

**Яропуд В.М.**

к.т.н., доцент

**Дацюк Д.А.**

аспірант

*Вінницький національний  
аграрний університет***Теслюк Г.В.**

к.т.н., доцент

*Дніпровський державний  
аграрно-економічний  
університет***Yaropud V.**

PhD, associate professor

**Datsiuk D.**

postgraduate

*Vinnitsia National Agrarian  
University***Tesliuk H.**

PhD, associate professor

*Дніпровський державний  
аграрно-економічний  
університет***УДК 631.331****DOI: 10.37128/2306-8744-2023-1-8****ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ  
ДИСКРЕТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У  
МОДЕЛЮВАННІ РУХУ ТА  
УКЛАДАННЯ НАСІННЯ  
ДРІБНОНАСІННЄВИХ КУЛЬТУР**

Сучасні теоретичні дослідження механіко-технологічних процесів переміщення насіння під дією робочих органів технічних засобів зводяться до аналітичних методів, що призводить до складання складних систем диференціальних рівняння із граничними і початковими умовами. Серед сучасних методів комп'ютерного моделювання механіко-технологічних процесів переміщення сипкого середовища (насіннєвої суміші) особливий інтерес представляють методи, що базуються на концепції дискретного представлення речовини – метод динаміки частинок і метод дискретних елементів. Метод дискретних елементів (Discrete Element Method (DEM)) – це інженерний чисельний метод моделювання руху багатьох взаємодіючих дискретних об'єктів, які зазвичай є твердими частинками. Метою досліджень є моделювання руху і укладання насіння дрібнонасіннєвих культур методом дискретних елементів у програмному пакеті CAE-системи Simcenter STAR-CCM+. Фізичними моделями для симуляції в програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+ є: тривимірна модель, нестационарна неявна модель, математична модель однокомпонентного газу (повітря), модель ідеального газу (повітря), модель турбулентної течії повітря, k-ε модель турбулентності повітря, ізотермічне рівняння енергії рідини, усереднене по Рейнольдсу рівняння Нав'є-Стокса, роздільна течія, методи градієнта і границь, Лагранжева модель багатофазного середовища, модель багатофазної взаємодії, модель дискретних елементів (DEM), поле сили тяжіння. За результатами досліджень розроблена математична модель випадкового укладання насіння дрібнонасіннєвих культур у ємності, що дозволила визначити рівняння регресії її щільності від ефективного діаметра насіння і коефіцієнта варіації цього діаметра. Встановлено, що зі зменшенням ефективного діаметра насіння  $D_p$  і збільшення коефіцієнта варіації  $\delta$  спостерігається збільшення щільності випадкового укладання  $\phi$  насіння дрібнонасіннєвих культур сферичної форми у ємності. Це пояснюється тим, що насіння меншого діаметра заповнюють пустоти між насінинами більшого діаметру.

**Ключові слова:** насіння, чисельне моделювання, симуляція, рух, параметри, метод дискретних елементів.

**Вступ.** При посіві дрібнонасінних культур на ділянках сортовипробування і попереднього розмноження велике поширення отримали електромеханічні сівалки [1]. Однак, проблемою їх використання є не достатня рівномірність розподілу насіння вздовж рядка,

що пов'язано з випадковими процесами, які відбуваються під час висіву. Внаслідок чого посіви виходять нерівномірними – із згущенням або розрядженням рослин в рядку що, в кінцевому підсумку, призводить до зниження врожайності селекційноцінних дрібнонасіннєвих



культур.

Висів насіння дрібнонасіненних культур в електромеханічному висівному апараті зводиться до процесу їх дозування і транспортування до насіннепроводу [2, 3]. У більшості конструкцій електромеханічних висівних апаратів насіння вивантажується до ємності висівного апарата, де формується з точки зору математики у випадкову упаковку. Далі з використанням заслінки через дозуючі отвори, що утворилися, насіння потрапляє до розподільниці і переміщується до насіннепроводу. Враховуючи вищезазначене дослідження проводилися з метою розробки моделі випадкової укладання насіння дрібнонасіненних культур у ємності висівного апарата селекційної сівалки.

Сучасні теоретичні дослідження механіко-технологічних процесів переміщення насінин під дією робочих органів технічних засобів зводяться до аналітичних методів, що призводить до складання складних систем диференціальних рівняння із граничними і початковими умовами [4]. Дані системи практично не вирішуються традиційними способами, тому виникає необхідність у їх чисельному рішенні з використанням комп'ютерного моделювання.

Ці чисельні розв'язки є надзвичайно важливими для визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів робочих органів, які діють на насіння. Комп'ютерне моделювання є ефективним інструментом для дослідження цих процесів, оскільки воно дозволяє швидко та точно розрахувати різні варіанти налаштування параметрів, що може допомогти у підвищенні ефективності технологічного процесу та зменшенні витрат на його проведення. Окрім того, комп'ютерне моделювання дає змогу досліджувати вплив різних факторів на процес переміщення насінин і знаходити оптимальні рішення для покращення його результативності [5].

Чисельне моделювання механіко-технологічних процесів забезпечує можливість вивчення процесів, які є складними для аналітичного аналізу. Наприклад, розрахунок процесу переміщення насіння з урахуванням нестационарних режимів роботи технічного засобу, таких як змінний тиск, швидкість руху тощо, можливий лише з використанням чисельних методів [6].

Застосування комп'ютерного моделювання механіко-технологічних процесів переміщення насіння є особливо важливим в сучасних умовах, коли промисловість використовує все більше автоматизованих процесів та технічних засобів. Отже, забезпечення якості та ефективності цих

процесів є важливим завданням, досягнення якого можливе шляхом застосування комп'ютерного моделювання.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Серед сучасних методів комп'ютерного моделювання механіко-технологічних процесів переміщення сипкого середовища (насіневої суміші) особливий інтерес представляють методи, що базуються на концепції дискретного представлення речовини – метод динаміки частинок і метод дискретних елементів. Метод динаміки частинок полягає у представленні середовища у вигляді сукупності взаємодіючих частинок – матеріальних точок або твердих тіл. Їх рух описується рівняннями класичної механіки. При моделюванні руху частинок за допомогою методу динаміки частинок на кожному кроці ітераційними методами вирішується задача Коші – інтегруються диференціальні рівняння при заданих початкових умовах. Найбільш відомі програми, для розрахунків за допомогою методу динаміки частинок – AMBER, CHARMM, GROMACS, GROMOS, NAMD [7].

Метод дискретних елементів (Discrete Element Method (DEM)) – це інженерний чисельний метод моделювання руху багатьох взаємодіючих дискретних об'єктів, які зазвичай є твердими частинками. Метод дискретних елементів може розглядатися як узагальнення методу кінцевих елементів. При моделюванні процесу цим методом задаються початкові положення і швидкості частинок. Далі, виходячи з цих початкових даних, заданих фізичних законів взаємодії частинок, обчислюються сили, що діють на кожну частинку. При цьому можна враховувати різні закони взаємодії; достатньо, щоб для їх опису існували розв'язні рівняння. Для кожної частки обчислюється результуюча сила і також вирішується задача Коші на вибраному відрізку часу. В результаті виходять початкові дані для наступного кроку [8].

Хоча моделювання DEM вимагає значної обчислювальної потужності, він забезпечує детальну роздільну здатність, якої інші методи не можуть досягти. Створена Кандамом і Страком, модель DEM є розширенням методології моделювання Лагранжа для включення щільних потоків частинок. Відмінною характеристикою DEM є те, що контактні сили між частинками включені в рівняння руху. Ці сили не можна ігнорувати для сильно навантажених потоків, тобто багатьох взаємодіючих частинок.

Найбільш відомі такі програми, що реалізують метод дискретних елементів: Chute Maven (Hustrulid Technologies Inc.), PFC2D і PFC3D, EDEM (DEM Solutions Ltd.), GROMOS 96, ELFEN, MIMES, PASSAGE, Simcenter STAR-CCM+ [9-10]. Метод дискретних елементів



базується на законах збереження імпульсу і моменту імпульсу для Лагранжевих моделей багатофазного середовища [11]. Однак для побудови фізико-математичної моделі необхідно прийняти припущення про те, що частинки компонентів представляються у вигляді кульок з визначеною густиною і ефективним діаметром.

**Мета та завдання дослідження.**

Метою досліджень є моделювання руху і укладання насіння дрібнонасінневих культур методом дискретних елементів в програмному пакеті CAE-системи Simcenter STAR-CCM+.

**Методика досліджень.** Чисельне моделювання процесу моделювання руху і укладання насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур буде проводитися у програмному пакеті CAE-системи Simcenter STAR-CCM+.

**Результати досліджень.**

Геометричну форму насіння дрібнонасінневих культур (ріпак, гірчиця, рижій, просо та ін.) будемо апроксимувати у вигляді куль з ефективним діаметром  $D$ . Згідно попередніх досліджень [12-13] навіть відкалібрована насіннева суміш містить насінини із різним ефективним діаметром. Тому приймаємо, що ефективний діаметр насіння підпорядковується нормальному розподілу і характеризується густиною ймовірності:

$$f(D, D_\mu, \sigma_D) = \frac{1}{\sigma_D \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(D - D_\mu)^2}{2\sigma_D^2}\right), \quad (1)$$

де  $D_\mu$  – середнє значення ефективного діаметра насіння, м;

$\sigma_D$  – середнє квадратичне відхилення ефективного діаметра насіння, м.

При цьому насінини можуть мати ефективний діаметр, який знаходиться в діапазоні  $D \in [D_{\min}; D_{\max}]$ , де  $D_{\min}$  – мінімальне значення ефективного діаметра, м;  $D_{\max}$  – максимальне значення ефективного діаметра, м.

Приймаючи, що густина насінин є однаковою і дорівнює  $\rho$ , маса 1000 насінин визначається за формулою:

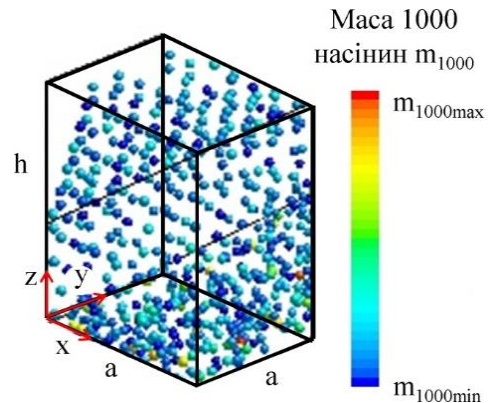
$$m_{1000} = \frac{500}{3} \rho \pi D^3, \quad (2)$$

де  $\rho$  – густина насінин, кг/м<sup>3</sup>.

Ємність має вигляд прямокутного паралелепіпеда висотою  $h$ , основа якого є квадрат з бічною стороною –  $a$ .

Генерація випадкового укладання полягає в послідовному запуску насіння сферичної форми зі випадково обраної координатою на верхній грані ємності (рис. 1) в напрямку її дна. Початкова швидкість осідання для всіх частинок задається однаковою. Для випадкової генерації насінин приймаємо, що

верхня площина ємності розділена на  $N_G = 4a^2/(\pi D^2)$  комірок однакових розмірів. В даних комірках генеруються (1) або не генерується (0) насінини. Ймовірності генерації насінини в кожній комірці дорівнює 0,5.



**Рис. 1. Моделювання заповнення ємності сферичними насінинами**

Надалі виконується стеження за рухом запущених насінин. Щоб виключити розрахунок руху насінини від верхньої межі ємності до першого її контакту з вже сформованою упаковкою, запуск насінини реально проводиться з деякою точки всередині ємності над упаковкою, в якій насінини, що рухається, досить близько знаходиться від рівня укладання. Координата  $z'$  підконтрольної насінини приймає значення  $z' = z + D_1/2 + D_2/2$ , де  $z$  – координата центру найвищої насінини з числа насінини, що осіли на дно ємності;  $D_1$  – діаметр насінини, що рухається і  $D_2$  – діаметр насінини з упаковки з центром в  $z$ . Координати  $x'$  і  $y'$  визначаються генератором випадкових чисел, який з однаковою ймовірністю приймає значення від  $0,5a - (\lambda - D_1/2)$  до  $0,5a + (\lambda - D_1/2)$ , де  $\lambda$  – наперед задане число між  $D_{\min}/2$  і  $D_{\max}/2$ . Установка числа  $\lambda$  дозволяє задавати розмір джерела запуску насінин. При  $\lambda = D_1/2$  насінин, які запускаються, знаходяться на лінії  $x' = 0,5a$  і  $y' = 0,5a$ .

При зіткненні насінини з насіниною, які знаходиться в упаковці відбувається пружино-демпферний контакт. Припускається, що на насінину можуть діяти такі сили:

– сила тяжіння [14]:

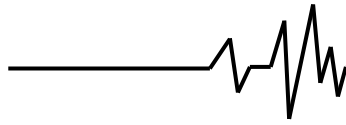
$$\vec{F}_g = \pi D^3 \rho g / 6, \quad (3)$$

де  $\vec{F}_g$  – вектор сили тяжіння, Н.

– сумарна сила контактної взаємодії насінин між собою і стінкою, яка базується на пружино-демпферній контактній моделі Герца-Міндліна [15-16]:

$$\vec{F}_{\text{contact}} = \vec{F}_n + \vec{F}_t, \quad (4)$$

де  $\vec{F}_{\text{contact}}$  – зусилля взаємодії між



насінинами і стінкою, Н;

$\bar{F}_n$  – нормальна складова зусилля, Н;

$\bar{F}_t$  – тангенціальна складова зусилля,

Н.

Нормальна складова сили визначається рівнянням:

$$\bar{F}_n = -K_n \bar{d}_n - N_n \bar{V}_n, \quad (5)$$

де  $K_n$  – нормальний коефіцієнт жорсткості пружної складової, кг/с<sup>2</sup>;

$$K_n = \frac{4}{3} E_{eq} \sqrt{d_n R_{eq}}, \quad (6)$$

де  $N_n$  – нормальний коефіцієнт згасання демпферної складової, кг/с;

$$N_n = \sqrt{(5K_n M_{eq})} N_{n \text{ damp}}. \quad (7)$$

Згідно досліджень [15-16] тангенціальна складова сили визначається, як

$$\bar{F}_t = -K_t \bar{d}_t - N_t \bar{V}_t, \quad (8)$$

якщо  $|K_t \bar{d}_t| < |K_n \bar{d}_n| C_{fs}$ , де  $C_{fs}$  – статистичний коефіцієнт тертя між насінинами, або стінкою. В іншому випадку тангенціальна складова сили визначається таким рівнянням:

$$\bar{F}_t = |K_n \bar{d}_n| C_{fs} \bar{d}_t / |\bar{d}_t|, \quad (9)$$

де  $K_t$  – тангенціальний коефіцієнт жорсткості пружної складової, кг/с<sup>2</sup>;

$$K_t = 8G_{eq} \sqrt{d_t R_{eq}}, \quad (10)$$

де  $N_t$  – тангенціальний коефіцієнт згасання демпферної складової, кг/с;

$$N_t = \sqrt{(5K_t M_{eq})} N_{t \text{ damp}}, \quad (11)$$

де  $N_{damp}$  – коефіцієнт загасання

$$N_{damp} = -\ln(C_{n \text{ rest}}) / \sqrt{\pi^2 + \ln(C_{n \text{ rest}})^2}, \quad (12)$$

де  $R_{eq}$  – еквівалентний радіус двох насінин А і В, м;

$$R_{eq} = \left( \frac{2}{D_A} + \frac{2}{D_B} \right)^{-1}, \quad (13)$$

де  $M_{eq}$  – еквівалентна маса двох насінин А і В, кг;

$$M_{eq} = \left( \frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{-1}, \quad (14)$$

де  $E_{eq}$  – еквівалентний модуль Юнга двох насінин А і В, Па;

$$E_{eq} = \left( \frac{1-v_A^2}{E_A} + \frac{1-v_B^2}{E_B} \right)^{-1}, \quad (15)$$

де  $G_{eq}$  – еквівалентний модуль зсуву двох насінин А і В, Па;

$$G_{eq} = \left( \frac{2(2-v_A)(1+v_A)}{E_A} + \frac{2(2-v_B)(1+v_B)}{E_B} \right)^{-1}, \quad (16)$$

де  $M_A, M_B$  – маси насінин А і В, кг;

$d_n, d_t$  – віртуальне перекриття насінин А і В в нормальному і тангенціальному напрямках, м;

$D_A, D_B$  – ефективні діаметри насінин А і В, м;

$E_A, E_B$  – модулі Юнга насінин А і В, Па;

$\nu_A, \nu_B$  – коефіцієнти Пуассона насінин А і В;

$\bar{V}_n, \bar{V}_t$  – нормальний і тангенціальний компонент відносної швидкості поверхні насінини в точці контакту, м/с;

Для процесу взаємодії насінин зі стінкою, залежності (5)–(16) є адекватними, однак для стінки приймається радіус  $D_{wall} = \infty$  і маса стінки  $M_{wall} = \infty$ . У результаті вирази (13) і (14) перетворюються в

$$R_{eq} = D_p/2, \quad M_{eq} = M_p. \quad (17)$$

Враховуючи зазначені вище сили, запишемо систему диференціальних рівнянь руху однієї сферичної насінини в ємності:

$$\begin{cases} \frac{1}{6} \pi D^3 \rho \frac{d_p \bar{V}_p}{dt} = \frac{1}{6} \pi D^3 \rho \bar{g} + \bar{F}_n + \bar{F}_t, \\ \frac{d_p \bar{S}_p}{dt} = \bar{V}_p, \\ \frac{d_p}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \bar{V}_p \cdot \bar{\nabla}, \end{cases} \quad (18)$$

де  $\bar{V}_p$  – вектор швидкості руху насінини, м/с;

$\bar{S}_p$  – вектор переміщення насінини, м.

Для визначення положення кожної насінини в ємності необхідно вирішити систему диференціальних рівнянь (17) з урахування формул (3)–(16), що аналітично достатньо складно зробити. Тому далі будемо використовувати програмний пакет Simcenter STAR-CCM+, в основу якого покладено представлений математичний апарат.

Факторами чисельного моделювання є середнє значення ефективного діаметра насіння  $D_\mu$  (0,001 м; 0,002 м; 0,003 м;) і коефіцієнт варіації  $\delta_D$  (0,1; 0,2; 0,3), який розраховується як відношення середньквдратичного відхилення ефективного діаметра насіння  $\sigma_D$  до його середнього значення (табл. 1). Моделювання проводилось для повнофакторного дослідження для двох факторів із загальною кількістю дослідів 9 у п'ятиразовій повторності.



Таблиця 1

**Фактори і рівні чисельного моделювання випадкового укладання насіння у ємності**

№	Ефективний діаметр насіння $D_{\mu}$ , м	Коефіцієнт варіації $\delta$	Середнє квадратичне відхилення ефективного діаметра насіння $\sigma_D$ , м	Мінімальне значення діаметра насіння $D_{\min}$ , м	Максимальне значення діаметра насіння $D_{\max}$ , м
1	0,001	0,1	0,0001	0,0007	0,0013
2	0,001	0,2	0,0002	0,0004	0,0016
3	0,001	0,3	0,0003	0,0001	0,0019
4	0,002	0,1	0,0002	0,0014	0,0026
5	0,002	0,2	0,0004	0,0008	0,0032
6	0,002	0,3	0,0006	0,0002	0,0038
7	0,003	0,1	0,0003	0,0021	0,0039
8	0,003	0,2	0,0006	0,0012	0,0048
9	0,003	0,3	0,0009	0,0003	0,0057

Критерієм оцінювання є щільність укладання, яка визначається таким чином:

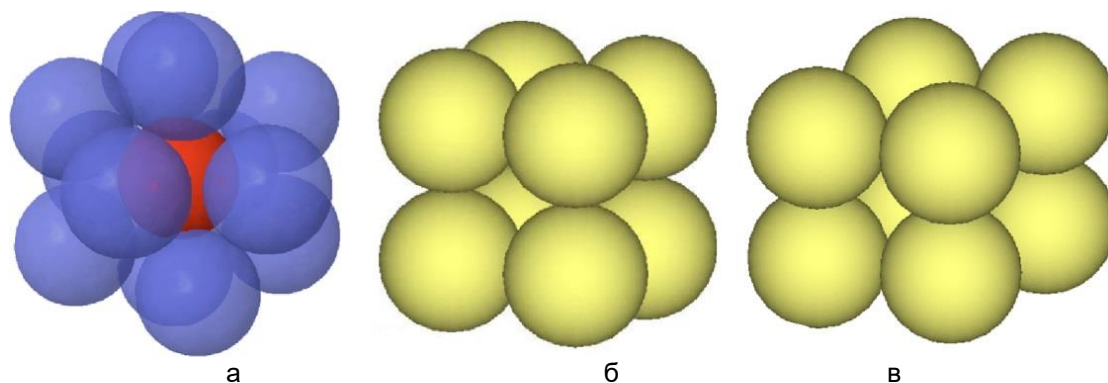
$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{6} \pi D_i^3}{a^2 h}, \quad (19)$$

де  $i$  – номер насінини;  
 $N$  – загальна кількість насінин.

Зазначимо, що для випадку однорозмірних куль найщільнішою укладанням у просторі є правильний ікосаедр, який містить 12 вершин (рис. 2, а). Центри куль розміщуються у вершинах цієї об'ємної фігури. Як зазначено в дослідженнях [16] середня щільність такого укладання складає 0,74048. Для простих упаковок (4 кулі): кубічної (рис. 2, б) і гексагональної (рис. 2, в) щільність складає 0,5236 і 0,6043 відповідно. Враховуючи вищесказане можна стверджувати, що для

однорозмірних куль в просторі щільність укладання може знаходитися в межах 0,5236–0,74048.

Фізичними моделями для симуляції в програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+ є: тривимірна модель, нестационарна неявна модель, математична модель однокомпонентного газу (повітря), модель ідеального газу (повітря), модель турбулентної течії повітря,  $k-\epsilon$  модель турбулентності повітря, ізотермічне рівняння енергії рідини, усереднене по Рейнольдсу рівняння Нав'є-Стокса, роздільна течія, методи градієнта і границь, Лагранжева модель багатофазного середовища, модель багатофазної взаємодії, модель дискретних елементів (DEM), поле сили тяжіння [17-20].



**Рис. 2. Приклади упаковок однорозмірних куль у просторі**

Насіння представлено у вигляді Лагранжевої фази відповідно до наступних моделей: постійної щільності, сили градієнта тиску, сили опору частинок, сферичних частинок, однокомпонентних твердих частинок, частинок DEM. Для прикладу, в якості насіння було обрано насіння ріпаку, яке згідно проведеного аналізу літературних джерел має такі фізико-механічні властивості: коефіцієнт

Пуассона – 0,2; модуль Юнга – 0,2 МПа; щільність – 700 кг/м<sup>3</sup>; коефіцієнт тертя спокою – 0,58; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,5; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,5; коефіцієнт опору кочення – 0,3 [4-6].

За результатами чисельного моделювання отримано візуалізацію випадкового укладання насіння дрібнонасінневих культур у ємності при різних



геометричних розмірах насіння (рис. 3). Для кожного чисельного дослідження розраховано пористість розміщення, дані якої зведені в таблицю 2.

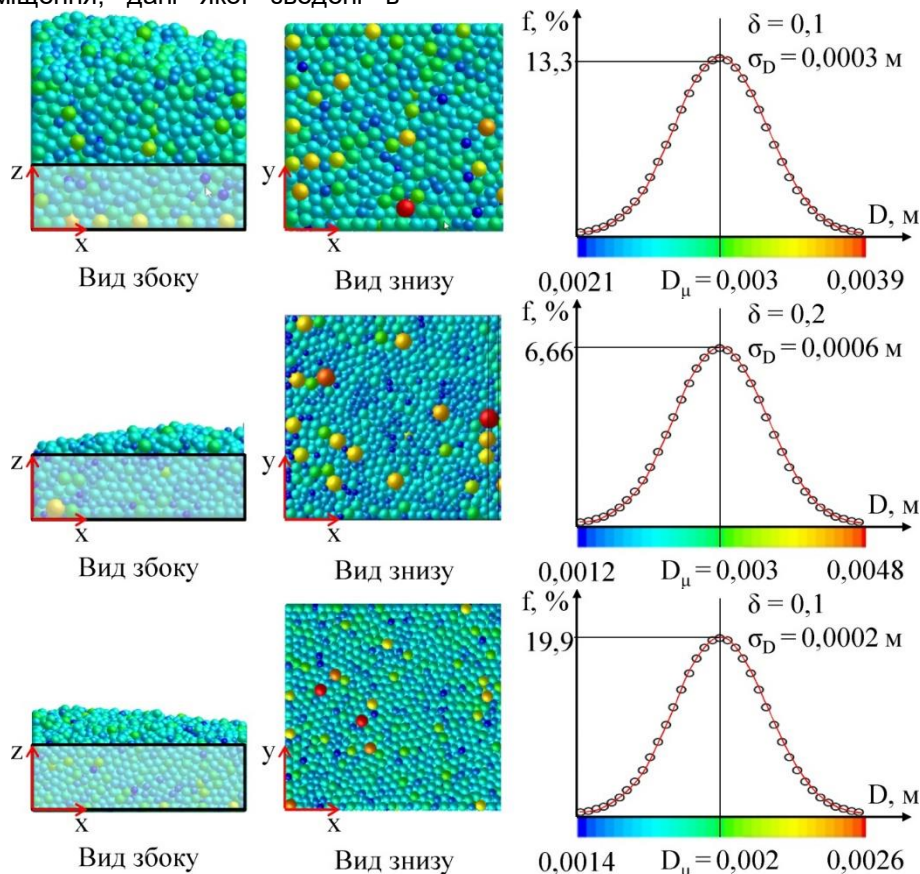


Рис. 3. Візуалізація випадкового укладання насіння дрібнонасінневих культур у ємності

Таблиця 2

Результати моделювання випадкового укладання насіння дрібнонасінневих культур у ємності

Ефективний діаметр насіння		Коефіцієнт варіації діаметра		Щільність укладання $\phi$							
				Повторність					$\bar{\phi}$	$\sigma_\phi$	$\delta_\phi$
$D_\mu$ , мм	$x_1$	$\delta$	$x_2$	1	2	3	4	5			
0,001	-1	0,1	-1	0,5628	0,5684	0,5552	0,5611	0,5594	0,5614	0,0048	0,0086
0,001	-1	0,2	0	0,5991	0,6024	0,5955	0,5970	0,5969	0,5982	0,0027	0,0045
0,001	-1	0,3	1	0,6164	0,6227	0,6112	0,6192	0,6130	0,6165	0,0046	0,0075
0,002	0	0,1	-1	0,5587	0,5611	0,5524	0,5585	0,5559	0,5573	0,0033	0,0059
0,002	0	0,2	0	0,5944	0,5977	0,5912	0,5930	0,5939	0,5940	0,0024	0,0040
0,002	0	0,3	1	0,6041	0,6063	0,5975	0,6048	0,6010	0,6027	0,0035	0,0058
0,003	1	0,1	-1	0,5532	0,5564	0,5496	0,5546	0,5522	0,5532	0,0026	0,0046
0,003	1	0,2	0	0,5884	0,5938	0,5842	0,5923	0,5857	0,5889	0,0041	0,0070
0,003	1	0,3	1	0,5995	0,6048	0,5952	0,6032	0,5990	0,6003	0,0038	0,0063

$\bar{\phi}$  – середнє значення щільності укладання;  $\sigma_\phi$  – середнє квадратичне відхилення щільності укладання;  $\delta_\phi$  – коефіцієнт варіації щільності укладання

Wolfram Cloud представимо отримані дані таблиці у вигляді рівняння регресії другого порядку в закодованому вигляді:

$$\phi = 0,592558 - 0,00560667 x_1 + 0,00171333 x_1^2 + 0,0246133 x_2 - 0,001995 x_1 x_2 - 0,011786 x_2^2. \quad (20)$$

Статистична обробка отриманого

з використанням програмного пакету



рівняння (20) представлена в таблиці 3. Враховуючи кількість ступенів вільності отриманої матриці результатів табличний критерій Стюдента складає  $t(0,05;36) = 2,03$ . Порівнюючи табличний критерій Стюдента із розрахованим в таблиці 3 можемо відкинути

незначущі коефіцієнти рівняння регресії (20) і остаточно отримати:

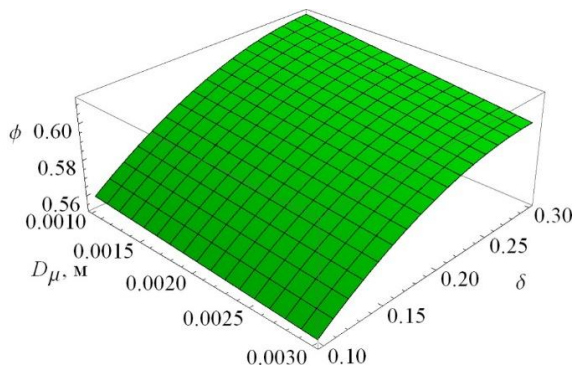
$$\varphi = 0,592558 - 0,00560667 D_{\mu} + 0,0246133 \delta - 0,001995 D_{\mu} \delta - 0,0117867 \delta^2 \quad (21)$$

Таблиця 3

Статистична обробка рівняння (20)

Коефіцієнт	Значення	Критерій Стюдента
$a_{00}$	0,592558	465,7
$a_{10}$	-0,00560667	-8,04488
$a_{20}$	0,0246133	35,3171
$a_{12}$	-0,001995	-2,33729
$a_{11}$	0,00171333	1,41937
$a_{22}$	-0,0117867	-9,76439

Графічне представлення рівняння (21) приведено на рис. 4.



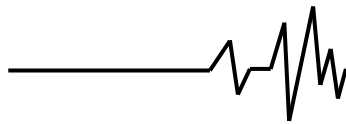
**Рис. 4. Закономірність зміни щільності випадкового укладання  $\varphi$  насіння дрібнонасінневих культур у ємності від ефективного діаметра насіння  $D_{\mu}$  і його коефіцієнта  $\delta$**

Зі зменшенням ефективного діаметра насіння  $D_{\mu}$  і збільшення коефіцієнта варіації  $\delta$  спостерігається збільшення щільності випадкового укладання  $\varphi$  насіння дрібнонасінневих культур сферичної форми у ємності. Це пояснюється тим, що насіння меншого діаметра заповнюють пустоти між насінинами більшого діаметра.

**Висновки** За результатами досліджень розроблена математична модель випадкового укладання насіння дрібнонасінневих культур у ємності, що дозволила визначити рівняння регресії її щільності від ефективного діаметра насіння і коефіцієнта варіації цього діаметра. Встановлено, що зі зменшенням ефективного діаметра насіння  $D_{\mu}$  і збільшення коефіцієнта варіації  $\delta$  спостерігається збільшення щільності випадкового укладання  $\varphi$  насіння дрібнонасінневих культур сферичної форми у ємності. Це пояснюється тим, що насіння меншого діаметра заповнюють пустоти між насінинами більшого діаметра.

### Список використаних джерел

1. Яропуд В.М., Алієв Е.Б., Дацюк Д.А. Методика чисельного моделювання висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасінневих культур. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. 2021. № 12 (3), 121–127. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.02>
2. Яропуд В.М., Дацюк Д.А. Шляхи удосконалення висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасінневих культур. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 1 (100), 156–166. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-15
3. Дацюк Д.А., Яропуд В.М., Алієв Е.Б. Висівний апарат селекційної сівалки дрібнонасінневих культур. пат. № 149682 Уа, МПК А01С 7/04, А01В 49/06. 2021. Бюл. № 48. 4 с.
4. Aliiev E. B., Vandura V. M., Pryshliak V. M., Yaropud V. M., Trukhanska O. O. Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*. № 54 (1). 2018. P. 95–104. [http://aliev.in.ua/doc/stat/2018/stat\\_2.pdf](http://aliev.in.ua/doc/stat/2018/stat_2.pdf).
5. Aliiev E., Gavrilenko A., Tesliuk H., Tolstenko A., Koshul'ko V. 2019. Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface. *Acta Periodica Technologica. APTEFF*. № 50. 2019. P. 12–22. DOI: 10.2298/APT1950012A
6. Алієв Е.Б. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: Статус. 2019. 196 с. ISBN 978-617-7759-32-3.
7. Василенко О. В. 2020. Комп'ютерне моделювання: навчальний



посібник. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка». 2020. 175 с. ISBN 978-617-529-293-8.

8. Гребеников А. Г. Основи комп'ютерного моделювання за допомогою інтегрованої системи CAD/CAM/CAE/PLM UNIGRAPH3CS NX. Харків, ХАІ. 2004.

9. Андруник В.А., Висоцька В.А., Пасічник В.В., Чирун Л.Б., Чирун Л.В. Чисельні методи в комп'ютерних науках: навчальний посібник. Видавництво «Новий світ-2000». 2017. 470 с. ISBN 978-617-7519-06-4.

10. Алієв Е.Б., Миколенко С.Ю., Сова Н.А. та ін. Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія / за заг. ред. Е. Б. Алієва. ЛІРА. 2022. 192 с. ISBN 978-966-981-687-0.

11. Shevchenko I., Aliiev E. Improving the efficiency of the process of continuous flow mixing of bulk components. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. № 6/1 (108). 2020. P. 6–13. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.216409

12. Shevchenko I., Aliiev E. Study of the process of calibration of confectionery sunflower seeds. *Food Science and Technology*. Volume 12, Issue 4. 2018. P. 135–142.

13. Yaropud V., Honcharuk I., Datsiuk D., Aliiev E. The model for random packaging of small-seeded crops' seeds in the reservoir of selection seeders sowing unit. *Agraarteadus*, Vol. 33 (1). 2020. P. 199–208. <https://dx.doi.org/10.15159/jas.22.08>

14. Dinesh J. Modelling and Simulation of a Single Particle in Laminar Flow Regime of a Newtonian Liquid. Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference. Bangalore. 2009. P. 1–9 <https://www.comsol.com/paper/download/46302/Jammani.pdf>

15. Di Renzo Alberto, Di Maio Francesco Paolo. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes. *Chemical Engineering Science*. № 59 (1). 2004. P. 525–541. DOI: 10.1016/j.ces.2003.09.037

16. Komiwes V., Mege P., Meimon Y., Herrmann H. Simulation of granular flow in a fluid applied to sedimentation. – *Granular Matter*, 8 (1). 2006. P. 41–54. DOI: 10.1007/s10035-005-0220-3

17. Kubicki D., Lo S. 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. P. 1–6.

18. 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*. № 6. 2012. P. 411–415. DOI: 10.5281/zenodo.1330605

19. 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*, № 2 (12). 2013. P. 41–45. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.686.4460&rep=rep1&type=pdf>

20. Iguchi Manabu, Ilegbusi Olusegun J. *Basic Transport Phenomena in Materials Engineering*. Springer. 2014. 260 p. DOI: 10.1007/978-4-431-54020-5

## References

1. Yaropud V.M., Aliyev E.B., Datsyuk D.A. Methods of numerical modeling of the sowing apparatus of the breeding seeder of small-seed crops. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. 2021. 12 (3), 121–127. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.02>

2. Yaropud V.M., Datsyuk D.A. Ways to improve the sowing apparatus of the breeding seeder of small-seed crops. *Vibrations in engineering and technology*. 2021. 1 (100), 156–166. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-15

3. Datsyuk D.A., Yaropud V.M., Aliyev E.B. Appareil de semis pour l'ensemencement de cultures à petites céréales. pat. n° 149682 Ua, IPC A01S 7/04, A01V 49/06. 2021. Boul. 48. 4 s.

4. Aliev E. B., Bandura V. M., Pryshliak V. M., Yaropud V. M., Trukhanska O. O. Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*. № 54 (1). 2018. P. 95–104. [http://aliev.in.ua/doc/stat/2018/stat\\_2.pdf](http://aliev.in.ua/doc/stat/2018/stat_2.pdf). [5]

5. Aliiev E., Gavrilenko A., Tesliuk H., Tolstenko A., Koshul'ko V. 2019. Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface. *Acta Periodica*





Technologica. APTEFF. № 50. 2019. P. 12–22. DOI: 10.2298/APT1950012A

6. Aliyev E.B. Modèles physiques et mathématiques des processus de séparation de précision des graines de tournesol : monographie. Zaporozhye : Statut. 2019. 196 p. ISBN 978-617-7759-32-3.

7. Vasilenko O.V. 2020. Computer simulation : tutorial. Zaporozhye : NU "Zaporizhzhya Polytechnic." 2020. 175 cf. ISBN 978-617-529-293-8.

8. Andrunik V.A., Vysotskaya V.A., Pasechnik V.V., Chirun L.B., Chirun L.V. Méthodes numériques en sciences informatiques : manuel. Maison d'édition "New World-2000." 2017. 470 cf. ISBN 978-617-7519-06-4.

9. Aliev E.B., Mikolenko S.Yu., Sova N.A. et autres. Appui technique et technologique à la transformation sans déchets de matières premières céréalières en produits alimentaires et en aliments pour animaux : monographie collective/par total. édité par E. B. Aliyev. LIRA. 2022. 192 s. ISBN 978-966-981-687-0.

10. Shevchenko I., Aliiev E. Improving the efficiency of the process of continuous flow mixing of bulk components. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. № 6/1 (108). 2020. P. 6–13. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.216409

11. Yaropud V., Honcharuk I., Datsiuk D., Aliiev E. The model for random packaging of small-seeded crops' seeds in the reservoir of selection seeders sowing unit. Agraarteadus, Vol. 33 (1). 2020. P. 199–208. <https://dx.doi.org/10.15159/jas.22.08>

12. Shevchenko I., Aliiev E. Study of the process of calibration of confectionery sunflower seeds. Food Science and Technology. Volume 12, Issue 4. 2018. P. 135–142.

13. Yaropud V., Honcharuk I., Datsiuk D., Aliiev E. The model for random packaging of small-seeded crops' seeds in the reservoir of selection seeders sowing unit. Agraarteadus, Vol. 33 (1). 2020. P. 199–208. <https://dx.doi.org/10.15159/jas.22.08>

14. Dinesh J. Modelling and Simulation of a Single Particle in Laminar Flow Regime of a Newtonian Liquid. Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference. Bangalore. 2009. P. 1–9 <https://www.comsol.com/paper/download/46302/Jamrani.pdf>

15. Di Renzo Alberto, Di Maio Francesco

Paolo. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes. Chemical Engineering Science. № 59 (1). 2004. P. 525–541. DOI: 10.1016/j.ces.2003.09.037

16. Komiwes V., Mege P., Meimon Y., Herrmann H. Simulation of granular flow in a fluid applied to sedimentation. – Granular Matter, 8 (1). 2006. P. 41–54. DOI: 10.1007/s10035-005-0220-3

17. Kubicki D., Lo S. 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. P. 1–6.

18. 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. № 6. 2012. P. 411–415. DOI: 10.5281/zenodo.1330605

19. 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, № 2 (12). 2013. P. 41–45. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.686.4460&rep=rep1&type=pdf>

20. Iguchi Manabu, Ilegbusi Olusegun J. Basic Transport Phenomena in Materials Engineering. Springer. 2014. 260 p. DOI: 10.1007/978-4-431-54020-5

#### **USE OF THE METHOD OF DISCRETE ELEMENTS IN SIMULATION OF THE MOVEMENT AND LAYING OF SEEDS OF SMALL-SEED CULTURES**

*Modern theoretical studies of mechanical-technological processes of the process of moving seeds under the action of working bodies of technical means are reduced to analytical methods, which leads to the compilation of complex systems of differential equations with boundary and initial conditions. Among the modern methods of computer modeling of mechanical-technological processes of moving a loose medium (seed mixture), methods based on the concept of discrete representation of matter - the method of particle dynamics and the method of discrete elements - are of particular interest. The Discrete Element Method (DEM) is an engineering numerical method for modeling the motion of many*



*interacting discrete objects, which are usually solid particles. The purpose of the research is to simulate the movement and packing of seeds of small-seeded crops using the method of discrete elements in the Simcenter STAR-CCM+ CAE system software package. The physical models for simulation in the Simcenter STAR-CCM+ software package are: three-dimensional model, non-stationary implicit model, one-component gas (air) mathematical model, ideal gas (air) model, turbulent air flow model,  $k-\varepsilon$  air turbulence model, isothermal energy equation fluids, Reynolds-averaged Navier-Stokes equation, separated flow, gradient and boundary methods, Lagrangian model of multiphase environment, multiphase interaction model, discrete element model (DEM), gravity field/ As a result of research, a*

*mathematical model of random packing of small-seeded seeds crops in the container, which allowed to determine the regression equation of its density from the effective diameter of the seeds and the coefficient of variation of this diameter. It was found that with a decrease in the effective seed diameter  $D_{\mu}$  and an increase in the coefficient of variation  $\delta$ , an increase in the random packing density  $\varphi$  of small-seeded crops of spherical shape in the container is observed. This is explained by the fact that the seeds of a smaller diameter fill the voids between the seeds of a larger diameter.*

**Key words:** seed, numerical modeling, simulation, motion, parameters, discrete element method.

#### Відомості про авторів

**Яропуд Віталій Миколайович** - кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: [yaropud77@gmail.com](mailto:yaropud77@gmail.com)).

**Теслюк Геннадій Володимирович** - кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри тракторів і сільськогосподарських машин Дніпровського державного аграрно-економічного університету (вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, Україна, 49600).

**Дацюк Дмитро Анатолійович** - аспірант кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008).

**Yaropud Vitaliy** - Candidate of Technical Sciences, 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: [yaropud77@gmail.com](mailto:yaropud77@gmail.com)).

**Tesliuk Gennadii** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Tractors and Agricultural Machinery of the Dnipro State Agrarian and Economic University (25 Serhiy Yefremova St., Dnipro, Ukraine, 49600).

**Datsiuk Dmytro** - postgraduate student of the Department "Machinery and Equipment of Agricultural Production" of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna Street, Vinnytsia, 21008).