00}$            | 0,198095    | 0,0160174          | 12,3674           | $6,33466 \cdot 10^{-10}$ |
| $a_{10}$            | 0,0916882   | 0,00741464         | 12,3658           | $6,3472 \cdot 10^{-10}$  |
| $a_{20}$            | 0,0555662   | 0,00741464         | 7,49412           | $8,77933 \cdot 10^{-7}$  |
| $a_{30}$            | -0,00809424 | 0,00741464         | -1,09166          | 0,290214                 |
| $a_{12}$            | 0,0194443   | 0,00908104         | 2,14119           | 0,0470415                |
| $a_{13}$            | -0,0575012  | 0,00908104         | -6,332            | $7,5096 \cdot 10^{-6}$   |
| $a_{23}$            | -0,0107215  | 0,00908104         | -1,18064          | 0,254001                 |
| $a_{11}$            | 0,0243135   | 0,0128425          | 1,8932            | 0,0754818                |
| $a_{22}$            | 0,00892996  | 0,0128425          | 0,695343          | 0,496236                 |
| $a_{33}$            | 0,0260484   | 0,0128425          | 2,02829           | 0,0584973                |

Враховуючи табличне значення критерію Стюдента  $t_{0,05}(27) = 2,05$  отримуємо рівняння зміни відстані  $x$  і вмісту домішок  $\delta$  від факторів досліджень в розкодованому вигляді із виключеними незначущими коефіцієнтами:

$$x = -0,0812469 - 104,442 d + 5266,05 d^2 + 0,000811111 f + 0,243222 d f + 0,159778 v - 5,96333 d v - 0,000259467 f v, \quad (3)$$

$$\delta = -0,386933 + 106,954 d - 0,00018496 f + 0,129628 d f - 0,0275252 v - 7,66682 d v + 0,00416774 v^2. \quad (4)$$

Графіки залежностей (3) і (4) представлені на рис. 4 і 5 відповідно.

Рис. 4. Залежність відстані  $x$  від факторів досліджень

Як видно з рис. 4 із збільшенням швидкості  $v$  відстань  $x$  збільшується, тобто лінія перетину розподілу двох фракцій зміщується вправо. В свою чергу збільшення діаметра  $d$  і швидкості подачі частинок  $f$  призводить до зміщення лінії перетину розподілу двох фракцій вліво.

Рис. 5 демонструє залежність зміни вмісту домішок  $\delta$  від діаметру компонентів  $d$ , швидкості їх подачі  $f$  і швидкості потоку повітря  $v$ . Так із збільшенням зазначених факторів досліджень вміст домішок  $\delta$  збільшується, що негативно впливає на результат сепарації.

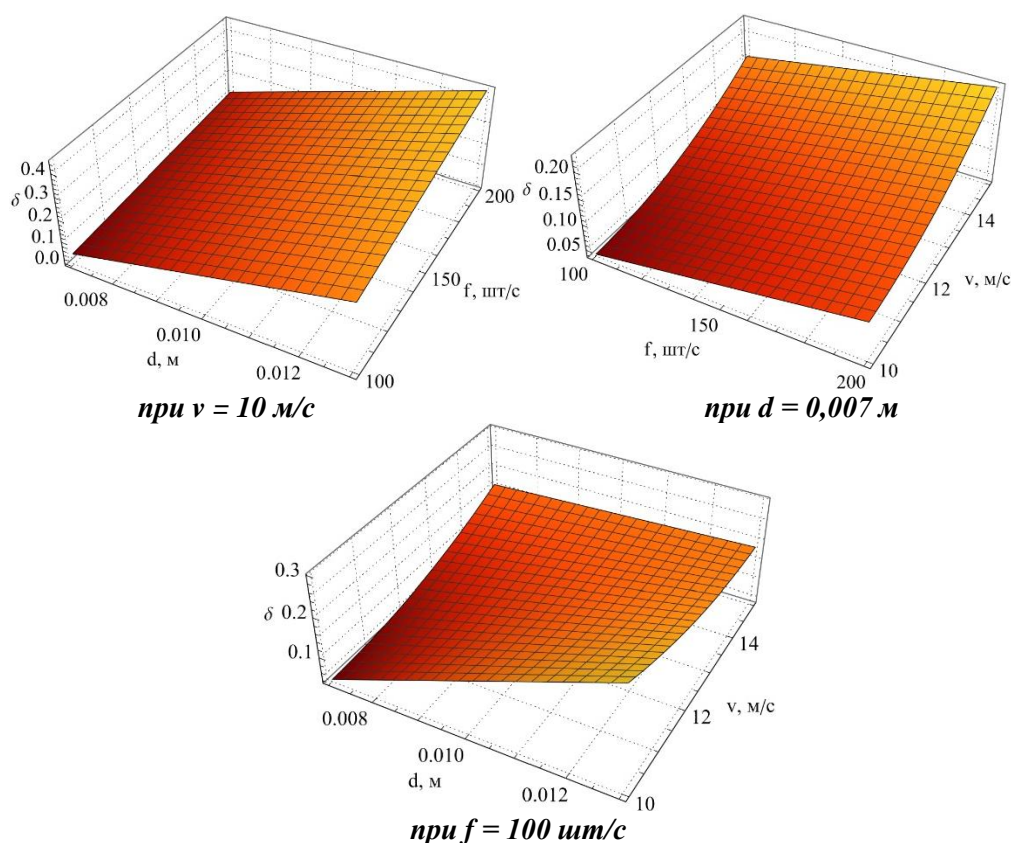


Рис. 5. Залежність вмісту домішок  $\delta$  від факторів досліджень

Рациональні значення факторів досліджень при яких вміст домішок  $\delta$  є найменшим:  $d = 0.007$  м,  $f = 100$  шт/с,  $v = 10$  м/с. При цьому  $x = 0,618$  м.

## 5. Висновки

В результаті чисельного моделювання руху дрібнозернистого сипкого матеріалу під дією повітряного потоку в програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+ побудовані розподіли їх компонентів в області сепаратора. В якості факторів дослідження прийняті наступні параметри: діаметр частинок ліквідної фракції і домішок  $d$ , швидкість подачі частинок  $f$ , швидкість потоку повітря  $v$ . За результатами обробки отриманого масиву даних в програмному пакеті Wolfram Cloud встановлені закономірності зміни положення лінії перетину розподілу двох фракцій (відстані  $x$ ) і вмісту домішок  $\delta$  в ліквідній зоні сепарації від факторів досліджень. Представлена детальна методика чисельного моделювання може бути використана для дослідження інших способів сепарації дрібнозернистих сипких матеріалів.

## Список використаних джерел

1. Котов Б. І. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентильовання, охолодження): колект. монографія. *Нац. акад. аграр. наук України, Нац. наук. центр "Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва"*. Київ ; Ніжин : Лисенко М. М. 2017. 551 с.
2. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Курганський О. В. Математичне моделювання термообробки зерна у вертикальному пневмо каналі при періодичній зміні швидкості теплоносія за висотою. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2016. № 2. С. 76–80.
3. Алієв Е. Б. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: *STATYC*. 2019. 196 с. ISBN 978-617-7759-32-3.
4. Степаненко С. П. Механіко-технологічне обґрунтування процесів і обладнання безрешітного фракціонування зернових матеріалів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Глеваха. 2020. 362 с.
5. Алієв Е. Б., Шевченко І. А. Дослідження аеродинамічних властивостей насіння олійних культур. *Вісник аграрної науки*. 2017. № 3 (769). С. 63–65.
6. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Степаненко С. П., Швидя В. О., Лісецький В. О. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація,



- сушіння, активне вентилявання, охолодження) : монографія. Ніжин. 2017. 552 с.
7. Алієв Е. Б., Гаврильченко О. С. Обґрунтування автоматизованої системи керування потоком повітря в аеродинамічному сепараторі насіннєвого матеріалу. Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві. *Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. Харків. 2019. Вип. 201. С. 132–140.
  8. Gary W. Delaney, Paul W. Cleary, Marko Hilden, Rob D. Morrison. Validation of dem predictions of granular flow and separation efficiency for a horizontal laboratory scale wire mesh screen. Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO. Melbourne, Australia. 9-11 December. 2009. P 1-6
  9. Hans, J. Herrmann. (1993). Molecular dynamics simulations of granular materials. *International Journal of Modern Physics C*. Vol. 4. No. 2. P. 309–316
  10. Ferrara, G., Preti, U., Schena, G. D. Computer-aided Use of a Screening Process Model. APCOM 87. *Proceeding of the Twentieth International Symposium on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industries*. Volume 2: Metallurgy. Johannesburg, SAIMM. 1987. P. 153–166
  11. Dominik Kubicki, Simon Lo. Slurry transport in a pipeline – Comparison of CFD and DEM models. *Ninth International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*. CSIRO, Melbourne, Australia (10-12 December 2012). 2012. P. 1–6.
  12. Sang Won Han, Won Joo Lee, Sang Jun Lee. Study on the Particle Removal Efficiency of Multi Inner Stage Cyclone by CFD Simulation. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2012. Vol. 6. P. 411–415.
  13. Satish G., Ashok Kumar K., Vara Prasad V., Pasha Sk. M. Comparison of flow analysis of a sudden and gradual change of pipe diameter using fluent software. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2013. Vol. 2. P. 41–45
  14. Iguchi Manabu, Ilegbusi Olusegun J. *Basic Transport Phenomena in Materials Engineering*. Springer. 2014. 260 p.
  15. Simcenter STAR-CCM+ (2021). 3. *Verification Suite*. 2021. 333 p.
  16. Johnson K. L. *Contact Mechanics*. Cambridge University Press. 1987. 434 p.

### References

- [1] Kotov, B. I. (2017). *Modelyuvannya tekhnologichnykh protsesiv v typovykh ob'ektakh pislyazbyral'noyi obrobky i zberihannya zerna (ochyshchennya, separatsiya, sushynnya, aktyvne ventylyuvannya, okholodzhennya): kolekt. monohrafiya*. Nats. akad. ahrar. nauk Ukrayiny, Nats. nauk. tsentr "In-t mekhanizatsiyi ta elektryfikatsiyi sil. hosp-va". Kyiv ; Nizhyn : Lysenko M. M. [in Ukrainian].
- [2] Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A., Kurhans'kyi, O. V. (2016). Matematychno modelyuvannya termoobrobky zerna u vertykal'nomu pnemo kanali pry periodychniy zmini shvydkosti teplonosiya za vysotoyu. *Promyslova hidravlika i pnevmatyka*, 2, 76–80. [in Ukrainian].
- [3] Aliyev, E. B. (2019). *Physico-mathematical models of processes of precision separation of sunflower seed material: monograph*. Zaporizhzhia: STATUS. ISBN 978-617-7759-32-3. [in Ukrainian].
- [4] Stepanenko, S. P. (2020). Mekhaniko-tekhnologichne obgruntuvannya protsesiv i obladnannya bezreshitnoho fraktsionuvannya zernovykh materialiv. *Doktors'ka dysertatsiia [Doctoral dissertation]*. 05.05.11. Hlevakha. [in Ukrainian].
- [5] Aliyev, E. B., Shevchenko, I. A. (2017). Doslidzhennia aerodynamichnykh vlastyvostei nasinnia oliinykh kultur. *Visnyk ahrarnoi nauky*, 3 (769), 63–65. [in Ukrainian].
- [6] Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A., Stepanenko, S. P., Shvydia, V. O., Lisetskyi, V. O. (2017). *Modelyuvannya tekhnologichnykh protsesiv v typovykh ob'ektakh pislyazbyral'noi obrobky i zberihannya zerna (separatsiia, sushynnya, aktyvne ventylyuvannya, okholodzhennya): monohrafiia*. Nizhyn. [in Ukrainian].
- [7] Aliyev, E. B., Gavrilchenko, O. S. (2019). Justification of the automated air flow control system in the aerodynamic separator of seed material. Modern problems of improving technical systems and technologies in animal husbandry. *Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasilenko*, 201, 132–140. [in Ukrainian].
- [8] Gary, W. Delaney, Paul, W. Cleary, Marko Hilden, Rob, D. Morrison. (2009). Validation of dem predictions of granular flow and separation efficiency for a horizontal laboratory scale wire mesh screen. Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO. Melbourne, Australia. 9-11 December. 1-6 [in English].
- [9] Hans, J. Herrmann. (1993). Molecular dynamics simulations of granular materials. *International Journal of Modern Physics C*, 4, 2. 309–316 [in English].
- [10] Ferrara, G., Preti, U., Schena, G. D. (1987). Computer-aided Use of a Screening Process Model. APCOM 87. *Proceeding of the Twentieth International Symposium on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industries*. Volume 2: Metallurgy. Johannesburg, SAIMM. 153–166 [in English].





- [11] Dominik Kubicki, Simon Lo. (2012). Slurry transport in a pipeline – Comparison of CFD and DEM models. *Ninth International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*. CSIRO, Melbourne, Australia (10-12 December 2012). 1-6. [in English].
- [12] Sang Won Han, Won Joo Lee, Sang Jun Lee. (2012). Study on the Particle Removal Efficiency of Multi Inner Stage Cyclone by CFD Simulation. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 6, 411–415 [in English].
- [13] Satish, G., Ashok Kumar, K., Vara Prasad, V., Pasha Sk., M. (2013). Comparison of flow analysis of a sudden and gradual change of pipe diameter using fluent software. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2, 41–45 [in English].
- [14] Iguchi Manabu, Ilegbusi Olusegun J. (2014). *Basic Transport Phenomena in Materials Engineering*. Springer. [in English].
- [15] Simcenter STAR-CCM+ (2021). *3. Verification Suite*. [in English].
- [16] Johnson, K. L. (1987). *Contact Mechanics*. Cambridge University Press. [in English].

### NUMERICAL SIMULATION OF THE PROCESS OF AERODYNAMIC SEPARATION OF FINE-GRAINED BULK MATERIAL

Various methods can be used to numerically simulate the aerodynamic separation of fine-grained bulk material, including discrete element methods, finite element methods, and bounded domain methods. In all these methods, these equations are solved numerically, and the results are used to determine the trajectories and velocities of air and particles. The Discrete Element Method (DEM), on the basis of which the study will be conducted, is designed for modeling the granular flow of materials. The purpose of the research is to simulate the movement of fine-grained loose material under the influence of air flow and calculate the parameters of its aerodynamic separation in the Simcenter STAR-CCM+ software package. The following were selected as physical models: gas, two-dimensional, separated flow, gradients, ideal gas, isothermal fluid energy equation, unsteady implicit, turbulent, Reynolds averaging of the Navier-Stokes equation, K-Epsilon turbulence model, admissible two-layer K-Epsilon, wall distance, double layer for any  $y^+$ , gravity, Lagrangian multiphase, DEM discrete element model, multiphase interaction. As a result of the numerical simulation of the movement of fine-grained loose material under the influence of the air flow in the Simcenter STAR-CCM+ software package, the distribution of their components in the area of the separator was constructed. The following parameters were adopted as research factors: the diameter of the particles of the liquid fraction and impurities  $d$ , the particle supply speed  $f$ , the air flow speed  $v$ . Based on the results of the processing of the obtained data set in the Wolfram Cloud software package, the patterns of changes in the position of the intersection line of the distribution of two fractions (distance  $x$ ) and the content of impurities  $\delta$  in the liquid zone of separation from research factors were established. The presented detailed method of numerical modeling can be used to study other methods of separation of fine-grained loose materials.

**Key words:** loose material, particles, numerical simulation, separation, method of discrete elements, content of impurities.

**F. 4. Fig. 5. Table 3. Ref. 16.**

### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Алієв Ельчин Бахтияр огли** – доктор технічних наук, старший дослідник, професор кафедри механізації виробничих процесів у тваринництві Дніпровського державного аграрно-економічного університету (вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, Україна, 49000, e-mail: aliev@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4006-8803>)

**Бабин Ігор Анатолійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: ihorbabyn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7070-4957>)

**Сокол Сергій Петрович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри тракторів і сільськогосподарських машин Дніпровського державного аграрно-економічного університету (вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, Україна, 49000, e-mail: sokol.sp.63@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1716-6651>)

**Elchyn Aliiev** – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Professor of the Departments of Mechanization of Production Processes in Animal Husbandry of Dnipro State Agrarian and Economic University (St. S. Efremova, 25, Dnipro, Ukraine, 49000, e-mail: aliev@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4006-8803>).

**Ihor Babyn** – Ph.D., Associate Professor of the Department of machinery and equipment for agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: ihorbabyn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7070-4957>).

**Serhiy Sokol** – Ph.D., Associate Professor of the tractors and agricultural machines of Dnipro State Agrarian and Economic University (St. S. Efremova, 25, Dnipro, Ukraine, 49000, e-mail: sokol.sp.63@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1716-6651>).