

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СЕПАРАЦІЇ СИПКОВОГО МАТЕРІАЛУ ЗАЛЕЖНО ВІД ЙОГО ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

**Е. Б. Алієв**, кандидат технічних наук, старший дослідник

**ORCID ID:** 0000-0003-4006-8803

**В. Ю. Дудін**, кандидат технічних наук, доцент

**ORCID ID:** 0000-0002-1348-7896

Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук

**О. С. Гаврильченко**, кандидат технічних наук, доцент

**ORCID ID:** 0000-0002-8159-954X

**В. В. Івлєв**, кандидат технічних наук

**ORCID ID:** 0000-0003-1413-6297

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

*Дослідження процесу сепарації сипкого матеріалу проводилися в три етапи моделювання у програмному пакеті STAR-CCM+. Перший етап полягав у моделюванні процесу переміщення сипкого матеріалу під дією повітряного потоку. Другий етап був спрямований на моделювання процесу переміщення сипкого матеріалу під дією віброуючого решета. Задачею третього етапу моделювання було визначення функції розподілу частинок сипкого матеріалу за фракціями під дією віброуючої поверхні.*

**Ключові слова:** сипкий матеріал, сепарація, моделювання, аеродинамічні властивості, геометричні розміри, об'ємна вага.

**Постановка проблеми.** Сипкий матеріал – це конгломерат дискретного твердого тіла, макроскопічних частинок, що характеризуються втратою енергії під час взаємодії [1]. Компоненти, що складають сипкий матеріал, повинні бути достатньо великими, щоб вони не піддавалися тепловому коливальному руху. Сипкий матеріал містить компоненти із різноманітним фракційним складом, кожний з яких характеризується певними фізико-механічними властивостями. Одним із завдань промислового і аграрного комплексів є розділення (сепарація) сипкого матеріалу за заданими фізико-механічними властивостями. У зв'язку з тим, що на процес сепарації впливають безліч факторів, включаючи як фізико-механічні властивості матеріалу, так і характер зовнішнього впливу, розробка адекватної універсальної фізико-математичної моделі є досить складною у рішенні в аналітичному вигляді.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Згідно з аналізом останніх досліджень і публікацій [2-4], дослідженню процесу переміщення сипкого матеріалу під зовнішнім впливом (повітряний потік, віброуюче решето, віброуюча суцільна поверхня) присвячено багато методів визначення координат положень його

елементів. Ці методи засновані на фізико-математичному апараті зміщення системи матеріальних точок під дією зовнішніх сил. Урахування сил контактної взаємодії частинок, які мають випадкове початкове положення, між собою і поверхнями обладнання ускладнюють зазначені рівняння, які в загальному вигляді не вирішуються аналітичними методами. У дослідженнях [5-9] вирішення подібних систем здійснюється методом кінцевих елементів, який реалізується при чисельному моделюванні в програмному пакеті STAR-CCM+.

**Мета досліджень.** Провести чисельне моделювання процесу сепарації сипкого матеріалу під дією повітряного потоку, віброуючого решета і суцільної віброуючої поверхні з метою розробки відповідних фізико-математичних моделей і відпрацювання пропонуваніх методик досліджень.

**Методика проведення досліджень.** Дослідження процесу сепарації сипкого матеріалу проводилися в три етапи.

Перший етап полягав у моделюванні процесу переміщення сипкого матеріалу під дією повітряного потоку в програмному пакеті STAR-CCM+ методом кінцевих елементів, задаючи при цьому початкові і граничні умови для частинок і

повітряного потоку. Для чисельного моделювання були обрані фізичні моделі: поле сили тяжіння,  $k-\epsilon$  модель турбулентності розділеної течії, модель реального газу Ван-дер-Ваальса, модель багатозфазної взаємодії, модель дискретних елементів, Лагранжових моделей багатозфазного середовища [10-12]. Для реалізації чисельного моделювання прийняті наступні фізико-механічні властивості частинки сипкого матеріалу: модуль Юнга – 0,2 МПа; коефіцієнт Пуассона – 0,5; коефіцієнт тертя спокою – 0,8; об'ємна маса – 140-260 кг/м<sup>3</sup>; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,5; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,5; коефіцієнт опору кочення – 0,3. Прийняті наступні властивості середовища: середовище – повітря; турбулентне

число Прандтля – 0,9; динамічна в'язкість –  $1,85508 \cdot 10^{-5}$  Па·с; температура – 293 К; прискорення вільного падіння – 9,8 м/с<sup>2</sup>; тиск – 101325 Па. Розмір комірки сітки для моделювання – 0,001 м.

Досліджували сепарацію сипкого матеріалу на малогабаритному аеродинамічному сепараторі циклонного типу, розрахункову схему якого наведено на рис. 1. Факторами для чисельного моделювання є швидкість подачі повітря  $V$  (8-15 м/с), об'ємна маса сипкого матеріалу  $\rho_p$  (140-260 кг/м<sup>3</sup>) і ефективний діаметр його компонентів  $D_p$  (3-7 мм). Потік маси сипкого матеріалу був представлений сімома фракціями однакової кількості з однаковим ефективним діаметром і об'ємною масою в зазначеному вище діапазоні.

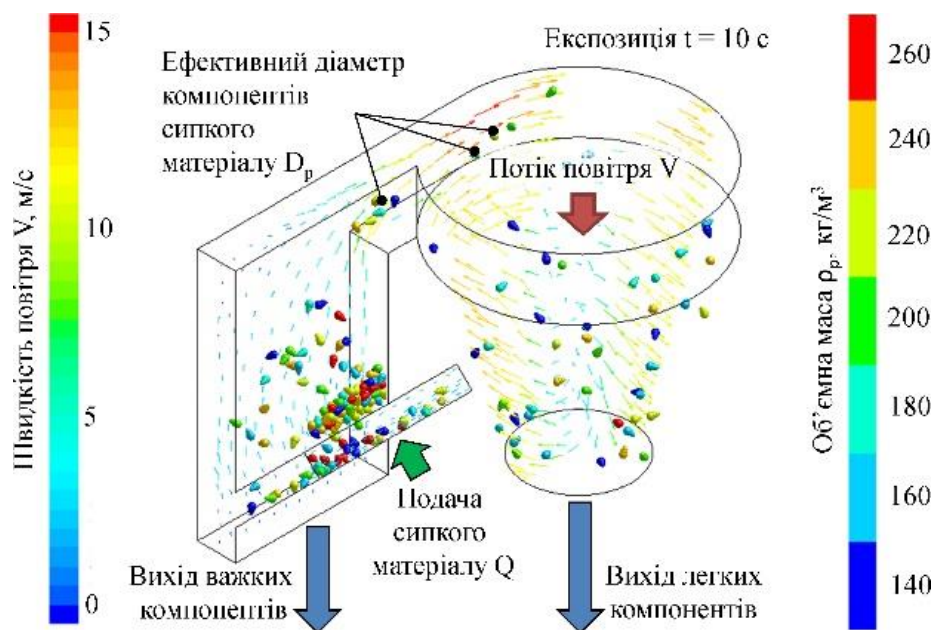


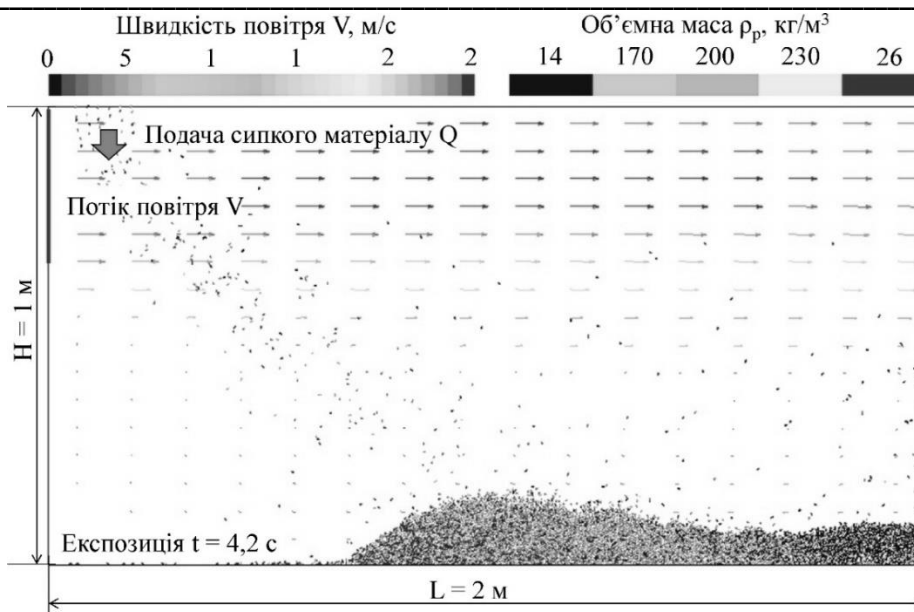
Рис.1. Розрахункова схема процесу сепарації сипкого матеріалу на малогабаритному аеродинамічному сепараторі циклонного типу

Загальна кількість дослідів для чисельного моделювання складала 24. В якості критерію оцінки якості процесу сепарації було прийнято масовий розподіл компонентів за об'ємною масою на виходах важких і легких компонентів –  $\xi(\rho)$ . У результаті обробки даних необхідно встановити залежності концентрації компонентів певної об'ємної маси  $\xi(\rho)$  і безпосередньо об'ємної маси важких  $\rho_h$  і легких  $\rho_l$  компонентів від факторів чисельного моделювання.

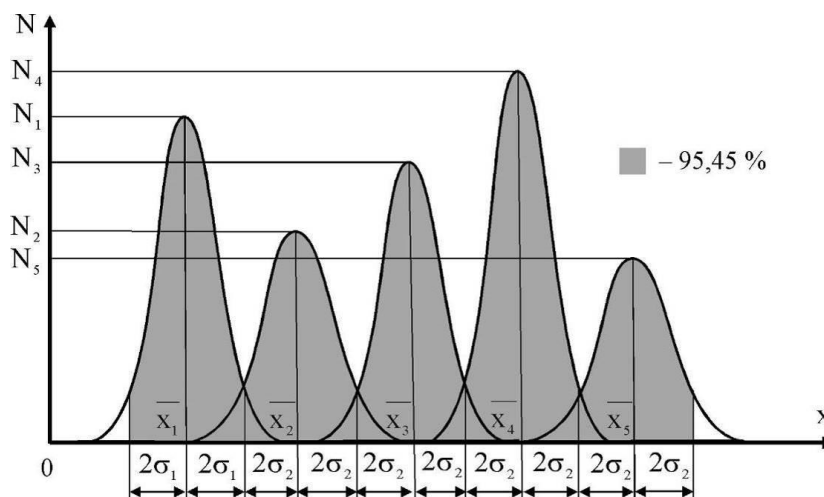
Також для реалізації першого етапу чисельного моделювання було складено розрахункову схему процесу переміщення падаючих частинок сипкого матеріалу під дією повітряного потоку (рис. 2). Факторами чисельного моделювання були: ефективний

діаметр частинок  $D_p$  (3-7 мм), швидкість подачі повітря  $V$  (5-15 м/с), подача сипкого матеріалу  $Q$  (1-3 т/год). Потік маси сипкого матеріалу був представлений п'ятьма фракціями частинок однаковою кількістю з однаковим ефективним діаметром і об'ємною масою в зазначеному вище діапазоні.

Загальна кількість дослідів складала  $3^3 = 27$ . Під дією повітряного потоку розділення сипкого матеріалу по довжині області можна представити нормальним розподілом кожної фракції, який визначається середнім і середньоквадратичним відхиленням  $\sigma$  (рис. 3). Ймовірність 95,45% для нормального розподілу спостерігається в області  $x \in [\bar{x} - 2\sigma; \bar{x} + 2\sigma]$ .



**Рис. 2. Розрахункова схема процесу переміщення падаючого сипкого матеріалу під дією повітряного потоку**



**Рис. 3. Функції нормального розподілу кожної фракції по довжині області**

Відповідно до рис. 3, найкраще розділення (95,45 %) досягається за умови:

$$2\sigma_1 + 2(2\sigma_2 + 2\sigma_3 + 2\sigma_4) + 2\sigma_5 \leq \bar{x}_5 - \bar{x}_1, \quad (1)$$

$$\text{або } \chi = \frac{\bar{x}_5 - \bar{x}_1}{2\sigma_1 + 2(2\sigma_2 + 2\sigma_3 + 2\sigma_4) + 2\sigma_5} \rightarrow \max, \quad (2)$$

де  $\chi$  – коефіцієнт заповнення.

Вся область була поділена на 20 однакових вертикальних зон, для кожної з яких визначалась кількість частинок кожної фракції. Експозиція складала від 3 до 7 с.

Вищезазначені коефіцієнт заповнення  $\theta$ , середні значення розподілу фракцій по довжині і їх середньоквадратичні відхилення  $\sigma$  характеризують розміри і розташування забірних областей (забірників). Однак зазвичай у існуючих аеродинамічних сепараторах застосовуються забірники однакових розмірів, що ускладнює

оцінку якості процесу сепарації. Тому введено ще один критерій якості розподілу фракцій в забірниках – коефіцієнт розподілу  $\delta$ , який визначається наступним чином. Нехай вхідний матеріал необхідно розділити на  $N$  фракцій, тоді кількість забірних областей повинна дорівнювати  $N$ . Для кожної забірної області визначається фракційний склад сипкого матеріалу, який математично можна представити у вигляді квадратної матриці  $N \times N$ :

$$\begin{pmatrix} W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{N1} & W_{N2} & \dots & W_{NN} \end{pmatrix} \quad (3)$$

де  $w_{ij}$  – масова доля фракції  $i$  в забірнику  $j$ ;

$$W_{ij} = \frac{m_{ij}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N m_{ij}} * 100\%; \quad (4)$$

$m_{ij}$  – маса фракції  $i$  в забірнику  $j$ .

Коефіцієнт розподілу  $\delta$  визначається як найбільша сума діагональних елементів матриці (3):

$$\delta = \max \left( \sum_{k=1}^N W_{kk}, \sum_{k=1}^N W_{k(k+1)}, \dots, \sum_{k=1}^N W_{k(k+N-1)}, \sum_{k=1}^N W_{(k+1)k}, \dots, \sum_{k=1}^N W_{(k+N-1)k} \right)$$

де  $k$  – натуральне число.

Для другого етапу в якості фізичних моделей для чисельного моделювання процесу переміщення сипкого матеріалу під дією віброуючого решета в програмному пакеті STAR-CCM+ було обрано моделі аналогічно першому етапу. Для спрощення розрахунків прийнято припущення про те, що частинки сипкого

матеріалу є еліпсоїди з визначеною густиною і ефективним діаметром.

Для чисельного моделювання було прийнято такі усереднені значення: щільність – 400 кг/м<sup>3</sup>; коефіцієнт Пуассона – 0,5; модуль Юнга – 0,2 МПа; коефіцієнт тертя спокою – 0,8; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,5; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,5; коефіцієнт опору кочення – 0,3. Властивості середовища були наступні: середовище – повітря; турбулентне число Прандтля – 0,9; динамічна в'язкість – 1,85508·10<sup>-5</sup> Па·с; температура – 293 К; прискорення вільного падіння – 9,8 м/с<sup>2</sup>; тиск – 101325 Па. Розмір комірки сітки для моделювання – 0,001 м.

Розрахункову схему процесу переміщення сипкого матеріалу під дією віброуючого решета, яку покладено в основу роботи різноманітних пневморешітних і калібруючих машин зображено на рис. 4

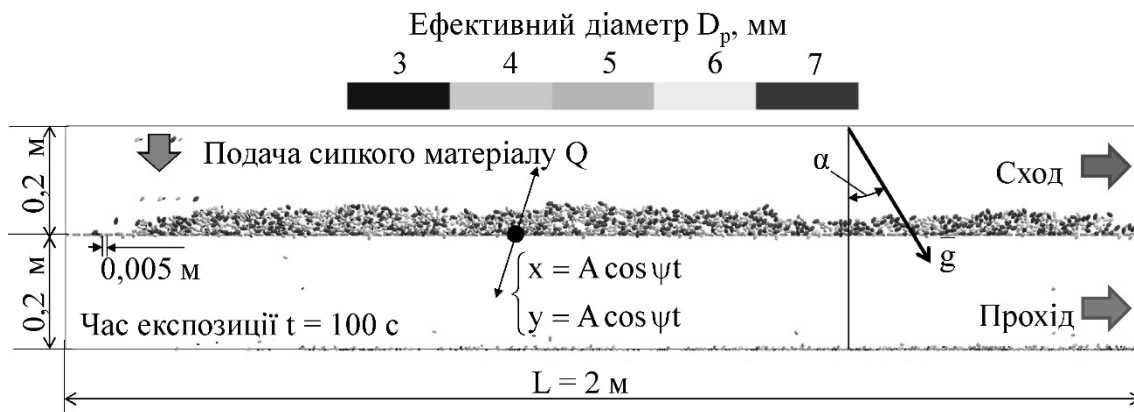


Рис.4. Розрахункова схема процесу переміщення сипкого матеріалу під дією віброуючого решета

Дослідження проведено на базі решета із круглими отворами діаметром 3,6 мм. Довжина решета прийнята  $L = 2$  м. Відносна корисна площа решета складала 0,56. Решето виконує періодичний рух по двом координатам за законом:

$$\begin{cases} x = A \cos \Psi t, \\ y = A \sin \Psi t, \end{cases} \quad (6)$$

де  $A$  – амплітуда коливань, м;  $\Psi$  – частота коливань, с<sup>-1</sup>.

Потік маси сипкого матеріалу був представлений п'ятьма фракціями частинок однаковою кількістю з різним ефективним діаметром  $D_p$  в діапазоні 3,0-3,8 мм з кроком 0,2 мм.

За фактори чисельного моделювання було прийнято найбільш вагомий режимно-технологічний параметри: подача сипкого матеріалу –  $Q$  (1100-2100 кг/год), кут нахилу решета –  $\alpha$  (1-7 °), частота коливань решета –  $\Psi$  (4-6 с<sup>-1</sup>), амплітуда коливань

решета –  $A$  (0,008-0,012 м). Кут нахилу решета  $\alpha$  задається шляхом зміни кута нахилу прискорення вільного падіння, що є абсолютно тотожним. Загальна кількість дослідів чисельного моделювання складала  $3^4 = 81$ . Експозиція складала від 100 с.

У результаті моделювання досліджували концентрацію кожної фракції частинок, що відбилися від поверхні решета (схід)  $\theta_c$  та пройшли крізь нього (прохід)  $\theta_p$ . У зв'язку з тим, що розмір отвору решета було прийнято 3,6 мм, необхідною умовою якісного розділення сипкого матеріалу є мінімізація значень концентрацій фракцій частинок 3,8 мм – за проходом ( $\theta_{D_p=3,8}^p$ ) і фракцій 3,0 мм, 3,2 мм, 3,4 мм, 3,6 мм – за сходом ( $\theta_{D_p=3,0}^c, \theta_{D_p=3,2}^c, \theta_{D_p=3,4}^c, \theta_{D_p=3,6}^c$  відповідно).

Тому критерієм дослідження було обрано сумарну концентрацію частинок проходу і сходу, яка розраховується за формулою:

$$\theta = \theta_{D_p=3,8}^n + \theta_{D_p=3,6}^c + \theta_{D_p=3,4}^c + \theta_{D_p=3,2}^c + \theta_{D_p=3,0}^c \cdot (7)$$

За кількісний критерій оцінки ефективності процесу розділення сипкого матеріалу під дією віброуючої решета було прийнято сумарну продуктивність за сходом і проходом:

$$q = q^n + q^c \quad (8)$$

Задачею третього етапу моделювання було визначення функції розподілу частинок сипкого матеріалу за фракціями під дією віброуючої поверхні. Розрахункову схему наведено на рис. 5.

Фізичні моделі і фізико-механічні властивості були обрані такі самі, як і для другого етапу.

Віброуюча поверхня мала форму квадрата зі стороною 2 м. Поверхня виконує періодичний рух за трьома координатами за законом:

$$\begin{cases} x = A \cos \Psi t, \\ y = A \cos \Psi t, \\ z = A \sin \Psi t \end{cases} \quad (9)$$

де  $A$  – амплітуда коливань, м;  $\Psi$  – частота коливань,  $c^{-1}$ .

Кути нахилу решета  $\alpha$  і  $\beta$  задаються шляхом зміни кутів нахилу прискорення вільного падіння, що є абсолютно тотожним

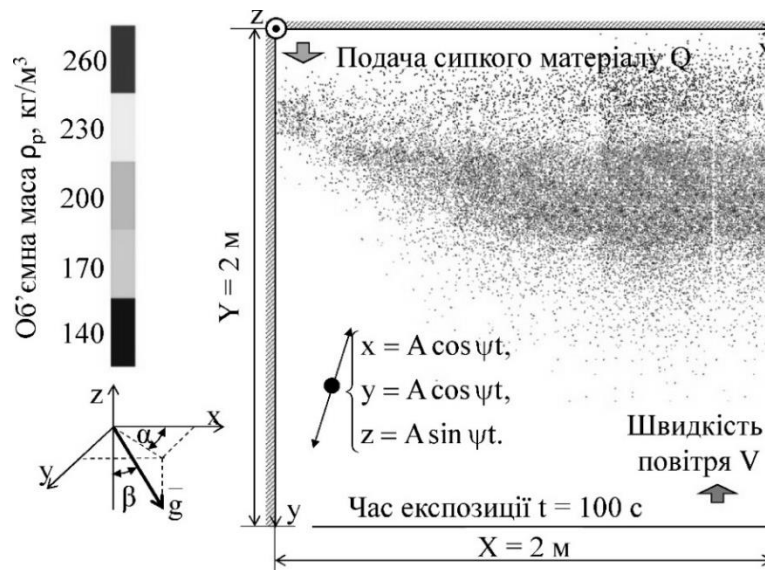


Рис. 5. Розрахункова схема процесу переміщення сипкого матеріалу під дією віброуючої поверхні

Потік маси сипкого матеріалу був представлений п'ятьма фракціями частинок сипкого матеріалу однакової кількості з різною об'ємною вагою.

За фактори чисельного моделювання було прийнято такі технологічні параметри: подача сипкого матеріалу  $Q$  (1000-1800 кг/год.), кути нахилу решета  $\alpha$  і  $\beta$  ( $1-5^\circ$ ), частота коливань решета  $\psi$  ( $5-10 c^{-1}$ ), амплітуда коливань решета  $A$  ( $0,005-0,0015$  м) і швидкість потоку повітря  $V$  ( $3-4$  м/с).

Повний факторний чисельний експеримент для 6 факторів і 3 рівнів варіації містить  $3^6 = 729$  дослідів, що ускладнюється потужністю персонального комп'ютера і часом на обробку даних. Тому прийнято рішення провести чисельне моделювання з використанням некомпозиційного плану Бокса-Бенкіна для 6 факторів із загальною кількістю дослідів – 54. Тривалість експозиції складала 100 с. Вся область була поділена на 200 однакових горизонтальних зон, для кожної з яких визначалася кількість частинок кожної фракції.

За кількісний критерій оцінки ефективності процесу розділення сипкого матеріалу під дією віброуючої поверхні було прийнято продуктивність його на виході  $q$ .

Якість процесу сепарації визначалася коефіцієнтом заповнення  $\theta$ , середнім значенням розподілу фракцій по довжині і їх середньоквадратичним відхиленням  $\sigma$ , що характеризують розміри і розташування забірних областей (забірників). Однак зазвичай у існуючих пневмовібросепараторах застосовуються забірники однакових розмірів, що ускладнює оцінку якості процесу сепарації. Тому введено ще один критерій якості розподілу фракцій в забірниках – коефіцієнт розподілу  $\delta$ , який визначається за формулами (3)–(5).

**Виклад основного матеріалу і отриманих наукових результатів.** У результаті першого етапу моделювання було отримано масовий розподіл частинок сипкого матеріалу за об'ємною масою на виходах важких і легких компонентів. Аналіз дозволяє апроксимувати отримані числові дані у вигляді залежності:

$$\xi = C_1 - C_2 \arctg(C_3 + C_4 D + C_5 \rho + C_6 V), (10)$$

де  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  – константи при змінних.

Підбираючи константи при змінних до моменту отримання найбільшого коефіцієнту кореляції ( $R = 0,99$ ) в програмному пакеті Mathematica, остаточно маємо для виходу важких компонентів малогабаритного аеродинамічного сепаратора циклонного типу:

$$\xi = 50 - 31,831 \arctg(28,9167 + 0,260417D + 0,0520833\rho + 1,39583V) \quad (11)$$

для виходу легких компонентів малогабаритного аеродинамічного сепаратора циклонного типу:

$$\xi_1 = 100 - \xi_h = 31,831 \arctg(28,9167 + 0,260417D + 0,0520833\rho + 1,39583V) \quad (12)$$

Зі збільшенням ефективного діаметра частинок  $D_p$  і швидкості повітря  $V$  масова концентрація важких компонентів  $\xi_h$  зменшується і зміщується вздовж вісі об'ємної маси  $\rho$ .

Окрім цього, отримано залежності зміни об'ємних мас важких  $\rho_h$  і легких  $\rho_l$  компонентів від факторів досліджень

$$\rho_h = -239,795 - 1,51159D_p + 128,401V - 11,6563V^2 + 0,323668V^3, R = 0,99 \quad (13)$$

$$\rho_l = -16,6528 - 1,27037D_p + 83,8197V - 7,73953V^2 + 0,210855V^3, R = 0,99 \quad (14)$$

Різниця між  $\rho_h$  і  $\rho_l$  практично не змінюється і складає  $58,2 \pm 2,2$  кг/м<sup>3</sup>. Зі збільшенням ефективного діаметру частинок  $D_p$  і швидкості повітря  $V$  значення  $\rho_h$  і  $\rho_l$  зменшуються. Отримана залежність дає змогу визначати швидкість повітря  $V$  виходячи з необхідних об'ємних мас  $\rho_h$  і  $\rho_l$  та ефективного діаметру частинок сипкого матеріалу  $D_p$ .

У результаті моделювання технологічного процесу переміщення падаючого сипкого матеріалу під дією повітряного потоку для кожного дослідження для кожної фракції частинок сипкого матеріалу був розрахований критерій  $\chi^2$ , згідно з яким розподіл частинок сипкого матеріалу по довжині області відповідає нормальному розподілу. Апроксимацію отриманих даних було проведено в програмному пакеті Mathematica. У результаті якої складено математичний вираз, що зв'язав коефіцієнт заповнення  $\theta$  із факторами досліджень у вигляді:

$$\theta = 0,489163 + 0,0125713D_p - 0,00711689D_p^2 - 0,0642273Q - 0,00346568D_p Q - 0,025941V + 0,00683085D_p V + 0,00479817QV - 0,00138784V^2 \quad (15)$$

Згідно з отриманими даними складено рівняння регресії, яке зв'язало коефіцієнт розподілу  $\delta$  із факторами досліджень у вигляді:

$$\delta = 83,2606 - 2,89786D_p - 1,05729D_p^2 + 3,71835Q - 1,67698Q^2 = 2,64955V + 1,28688D_p V + 0,298956QV - 0,219139V^2, \quad (16)$$

У результаті моделювання технологічного процесу переміщення частинок сипкого матеріалу під дією вібруючого решета для кожної фракції частинок сипкого матеріалу при сході та проході було визначено концентрацію і розраховано сумарну концентрацію для відповідного дослідження  $\theta$ . Згідно з отриманими даними складено рівняння регресії, яке зв'язало продуктивність  $q$  із факторами досліджень у вигляді:

$$q = -6637,82 + 162,22\alpha + 33577,7A + 0,013423Q + 2433,85\psi - 32,444\alpha\psi + 0,140125Q\psi - 227,453\psi^2, \quad (17)$$

Згідно з отриманими даними складено рівняння регресії, яке зв'язало сумарну концентрацію частинок сипкого матеріалу  $\theta$  із факторами досліджень у вигляді:

$$\theta = 198,853 - 1,733\alpha - 14055,2A + 284999A^2 + 0,00852581Q - 39,653\psi + 0,303737\alpha\psi + 1364,8A\psi - 0,00170516Q\psi + 2,27037\psi^2, \quad (18)$$

Аналіз отриманих залежностей доводить необхідність вирішення компромісної задачі, яка полягає у наступному: для забезпечення ефективності процесу розділення сипкого матеріалу під дією вібруючого решета необхідно, щоб його продуктивність  $q$  дорівнювала значенню подачі сипкого матеріалу  $Q$  і була найбільшою, при цьому сумарна концентрація частинок  $\theta$  повинна бути мінімальною:

$$\begin{cases} q(Q, \alpha, \Psi, A) = Q, \\ \theta(Q, \alpha, \Psi, A) \rightarrow \min, \\ Q \rightarrow \max. \end{cases} \quad (19)$$

З використанням програмного пакету Mathematica рішенням системи рівнянь (19) є

$$\theta = 10,83\%, Q = q = 1202 \text{ кг/год}, \alpha = 1, \psi = 5,62 \text{ с}^{-1}, A = 0,012 \text{ м}. \quad (20)$$

У результаті моделювання технологічного процесу переміщення сипкого матеріалу під дією вібруючої поверхні для кожної фракції частинок сипкого матеріалу на виході при  $x = 2$  м було визначено коефіцієнт заповнення  $\theta$ , коефіцієнт розподілу  $\delta$  і продуктивність  $q$ .

Згідно з отриманими даними складено рівняння регресії, яке зв'язало продуктивність  $q$  із факторами досліджень у закодованому вигляді:

$$q = -3448,66 + 482,402\alpha - 51,0518\alpha^2 + 138739A - 8373,72\alpha A - 3,54768106A^2 - 18,1987\beta + 3746,37A\beta -$$

$$-0,00755229Q+0,094723\alpha Q+15,8784AQ+ \\ +509,047V-28,0576\alpha V+385,786\psi-8697,01A\psi+ \\ +0,0276348Q\psi-48,721V\psi-9,15336\psi^2, \quad (21)$$

Згідно з отриманими даними складено рівняння регресії, яке зв'язало коефіцієнт заповнення  $\theta$  із факторами досліджень у вигляді:

$$\theta=-69,5749-11,9369\alpha-7114,48A+35,6531\beta- \\ -1,13708\beta^2-0,0501428Q+0,73938AQ+ \\ +0,0000204407Q^2+182,78V-7,24514bV-23,1227V_2- \\ -43,56\psi+1,19056\alpha\psi+640,774A\psi-0,319708\beta\psi- \\ -0,001373Q\psi+1,43108V\psi+1,64776\psi^2, \quad (22)$$

Згідно отриманих даних складено рівняння регресії, яке зв'язало коефіцієнт розподілу  $\delta$  із факторами досліджень у вигляді:

$$\delta=-295,934-10,8956\alpha-0,435885\alpha_2+5565,86A+ \\ +73,9266\alpha A-110004A^2+38,5016\beta+0,269007\alpha\beta- \\ -273,603A\beta-1,47409\beta^2-0,034582Q+0,002199\alpha Q- \\ -0,989529AQ+0,00273373\beta Q+0,0000172619Q^2+ \\ +207,328V+1,65037\alpha V-454,323AV-7,90544\beta V- \\ -24,7288V_2-13,3735\psi+0,232407\alpha\psi-0,382959\beta\psi- \\ 0,00187299Q\psi+0,848669\psi_2 \quad (23)$$

Аналіз отриманих залежностей доводить необхідність вирішення компромісної задачі, яка полягає у наступному: для забезпечення ефективності процесу розділення сипкого матеріалу під дією вібруючої поверхні необхідно, щоб його продуктивність  $q$  дорівнювала значенню подачі сипкого матеріалу  $Q$  і була найбільшою, при цьому коефіцієнт розподілу  $\delta$  повинен бути максимальним:

$$\begin{cases} q(Q, \alpha, \beta, \Psi, A, V) = Q, \\ \delta(Q, \alpha, \beta, \Psi, A, V) \rightarrow \max, \\ Q \rightarrow \max. \end{cases} \quad (24)$$

З використанням програмного пакету Mathematica рішенням системи рівнянь (24) є

$$\delta=74,21\%, Q=q=1092\text{кг/год}, \alpha=3,5, \\ \beta=3,9, \psi=5,0\text{с}^{-1}, A=0,013\text{м}, V=4\text{м/с} \quad (25)$$

**Висновки.** У результаті чисельного моделювання процесу сепарації сипкого матеріалу на малогабаритному аеродинамічному сепараторі циклонного типу було отримано залежності масового розподілу компонентів за об'ємною масою на виходах важких і легких компонентів  $\xi_h$  і  $\xi_l$  від ефективного діаметру

частинок  $D_p$  і швидкості повітря  $V$ . Окрім цього отримані залежності зміни об'ємних мас важких  $\rho_h$  і легких  $\rho_l$  компонентів від вищезазначених факторів досліджень. Встановлено, що різниця між  $\rho_h$  і  $\rho_l$  практично не змінюється. Отримані залежності дають змогу визначати швидкість потоку повітря  $V$  виходячи з необхідних об'ємних мас  $\rho_h$  і  $\rho_l$  та ефективного діаметру частинок сипкого матеріалу  $D_p$ .

У результаті чисельного моделювання механіко-технологічного процесу переміщення сипкого матеріалу під дією повітряного потоку отримано залежності розподілу кожної фракції частинок сипкого матеріалу по довжині області (коефіцієнт заповнення  $\chi$ , коефіцієнт розподілу  $\delta$ ) від ефективного діаметра частинок  $D_p$ , швидкості подачі повітря  $V$  та подачі сипкого матеріалу  $Q$ . За умови максимуму коефіцієнта заповнення  $\chi$  визначена система рівнянь, вирішуючи яку можна встановити раціональні режимні параметри зазначеного процесу.

У результаті чисельного моделювання процесу переміщення сипкого матеріалу під дією вібруючого решета отримано залежності зміни сумарної концентрації  $\theta$  і продуктивності  $q$  від подачі сипкого матеріалу  $Q$ , кута нахилу решета  $\alpha$ , частоти коливань решета  $\psi$  і амплітуди коливань решета  $A$ . За умови забезпечення ефективності процесу розділення сипкого матеріалу під дією вібруючого решета необхідно, щоб його продуктивність  $q$  дорівнювала значенню подачі сипкого матеріалу  $Q$  і була найбільшою, при цьому сумарна концентрація частинок сипкого матеріалу  $\theta$  повинна бути максимальною.

У результаті чисельного моделювання процесу переміщення сипкого матеріалу під дією вібруючої поверхні отримано залежності зміни коефіцієнта заповнення  $\chi$ , коефіцієнта розподілу  $\delta$  і продуктивності  $q$  від подачі сипкого матеріалу  $Q$ , кутів нахилу вібруючої поверхні  $\alpha$  та  $\beta$ , частоти коливань  $\psi$ , амплітуди коливань  $A$  і швидкості повітряного потоку  $V$ . За умови забезпечення ефективності процесу розділення сипкого матеріалу під дією вібруючої поверхні необхідно, щоб його продуктивність  $q$  дорівнювала значенню подачі сипкого матеріалу  $Q$  і була найбільшою, при цьому коефіцієнт заповнення  $\chi$  повинен бути максимальним.

### Список використаних джерел:

1. Richard, G. Holdich. (2002). *Fundamentals of Particle Technology*. Midland Information Technology and Publishing. Shepshed, Leicestershire, U.K. 173 p.
2. 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. P 1-6.
3. Hans, J. Herrmann. (1993). Molecular dynamics simulations of granular materials. *International Journal of Modern Physics*

- C. Vol. 4. No. 2. P. 309–316.
- 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. P. 153–166.
  - Pertti Broas. (2001). Advantages and problems of CAVE-visualisation for design purposes. Trans. VTT Symposium Virtual prototyping. Espoo, Finland, February 1 st. P. 73–81.
  - Bai C. (1996). Modelling of spray impingement processes. Ph.D Thesis. University of London.
  - 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). P. 1-6.
  - 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. Vol. 6. P. 411–415.
  - 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*. Vol. 2. P. 41–45.
  - Bai, C., Gosman, A. D. (1995). Development of methodology for spray impingement simulation. *SAE Technical Paper Series*. 21 p.
  - Khalid M. Saqr, Hossam S. Aly, Mazlan A. Wahid, Mohsin M. Sies. (2009). Numerical Simulation of Confined Vortex Flow Using a Modified k-ε Turbulence Model. *CFD Letters*. Vol. 1(2). P. 87-94.
  - Wallin, S. (2000). Engineering turbulence modeling for CFD with a focus on explicit algebraic Reynolds stress models. Doctoral thesis. Norstedts truckeri, Stockholm, Sweden. 124 p.

### Э. Б. Алиев, В. Ю. Дудин, А. С. Гаврильченко, В. В. Ивлев. Моделирование процесса сепарации сыпучего материала в зависимости от его физико-механических свойств

*Исследование процесса сепарации сыпучего материала проводили в три этапа моделирования в программном пакете STAR-CCM+. Первый этап заключался в моделировании процесса перемещения сыпучего материала под действием воздушного потока. Второй этап был направлен на моделирование процесса перемещения сыпучего материала под действием вибрирующего решета. Задачей третьего этапа моделирования было определение функции распределения частиц сыпучего материала по фракциям под действием вибрирующей поверхности.*

**Ключевые слова:** сыпучий материал, сепарация, моделирование, аэродинамические свойства, геометрические размеры, объемный вес.

### E. Aliev, V. Dudin, A. Gavrilchenko, V. Ivlev. Modeling of the separation process of bulk material according to its physical and mechanical properties

*The bulk material separation process was investigated in three stages of modeling in the STAR-CCM+. The first step was to simulate the process of bulk material moving under the action of airflow. The second stage was aimed at modeling the process of moving the bulk material under the action of a vibrating sieve. The task of the third stage of modeling was to determine the particle distribution function of the bulk material by fractions under the action of a vibrating surface.*

**Keywords:** bulk material, separation, modeling, aerodynamic properties, geometric dimensions, bulk weight.

