

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 631.362:004.942

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.154-164](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.154-164)**Е. Б. Алієв**, проф., д-р техн. наук, **І. В. Литвинов***Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна**e-mail: aliev@meta.ua, illalitinov901@gmail.com*

Чисельне моделювання системи «сито – частинки матеріалу – щітка»

Виконано комплексне чисельне моделювання процесу очищення сита щіткою в середовищі Simcenter Star-CCM+, що дозволило детально відтворити просторову взаємодію між елементами системи «сито – частинки матеріалу – щітка» та встановити закономірності впливу конструктивних і кінематичних параметрів на ефективність процесу очищення. Застосування моделі дискретних елементів (DEM) у поєднанні з Лагранжевою багатофазною постановкою забезпечило адекватне відображення контактної взаємодії гнучких волокон із частинками матеріалу та стінками конструкції, а використання нестационарного неявного розрахунку гарантувало стабільність і високу точність чисельного інтегрування. У результаті багатофакторного моделювання визначено вплив чотирьох основних параметрів – кута нахилу щітки, відносного розміру частинок, кількості волокон уздовж напрямку руху і швидкості переміщення – на три ключові критерії ефективності: частку частинок, що пройшли крізь сито, залишилися на поверхні та зійшли з неї.

чисельне моделювання, DEM, щітка, сито, частинки матеріалу, ефективність очищення

Постановка проблеми. У процесі роботи ситових машин під час сортування, очищення чи класифікації сипких матеріалів відбувається засмічення отворів сит частинками різного розміру, форми та вологості, що суттєво знижує їхню пропускну здатність і ефективність розділення. Для запобігання цьому застосовуються щіткові пристрої очищення, які взаємодіють із поверхнею сита, видаляючи застряглі частинки. Проте ефективність такої взаємодії залежить від великої кількості факторів – геометричних параметрів щітки та сита, фізико-механічних властивостей частинок, кінематичних режимів руху, кута нахилу щітки, густоти розміщення волокон тощо [1–2].

Експериментальне дослідження цих процесів є складним, трудомістким і не завжди дає змогу отримати повну інформацію про мікромеханіку взаємодії волокон щітки з частинками в отворах сита [3–5]. Тому постає необхідність у створенні чисельної моделі системи «сито – частинки матеріалу – щітка», яка б дозволила відтворити динаміку процесу очищення, оцінити вплив основних параметрів і визначити умови, за яких забезпечується найефективніше очищення сита.

Таким чином, проблема полягає у розробленні адекватної фізико-математичної та чисельної моделі, яка б описувала взаємодію частинок, щітки та поверхні сита, дозволяла прогнозувати ефективність очищення та оптимізувати конструктивні й кінематичні параметри щіткових систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні пакети DEM (зокрема Simcenter STAR-CCM+) розвивають моделі гнучких волокон з урахуванням внутрішнього демпфування зв'язків між сегментами. У релізі STAR-CCM+ 2210 з'явилась підтримка демпфування швидкості в моделі гнучких волокон, що дозволяє реалістично відтворювати затухання коливань волокон і підвищує стабільність та фізичність розрахунків. Це важливо для задач, де ворсини (волокна) коливаються в повітрі або під дією контактів і мають втрачати енергію не лише через зовнішній

аеродинамічний опір, а й через внутрішні механізми [6].

Останні роботи підтверджують, що форма частинок (асферичність, видовженість) суттєво змінює імовірність заклинювання отворів та транспортні властивості потоків частинок. CFD-DEM дослідження показують, що навіть при однаковому середньому діаметрі зміна форми може призвести до принципово різної динаміки «прохід/заклинювання» в отворах. Для задач просіювання й очищення сита це означає необхідність використання адекватних геометричних апроксимацій частинок у DEM (не лише сфер) або застосування моделей змішаних/складених частинок [8–9].

У DEM-дослідженнях для контактів «частинка–частинка» та «частинка–стінка» найчастіше застосовують модель Герца–Міндліна. Останні огляди й дослідження підкреслюють, що вибір і калібрування контактної моделі (жорсткість, коефіцієнт демпфування, коефіцієнт тертя) суттєво впливають на макроскопічну поведінку (включно з явищем заклинювання), тому необхідна експериментальна чи чисельна калібровка параметрів для конкретного матеріалу і діапазону навантажень [8, 10].

Аналітичні та чисельні дослідження [1, 11] механізмів блокування отворів надають формальні залежності та підходи до оцінки ймовірності заклинювання, але сучасні роботи все частіше комбінують DEM (для твердих тіл) та, за потреби, CFD (щоб врахувати вплив повітря/потoku), особливо коли рух частинок супроводжується значною аеродинамічною взаємодією. Окремі дослідження демонструють ефективність DEM-підходів для відтворення процесів заклинювання в вібраційних й інших ситових апаратах.

Праці [12], присвячені конкретним чистильним механізмам (еластичні кульки, щітки, рухомі елементи в комбайнах), демонструють користь CFD-DEM/DEM-MBD підходів для оптимізації конструкції та режимів. Дослідження показують вплив параметрів (частинки, кут нахилу, швидкість, геометрія щітки) на ефективність очищення і втрати матеріалу, що прямо корелює з вашою постановкою задачі.

Окрім STAR-CCM+ [13], інші DEM-платформи (наприклад, Rocky DEM [14]) також мають гнучкі моделі волокон із можливістю руйнування, пластичності та складнішої поведінки сегментів. Порівняльний аналіз підходів показує: моделі на основі послідовно зв'язаних циліндричних/сферо-циліндричних сегментів дають хорошу якість відтворення згинальних і осевих властивостей волокон при розумній обчислювальній ефективності [15].

Постановка завдання. Постановка задачі чисельного моделювання полягає у відтворенні й встановленні закономірностей процесу очищення сита від частинок матеріалу щіткою шляхом побудови просторової моделі системи «сито – частинки матеріалу – щітка».

Виклад основного матеріалу. Просторова схема моделі системи «сито – частинки матеріалу – щітка» наведена на рис. 1. Розглядається сітка розмірами $L_{gy} \times L_{gx}$, яка має рівномірно розташовані квадратні отвори зі стороною D_o . У отворах сита розміщуються частинки сипкого матеріалу, форма яких апроксимується композицією трьох сфер, з'єднаних у вигляді еліпсоїда, з характерними розмірами D_p і d_p . Такий підхід дозволяє врахувати асферичність та нерегулярність геометрії частинки матеріалу. Над поверхнею сита розташована область щітки з розмірами $L_{bx} \times L_{by} \times L_{bz}$, яка складається з волокон сферо-циліндричної форми у кількості 28×4 штук. Геометричні параметри кожного волокна визначаються діаметром D_b , довжиною L_{bz} і кількістю сегментів N_b . Щітка переміщується паралельно площині сита зі швидкістю V_b , імітуючи процес механічного очищення поверхні від частинок, що заклинюються в отворах. Під ситом розташований приймальний бункер для збору матеріалу, який проходить крізь отвори після дії щітки. Уся система «сито – щітка – частинки» розміщується в робочій області, що відповідає об'єму збірника сходу матеріалу. Таким чином, чисельна постановка задачі спрямована на дослідження закономірностей взаємодії волокон щітки з частинками, які знаходяться у отворах сита, та оцінку

ефективності їх видалення залежно від геометричних, кінематичних і фізико-механічних параметрів системи.

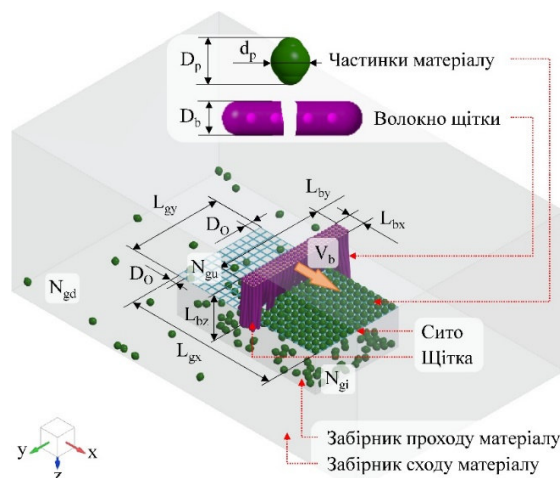


Рисунок 1 – Просторова схема моделі системи «сито – частинки матеріалу – щітка»

Джерело: розроблено авторами

В проєкції наведено просторову схему моделі системи «сито – частинки матеріалу – щітка» (рис. 2).

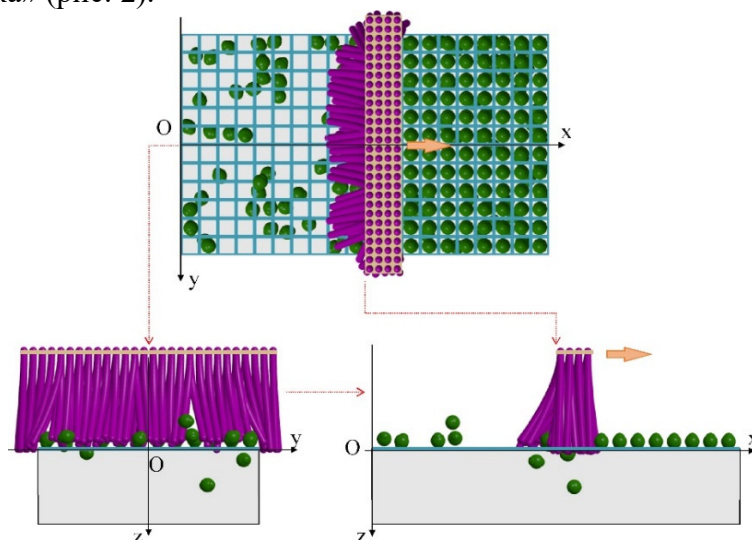


Рисунок 2 – Проекції просторової схема моделі системи «сито – частинки матеріалу – щітка»

Джерело: розроблено авторами

Для чисельного моделювання процесу очищення сита щіткою у програмному пакеті Simcenter Star-CCM+ обрано комплекс фізичних моделей, що забезпечують адекватне відтворення механіки взаємодії гнучких волокон щітки, частинок матеріалу та елементів конструкції сита. Основними моделями є безсіткова DEM, Лагранжева багатофазність, модель дискретних елементів (DEM), Transient Implicit, Gravity, а також можливість Solution Interpolation для оптимізації чисельного рішення.

Безсіткова DEM використовується для моделювання руху та взаємодії частинок без потреби в структурованій сітці. Цей підхід забезпечує ефективну обробку великих масивів частинок, зменшує обчислювальні ресурси та дозволяє реалізувати складну кінематику волокон щітки при їхній взаємодії з частинками та стінками.

Лагранжева багатофазність дозволяє моделювати дві окремі фази: частинки матеріалу та волокна щітки, які рухаються незалежно, зберігаючи масові та кінематичні

характеристики. Кожна фаза визначається окремими фізичними властивостями та взаємодією з іншими фазами через контактні закони.

Модель дискретних елементів (DEM) забезпечує відтворення контактних сил та моментів між частинками, між частинками та волокнами, а також між волокнами і стінками сита. Обрані підмоделі для кожної фази наведено в табл. 1, а їхні взаємодії – у табл. 2.

Таблиця 1 – Обрані підмоделі фаз чисельного моделювання

Фаза	Обрана модель	Призначення
Частинки матеріалу	Частинки DEM, суцільна, постійна густина, змішані частинки	Відтворення руху та взаємодій частинок різної форми та розмірів у полі сита
Волокна щітки	Частинки DEM, суцільна, гнучке волокно (послідовно з'єднані циліндричні сегменти), постійна густина	Моделювання гнучких волокон із врахуванням осевої та згинальної жорсткості, коливань та демпфування

Таблиця 2 – Обрані підмоделі взаємодії фаз чисельного моделювання

Взаємодія	Модель	Призначення
Волокно – волокно	Лінійна пружина, сила кочення	Відтворення пружної деформації та тертя між сегментами волокон
Волокно – стінка щітки	Лінійна пружина, зв'язок частинка–стінка, сила кочення	Жорсткий контакт волокон із основою щітки
Волокно – стінка сита	Лінійна пружина, сила кочення	Контакти волокон із конструкційними стінками сита
Частинки – частинки	Модель Герца–Міндліна, сила кочення	Взаємодія частинок матеріалу між собою
Волокно – частинки	Лінійна пружина, сила кочення	Контакти волокон із частинками матеріалу
Частинки – стінки	Модель Герца–Міндліна, сила кочення	Контакти частинок із конструкційними стінками сита

Нестационарний неявний розрахунок забезпечує стабільність інтегрування рівнянь руху при високій жорсткості контактів та великій кількості елементів системи, що особливо важливо для моделювання взаємодії гнучких волокон та дрібних частинок у вузьких отворах сита. Час ітерацій складає – 0,001 с, кількість ітерацій за один крок – 5, загальний час моделювання 5 с.

Сила тяжіння включена як обов'язкова зовнішня масова сила для обох фаз, що дозволяє коректно враховувати переміщення частинок та волокон під дією власної ваги та взаємодії з конструкцією системи.

Інтерполяція рішення використовується для прискорення обчислень та згладжування результатів при великій кількості контактів і фазових взаємодій.

Фізико-механічні властивості фаз моделювання (частинок і волокон) та їхні взаємодії між собою, стінками області і сита наведені в табл. 3.

За результатами аналізу попередніх досліджень як основні фактори (табл. 4) було обрано:

- відношення кількості волокон щітки вздовж напрямку її руху, N_{bx} ;
- відносний розмір частинок K_{po} , як відношення меншого діаметра частинки матеріалу d_p до геометричного розміру отвору сита D_o :

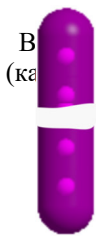
$$K_{po} = \frac{d_p}{D_o}; \quad (1)$$

- швидкість переміщення щітки V_b ;
- кут нахилу щітки відносно сита γ , °.

Кількість волокон щітки вздовж напрямку її руху (N_{bx}) визначає густину контакту волокон із поверхнею сита та частинками матеріалу, що безпосередньо

впливає на інтенсивність очищення та рівномірність зняття налиплих частинок. Відносний розмір частинок K_{po} характеризує можливість проходження або затримання частинок у отворах, а також визначає ефективність самоочищення сита. Швидкість переміщення щітки V_b впливає на кінетичну енергію взаємодії волокон з частинками та ситом, що визначає як інтенсивність очищення, так і можливі пошкодження робочої поверхні. Кут нахилу щітки відносно сита γ визначає орієнтацію векторів контактних зусиль між волокнами і поверхнею сита. При зміні цього кута змінюється не лише глибина проникнення волокон у отвори сита, а й напрямок реакції при ковзанні, що впливає на характер очищення (зміщувальний, зішкрібальний або комбінований). Оптимальний кут забезпечує максимальну ефективність видалення частинок при мінімальному навантаженні на волокна та поверхню сита. Таким чином, обрані фактори є найбільш значущими з точки зору впливу на ефективність процесу очищення сита щіткою та забезпечують можливість комплексної оцінки механізму взаємодії волокон із частинками матеріалу.

Таблиця 3 – Фізико-механічні властивості фаз моделювання та їхні взаємодії

Фаза / взаємодія	Властивість / параметр	Значення
Волокно (капролон) 	Число сегментів волокна Довжина волокна, м Діаметр волокна, м Щільність частинок, кг/м^3 Модуль Юнга, МПа Коефіцієнт Пуассона Коефіцієнт статичного тертя Коефіцієнт опору кочення Коефіцієнт відскоку Жорсткість пружного елемента, Н/м	20 0,05 0,001 1140 3000 0,35 0,25 0,1 0,1 10^6
Частинка 	Відносні координати центрів сфер і їх радіуси: – сфера 1 – сфера 2 – сфера 3 Щільність частинок, кг/м^3 Модуль Юнга, МПа Коефіцієнт Пуассона Коефіцієнт статичного тертя Коефіцієнт відскоку	(0; 0; 0,5); $r = 0,7$ (0; 0; 0); $r = 1$ (0; 0; -0,5); $r = 0,7$ 600 15 0,2 0,53 0,1
Стінка області (сталь)	Щільність, кг/м^3 Модуль зсуву, Па Коефіцієнт Пуассона	7800 $7,9 \times 10^{10}$ 0,3
Конструкційна стінка сита (капролон)	Щільність, кг/м^3 Модуль зсуву, Па Коефіцієнт Пуассона	1140 3000 0,35
Волокно та стінка (сталь)	Коефіцієнт статичного тертя Коефіцієнт тертя кочення Коефіцієнт відновлення після зіткнення	0,48 0,05 0,1
Частинка та стінка (сталь)	Коефіцієнт статичного тертя Коефіцієнт тертя кочення Коефіцієнт відновлення після зіткнення	0,554 0,05 0,1
Волокно та стінка сита (капролон)	Коефіцієнт статичного тертя Коефіцієнт тертя кочення Коефіцієнт відновлення після зіткнення	0,25 0,05 0,1
Частинка та стінка сита (капролон)	Коефіцієнт статичного тертя Коефіцієнт тертя кочення Коефіцієнт відновлення після зіткнення	0,62 0,05 0,1

Таблиця 4 – Рівні варіювання факторів чисельного моделювання

Рівень	Кут нахилу щітки γ , °	Відношення кількість волокон щітки вздовж її руху N_{bx}	Відношення меншого діаметра частинки матеріалу до геометричного розміру отвору сита K_{po}	Швидкість переміщення щітки V_b , м/с
Кодування	x_1	x_2	x_3	x_4
Нижній (–1)	–30	1	1,05	0,4
Нижній (0)	0	5	1,10	1,2
Верхній (+1)	30	9	1,15	2,0
Інтервал	30	4	0,05	0,8

У якості критеріїв досліджень визначалися:

- кількість частинок, що пройшли через сито – N_{gi} ;
- кількість частинок, що залишилися на поверхні сита – N_{gu} ;
- кількість частинок, що зійшли з поверхні сита – N_{gd} .

Для оцінювання ефективності процесу очищення за отриманими показниками обчислювалися відповідні частки (рис. 3):

- частка частинок, що пройшли крізь сито:

$$\varepsilon_{gi} = 100 \frac{N_{gi}}{N_{gi} + N_{gu} + N_{gd}}; \quad (2)$$

- частка частинок, що залишилися на ситі:

$$\varepsilon_{gu} = 100 \frac{N_{gu}}{N_{gi} + N_{gu} + N_{gd}}; \quad (3)$$

- частка частинок, що зійшли з поверхні:

$$\varepsilon_{gd} = 100 \frac{N_{gd}}{N_{gi} + N_{gu} + N_{gd}}. \quad (4)$$

Такий підхід дозволяє кількісно оцінити ефективність очищення сита щіткою, визначити оптимальні умови роботи та виявити вплив конструктивних і кінематичних параметрів на розподіл частинок у процесі.

Моделювання проводилось за схемою повнофакторного чисельного експерименту, що передбачає варіювання всіх обраних факторів на заданих рівнях з урахуванням їх можливого взаємного впливу. Такий підхід дозволяє повністю оцінити вплив кожного параметра на ефективність процесу очищення сита. Загальна кількість дослідів $3^4 = 81$. Число повторювань кожного дослідів – 3.

Візуалізацію динаміки системи «сито – частинки матеріалу – щітка» наведено на рис. 4. На зображенні представлено послідовність взаємодії волокон щітки з частинками матеріалу на поверхні сита, що дає змогу простежити процес очищення отворів, переміщення та розподіл частинок у часі.

Регресійний аналіз результатів чисельного моделювання проводився у середовищі Wolfram Cloud, яке забезпечує широкі можливості для математичної обробки експериментальних та модельних даних. Для опису отриманих залежностей між досліджуваними факторами та критеріями відгуку застосовано функцію NonlinearModelFit, що дозволяє побудувати нелінійну регресійну модель, визначити її параметри та оцінити якість апроксимації. За допомогою функцій ParameterTable і FitCurvatureTable виконано детальний аналіз статистичних характеристик отриманої моделі – стандартних похибок параметрів, t-статистик, коефіцієнтів детермінації та кривизни поверхні відгуку. Для перевірки адекватності побудованої моделі та значущості окремих факторів використано критерії Стюдента (для оцінювання

коефіцієнтів рівняння регресії) і критерій Фішера (для оцінювання загальної адекватності моделі).

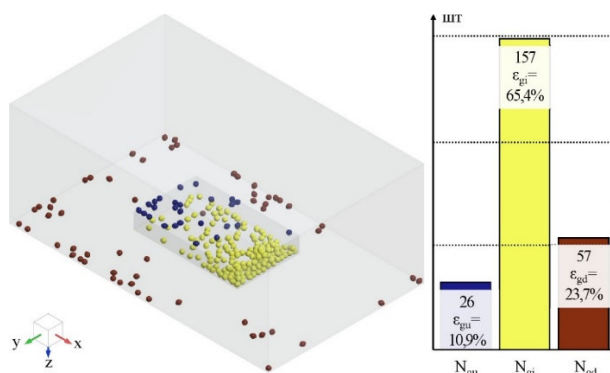


Рисунок 3 – Результат взаємодії в системі «сито – частинки матеріалу – щітка»

Джерело: розроблено авторами

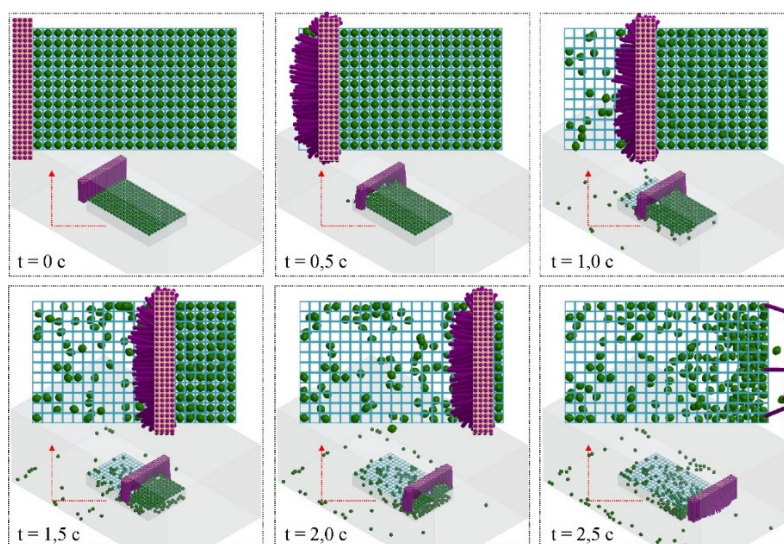


Рисунок 4 – Візуалізацію динаміки системи «сито – частинки матеріалу – щітка»

Джерело: розроблено авторами

На основі результатів чисельного моделювання та подальшої статистичної обробки даних отримано рівняння регресії другого порядку для таких критеріїв відгуку:

– частка частинок, що залишилися на ситі (рис. 5):

$$\varepsilon_{gu} = 3,2309 - 0,356443 \gamma + 35,7037 K_{po} - 7,2169 N_{bx} + 0,01678 \gamma N_{bx} + 0,386921 N_{bx}^2 + 21,6759 V - 6,67245 V_b^2; \quad (5)$$

– частка частинок, що зійшли з поверхні (рис. 6):

$$\varepsilon_{gd} = -3078,21 + 2,14451 \gamma - 0,00881687 \gamma^2 + 5513,39 K_{po} - 1,81481 \gamma K_{po} - 2442,96 K_{po}^2 - 10,3512 N_{bx} + 13,0556 K_{po} N_{bx} - 0,24456 N_{bx}^2 - 2,34491 V_b; \quad (6)$$

– частка частинок, що пройшли крізь сито (рис. 7):

$$\varepsilon_{gi} = 100 - \varepsilon_{gu} - \varepsilon_{gd} = 3174,98 - 1,78806 \gamma + 0,00881687 \gamma^2 - 5549,09 K_{po} + 1,81481 \gamma K_{po} + 2442,96 K_{po}^2 + 17,5681 N_{bx} - 0,0167824 \gamma N_{bx} - 13,0556 K_{po} N_{bx} - 0,142361 N_{bx}^2 - 19,331 V_b + 6,67245 V_b^2. \quad (7)$$

Критерій Фішера для рівняння (5) становить 163,33, а для рівняння (6) – 138,82, що значно перевищує табличне значення 1,96. Це підтверджує статистичну адекватність отриманих рівнянь.

Сума констант і коефіцієнтів у трьох рівняннях дає умовний баланс 100% (логічно для часток розподілу частинок). Це означає, що моделі сумісні й описують розподіл однієї й тієї ж множини частинок між трьома станами: пройшли крізь сито (ϵ_{gi}), залишились на ситі (ϵ_{gu}) і зійшли з поверхні сита (ϵ_{gd}). Тому позитивний вплив фактора на одну частку, як правило, супроводжується від'ємним ефектом на одну або дві інші.

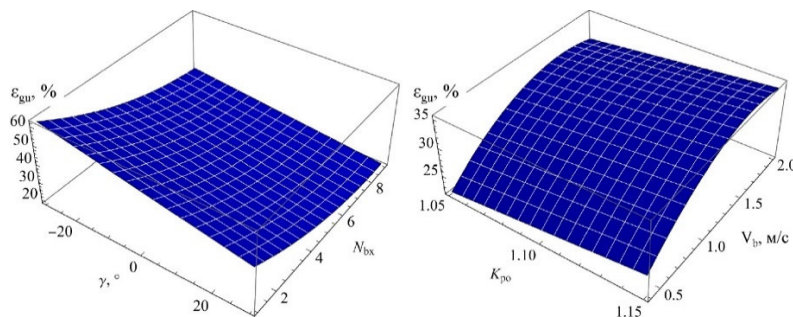


Рисунок 5 – Залежність зміни частки частинок ϵ_{gu} , що залишаються на ситі, від кута нахилу щітки γ , відносної кількості волокон щітки вздовж напрямку її руху N_{bx} , відношення меншого діаметра частинки матеріалу до геометричного розміру отвору сита K_{po} та швидкості переміщення щітки V_b
Джерело: розроблено авторами

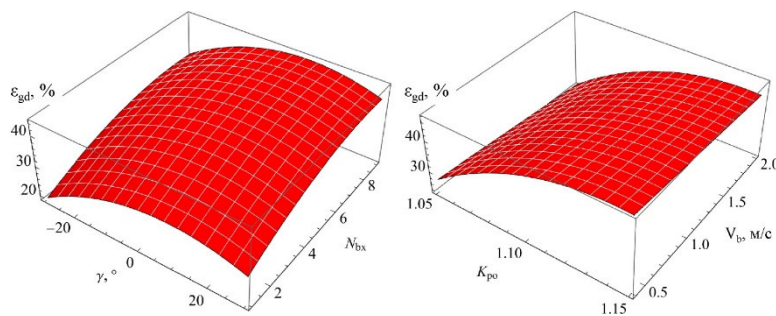


Рисунок 6 – Залежність зміни частки частинок ϵ_{gd} , що зійшли з поверхні, від кута нахилу щітки γ , відносної кількості волокон щітки вздовж напрямку її руху N_{bx} , відношення меншого діаметра частинки матеріалу до геометричного розміру отвору сита K_{po} та швидкості переміщення щітки V_b
Джерело: розроблено авторами

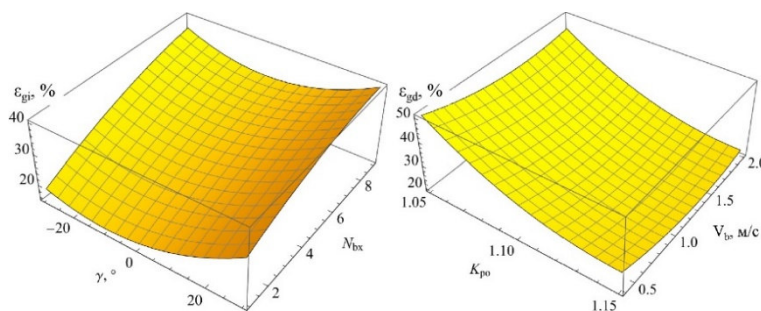


Рисунок 7 – Залежність зміни частки частинок ϵ_{gi} , що пройшли крізь сито, від кута нахилу щітки γ , відносної кількості волокон щітки вздовж напрямку її руху N_{bx} , відношення меншого діаметра частинки матеріалу до геометричного розміру отвору сита K_{po} та швидкості переміщення щітки V_b
Джерело: розроблено авторами

Вплив відносного розміру частинки K_{po} . Збільшення відносного розміру частинки у рівнянні для ϵ_{gu} призводить до зростання частки матеріалу, що залишається на ситі. Коли розмір частинки стає порівняним або перевищує розмір отвору, ймовірність її проходження зменшується – частинка частіше застрягає або заклинюється. У рівнянні ϵ_{gi} збільшення K_{po} знижує частку частинок, що пройшли крізь

сито. У рівнянні ε_{gd} присутній великий позитивний лінійний і значний від'ємний квадратичний коефіцієнт, що свідчить про виражену нелінійність: при початковому зростанні K_{po} частка частинок, що сходять із поверхні ε_{gd} , збільшується – це можна пояснити тим, що частинки, які не щільно застрягають, вибиваються щіткою. Проте при подальшому зростанні K_{po} квадратичний член починає домінувати, і ε_{gd} зменшується через надмірне блокування великих частинок у комірках. Таким чином, існує критична межа K_{po} , після якої спостерігається переважання ефекту заклинювання.

Вплив кількості волокон уздовж напрямку руху N_{bx} . У рівнянні ε_{gu} коефіцієнт при N_{bx} має від'ємне значення, а квадратичний – додатне. Це означає, що збільшення кількості волокон спочатку зменшує частку матеріалу, який залишається на ситі, тобто густіша щітка ефективніше очищує отвори. Проте за надмірного збільшення N_{bx} ефект насичується – надлишкова густина знижує ефективність очищення. У рівнянні ε_{gi} лінійний коефіцієнт позитивний, тобто збільшення N_{bx} підвищує частку частинок, що проходять крізь сито. У рівнянні ε_{gd} збільшення N_{bx} зменшує частку частинок, що сходять із поверхні, однак взаємодія з K_{po} змінює цей ефект – при більших K_{po} вплив N_{bx} може посилювати сходження частинок. З фізичної точки зору, більша кількість волокон забезпечує інтенсивніший контакт із частинками, збільшуючи частоту зіткнень і шанс витіснення частинок із отворів. Водночас надмірна густина волокон може ускладнювати виведення матеріалу з-під щітки, що пояснює наявність квадратичної залежності.

Вплив кута нахилу щітки γ . Коефіцієнт при γ у рівнянні ε_{gu} має невелике значення, що вказує на помірний вплив кута на процес. Зі збільшенням кута нахилу частка матеріалу, що залишається на ситі, незначно зменшується. У рівняннях ε_{gd} та ε_{gi} присутні як лінійні, так і квадратичні члени з малими коефіцієнтами, що свідчить про слабку, але нелінійну залежність. Взаємодія з параметром K_{po} показує, що зміна кута впливає на ефективність очищення через зміну напрямку сил тертя та зсуву. Кут нахилу визначає співвідношення нормальних і тангенціальних складових сили, що діє на частинку при контакті з волокном, і впливає на проникнення ворсини в отвір та ефект «зскрібання». Помірне нахилення покращує очищення, тоді як занадто великий кут може знизити ефективність за рахунок зменшення сили натискання.

Вплив швидкості переміщення щітки V_b . У рівнянні ε_{gu} лінійний і квадратичний члени мають протилежні знаки, що утворює опуклу параболу — існує оптимальна швидкість, при якій частка частинок, що залишаються на ситі, максимальна. У рівнянні ε_{gi} залежність має форму U-подібної кривої: мінімум ε_{gi} відповідає максимуму ε_{gu} . При надто малих або надто великих швидкостях частка частинок, що проходять, зростає. У рівнянні ε_{gd} відсутній квадратичний термін — швидкість має переважно лінійний вплив: зі збільшенням V_b частка частинок, що сходять, зменшується. Фізично це пояснюється тим, що при вищих швидкостях частинки швидше викидаються або видаляються з робочої зони, проте через інерційні ефекти частина з них може відлітати в приймач. Оптимальна швидкість визначає баланс між кінетичною енергією волокон та стабільністю контакту: надмірна швидкість викликає коливання, відскоки і зниження рівномірності очищення. Згідно з моделлю, оптимальна швидкість щітки становить приблизно $V_b = 1,4\text{--}1,6$ м/с, при якій спостерігаються екстремальні значення — максимальна частка залишених і мінімальна частка пройдених частинок. Для підвищення ефективності проходження доцільно працювати поза цим діапазоном — або при нижчих, або при вищих швидкостях, залежно від мети (підвищення чи очищення).

Найбільш впливовим фактором є відносний розмір частинки (K_{po}), який визначає характер взаємодії з отворами сита. Для підвищення пропускної здатності сита слід зменшувати K_{po} (тобто зменшувати розмір частинок або збільшувати отвори). Щільність волокон N_{bx} сприяє ефективнішому очищенню, однак має межу ефективності. Швидкість щітки V_b вимагає оптимізації в межах стабільного режиму,

тоді як кут нахилу γ забезпечує можливість тонкого регулювання динаміки контакту між волокнами і частинками, впливаючи на інтенсивність очищення поверхні.

Висновки. Виконано комплексне чисельне моделювання процесу очищення сита щіткою в середовищі Simcenter Star-CCM+, що дозволило відтворити просторову взаємодію між елементами системи «сито – частинки матеріалу – щітка» та визначити закономірності впливу конструктивних і кінематичних параметрів на ефективність очищення. Застосування моделі дискретних елементів (DEM) у поєднанні з Лагранжевою багатофазною постановкою забезпечило адекватне описання контактної взаємодії гнучких волокон із частинками матеріалу та стінками конструкції, а використання нестационарного неявного розрахунку гарантувало стабільність і точність чисельного інтегрування.

За результатами багатофакторного моделювання визначено вплив чотирьох основних параметрів – кута нахилу щітки γ , відносного розміру частинок K_{po} , кількості волокон уздовж напрямку руху N_{bx} і швидкості переміщення V_b – на три ключові показники: частку частинок, що пройшли крізь сито ε_{gi} (7), залишилися на ситі ε_{gu} (5) та зійшли з його поверхні ε_{gd} (6). Отримані рівняння регресії дозволили кількісно оцінити взаємозв'язок факторів. Встановлено, що збільшення швидкості руху щітки і зменшення кута її нахилу сприяють інтенсифікації процесу очищення, тоді як зростання відносного розміру частинок призводить до підвищення їх залишкової кількості на ситі. Виявлено нелінійну залежність між параметрами системи, що зумовлює існування оптимальних поєднань геометричних і кінематичних характеристик, при яких досягається максимальна ефективність очищення без пошкодження поверхні сита та волокон щітки.

Список літератури

1. Katarzyna L., Remigiusz M., Piotr W. Mathematical and empirical description of screen blocking. *Granular Matter*. 2016. Vol. 18. Article number 13. DOI: 10.1007/s10035-016-0622-4
2. Feder S., Keska W., Wlodarczyk K. Pneumatic aiding of the process of screening granular mixtures using a screening table. *Agric. Eng.* 2008. Vol. 4(102). P. 263–270.
3. Васильковський О.М., Лещенко С.М., Мороз С.М., Нестеренко О.В., Молокост Л.А. До створення концепції «ідеального» решета зернового сепаратора. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2020. Вип. 50. С. 52–58. DOI: 10.32515/2414-3820.2020.50.52-58
4. Olshansky V.P., Bredykhin V.V., Lukyanenko V.M., Piven M.V., Slipchenko M.V., Kharchenko S.O. Theory of grain separation: *monograph*. Kharkiv. 2017. 802 p.
5. Olshanskyi V.P., Slipchenko M.V., Olshanskyi O.V., Bredykhin V.V. Dynamics of pulse-loaded nonlinear oscillators: *monograph*. Kharkiv. 2022. 262 p.
6. Simcenter. Simcenter STAR-CCM+ 2210 released: What's new? [Electronic resource]. – Access mode: https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/simcenter-star-ccm-2210-released-whats-new/?utm_source=chatgpt.com
7. Qiu Z., Xiao Q., Yuan H., Han X., Li C. Particle shape and clogging in fluid-driven flow: A coupled CFD-DEM study. *Powder Technology*. 2024. Vol. 437. 119566. DOI: 10.1016/j.powtec.2024.119566
8. Zhao Z., Wu M., Jiang X. A Review of Contact Models' Properties for Discrete Element Simulation in Agricultural Engineering. *Agriculture*. 2024, Val. 14. 238. DOI: 10.3390/agriculture14020238
9. Shevchenko I., Aliiev E. Study of the process of calibration of confectionery sunflower seeds. *Food Science and Technology*. 2018. Vol. 12, Is. 4. P. 135–142. DOI: 10.15673/fst.v12i4.1209
10. Shen J., Wheeler C., Ilic D., Chen J. Application of open source FEM and DEM simulations for dynamic belt deflection modelling. *Powder Technology*. 2019. Vol. 357. P. 171–185. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.08.068.
11. Li J., Webb C., Pandiella S.S., Campbell G.M. Discrete particle motion on sieve—a numerical study using the DEN simulation. *Powder Technol.* 2003. Val. 133. P. 190–203. DOI: 10.1016/S0032-5910(03)00092-5
12. Bi Y., Song Q., Zhu J., Feng J., Dong J., Zhao P., Huang Y., Fu Z., Zhou J. 2024. Performance of elastic ball screen-cleaning device based on DEM-MBD coupling simulation. *Particuology*. Vol. 93. P. 247–263. DOI: 10.1016/j.partic.2024.07.003
13. Алієв Е. Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: *Аграрна наука*. 2023. 340 с. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9
14. Boset L. D., Wako A., Zewdie B. Determination of Terminal Velocity of Some Agricultural Grain Using Ansys Rocky DEM - CFD Coupling Simulation. *Science Development*. 2023. Vol. 4(2). P. 28–35. DOI: 10.11648/j.scidev.20230402.12
15. Devpalli D., Mayavaram R., Singh N., Wollschlager J. Challenges in implementing fiber-fiber interaction in a discrete element method analysis of fiber orientation. *Conference: SPE ANTEC 2024At*: St Louis.

References

1. Katarzyna, L., Remigiusz, M., & Piotr, W. (2016). Mathematical and empirical description of screen blocking. *Granular Matter*, 18, Article 13. <https://doi.org/10.1007/s10035-016-0622-4>.
2. Feder, S., Keska, W., & Wlodarczyk, K. (2008). Pneumatic aiding of the process of screening granular mixtures using a screening table. *Agric. Eng.*, 4(102), 263–270.
3. Vasylykovskiy, O. M., Leshchenko, S. M., Moroz, S. M., Nesterenko, O. V., & Molokost, L. A. (2020). Development toward the concept of the "ideal" sieve of a grain separator. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, 50, 52–58. doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.52-58 [in Ukrainian].
4. Olshansky, V. P., Bredykhin, V. V., Lukyanenko, V. M., Piven, M. V., Slipchenko, M. V., & Kharchenko, S. O. (2017). *Theory of grain separation* (Monograph, 802 p.). Kharkiv.
5. Olshansky, V. P., Slipchenko, M. V., Olshansky, O. V., & Bredykhin, V. V. (2022). *Dynamics of pulse-loaded nonlinear oscillators* (Monograph, 262 p.). Kharkiv.
6. Simcenter. (n.d.). *Simcenter STAR-CCM+ 2210 released: What's new?* Retrieved from blogs.sw.siemens.com/simcenter/simcenter-star-ccm-2210-released-whats-new/?utm_source=chatgpt.com.
7. Qiu, Z., Xiao, Q., Yuan, H., Han, X., & Li, C. (2024). Particle shape and clogging in fluid-driven flow: A coupled CFD-DEM study. *Powder Technology*, 437, 119566. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119566>.
8. Zhao, Z., Wu, M., & Jiang, X. (2024). A review of contact models' properties for discrete element simulation in agricultural engineering. *Agriculture*, 14, 238. <https://doi.org/10.3390/agriculture14020238>.
9. Shevchenko, I., & Aliiev, E. (2018). Study of the process of calibration of confectionery sunflower seeds. *Food Science and Technology*, 12(4), 135–142. <https://doi.org/10.15673/fst.v12i4.1209>.
10. Shen, J., Wheeler, C., Ilic, D., & Chen, J. (2019). Application of open source FEM and DEM simulations for dynamic belt deflection modelling. *Powder Technology*, 357, 171–185. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.08.068>.
11. Li, J., Webb, C., Pandiella, S. S., & Campbell, G. M. (2003). Discrete particle motion on sieve – A numerical study using the DEM simulation. *Powder Technol.*, 133, 190–203. [doi.org/10.1016/S0032-5910\(03\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(03)00092-5).
12. Bi, Y., Song, Q., Zhu, J., Feng, J., Dong, J., Zhao, P., Huang, Y., Fu, Z., & Zhou, J. (2024). Performance of elastic ball screen-cleaning device based on DEM-MBD coupling simulation. *Particuology*, 93, 247–263. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2024.07.003>.
13. Aliiev, E. B. (2023). *Chyselne modeliuvannia protsesiv ahropromyslovoho vyrobnytstva* (340 p.). Kyiv: Ahrarna nauka. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9> [in Ukrainian].
14. Boset, L. D., Wako, A., & Zewdie, B. (2023). Determination of terminal velocity of some agricultural grain using Ansys Rocky DEM-CFD coupling simulation. *Science Development*, 4(2), 28–35. <https://doi.org/10.11648/j.scidev.20230402.12>.
15. Devpalli, D., Mayavaram, R., Singh, N., & Wollschlager, J. (2024). Challenges in implementing fiber-fiber interaction in a discrete element method analysis of fiber orientation. *SPE ANTEC 2024 Conference Proceedings*, St. Louis.

Elchyn Aliiev, Prof., DSc., Illia Lytvynov

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Numerical Simulation of the «Sieve – Material Particles – Brush» System

A comprehensive numerical simulation of the sieve cleaning process using a brush was carried out in Simcenter Star-CCM+, which allowed detailed reproduction of the spatial interaction between the elements of the «sieve – material particles – brush» system and identification of the effects of design and kinematic parameters on cleaning efficiency. The application of the Discrete Element Method (DEM) combined with a Lagrangian multiphase approach provided an accurate representation of the contact interaction between flexible bristles, material particles, and the sieve walls, while the use of an unsteady implicit solver ensured stability and high accuracy of numerical integration.

Multifactor simulations determined the influence of four main parameters – brush inclination angle γ , relative particle size K_{po} , number of bristles along the motion direction N_{bx} , and brush velocity V_b – on three key performance criteria: the fraction of particles passing through the sieve (ε_{gi}), remaining on the surface (ε_{gu}), and removed from it (ε_{gd}). The obtained second-order regression equations showed high adequacy according to Student's and Fisher's criteria, confirming the reliability of the numerical model.

It was established that increasing the brush velocity and decreasing its inclination angle enhance the cleaning process, while larger relative particle size increases the likelihood of particles remaining on the sieve. A nonlinear interaction between factors was revealed, indicating the existence of optimal combinations of geometric and kinematic parameters that maximize cleaning efficiency without damaging the bristles or the sieve surface.

numerical simulation, DEM, brush, sieve, material particles, cleaning efficiency

Одержано (Received) 11.10.2025

Прорецензовано (Reviewed) 20.10.2025

Прийнято до друку (Approved) 28.10.2025