

**Алієв Е. Б.**

д.т.н., старший дослідник,
професор

Литвинов І.В.

здобувач освітнього ступеня
доктора філософії

**Дніпровський державний
аграрно-економічний
університет**

Aliiev E.

Doctor of Technical Sciences,
senior researcher, professor

Lytvynov I.

recipient of the PhD degree

**Dnipro State Agrarian and
Economic University**

УДК 631.362:66.067:519.876.5**DOI: 10.37128/2306-8744-2026-1-14****РЕЗУЛЬТАТИ СИМУЛЯЦІЇ
СЕПАРАТОРА ПОДРІБНЕНОЇ
МАКУХИ НІШЕВИХ ОЛІЙНИХ
КУЛЬТУР**

Процеси сепарації сипких матеріалів є невід'ємною складовою технологічних ліній переробки олійних культур, зокрема на стадії обробки подрібненої макухи. Для нішевих олійних культур характерні значна варіативність фізико-механічних властивостей, неоднорідний гранулометричний склад та схильність матеріалу до злипання, що ускладнює процес просіювання та призводить до інтенсивного засмічення отворів сита. Це зумовлює зниження пропускної здатності сепараторів, втрати дрібної фракції та погіршення енергоефективності обладнання. У роботі запропоновано чисельне дослідження процесу щіткової сепарації подрібненої макухи нішевих олійних культур із застосуванням методу дискретних елементів (DEM) у програмному пакеті Simcenter Star-CCM+.

Побудовано тривимірну модель щіткового сепаратора з циліндричним ситом та враховано контактну взаємодію між частинками матеріалу, гнучкими волокнами щіток і конструктивними елементами сита. Досліджено вплив основних конструктивних і режимних параметрів, зокрема діаметра циліндричного сита, частоти обертання щіток, кута їх розташування та маси матеріалу, на ступінь просіювання та коефіцієнт засміченості просію. Аналіз візуальних і кількісних результатів симуляції показав, що щітка одночасно виконує транспортну, інтенсифікуючу та очисну функції, забезпечуючи активне перемішування матеріалу, інтенсифікацію проходження дрібної фракції та запобігання закупорюванню отворів сита.

Встановлено, що кінетика просіювання дрібної фракції має експоненційний характер, тоді як засміченість просію формується лінійно в часі. На основі статистичної обробки результатів отримано регресійні моделі другого порядку, які адекватно описують нелінійний вплив параметрів на показники ефективності процесу. Визначено раціональне поєднання параметрів, за якого забезпечується ступінь просіювання не менше 95 % при мінімальній засміченості просію. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування конструктивних рішень і оптимальних режимів роботи щіткових сепараторів у промислових умовах.

Ключові слова: сепарація сипких матеріалів, подрібнена макуха, нішеві олійні культури, щітковий сепаратор, чисельне моделювання, метод дискретних елементів (DEM), ступінь просіювання, засміченість просію, оптимізація параметрів.

РЕЗУЛЬТАТИ СИМУЛЯЦІЇ СЕПАРАТОРА
ПОДРІБНЕНОЇ МАКУХИ НІШЕВИХ
ОЛІЙНИХ КУЛЬТУР © 2026 by Алієв Е.Б.,
Литвинов І.В. is licensed under CC BY 4.0



Вступ. Процеси сепарації сипких матеріалів займають важливе місце в технологічних лініях переробки олійних культур, зокрема на стадії обробки подрібненої макухи [1–2]. Від ефективності розділення фракцій за розмірами значною мірою залежать якість готової продукції, стабільність роботи обладнання та енергоефективність усього виробничого процесу. Особливої актуальності ця проблема набуває для нішевих олійних культур, які характеризуються підвищеною різноманітністю фізико-механічних властивостей макухи, нерівномірністю гранулометричного складу та схильністю матеріалу до злипання й закупорювання отворів сит [3].

У практиці експлуатації щіткових сепараторів однією з основних проблем залишається зниження пропускної здатності та ефективності просіювання внаслідок засмічення отворів сита частинками граничних і великих розмірів. Це призводить до втрат дрібної фракції, нерівномірності розділення та необхідності частих зупинок обладнання для очищення, що негативно впливає на продуктивність і економічні показники переробки [4]. Традиційні експериментальні методи дослідження таких процесів є трудомісткими, дорогими та не завжди дозволяють детально простежити мікромеханізми взаємодії частинок матеріалу з робочими органами сепаратора.

У зв'язку з цим зростає актуальність застосування методів чисельного моделювання, зокрема методу дискретних елементів (DEM), які дають змогу досліджувати процеси руху, контакту і взаємодії окремих частинок у складних механічних системах. Використання сучасних програмних пакетів, таких як Simcenter Star-CCM+ [5], дозволяє відтворювати реальні умови роботи щіткових сепараторів, аналізувати вплив конструктивних і режимних параметрів на показники ефективності сепарації та виявляти оптимальні режими роботи без проведення масштабних експериментів. Таким чином, дослідження процесу сепарації подрібненої макухи нішевих олійних культур із застосуванням чисельного моделювання є актуальним науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення ефективності та надійності роботи сепараційного обладнання.

Аналіз останніх досліджень.

Сепарація сипких матеріалів на ситах є ключовою стадією у багатьох галузях промисловості, включно з харчовою, агропромисловою та комбікормовою. Основним механізмом такого поділу є пропускання частинок через отвори сита під впливом гравітації, механічних коливань чи

інших зовнішніх збурень. Теоретичні роботи підкреслюють, що процес просіювання ґрунтується на фізичних відмінностях частинок, зокрема їхніх розмірах, формах та здатності пересуватися у відповідних полях руху, що детально описано в літературі з розділення сипких матеріалів загалом [6–9].

У класичних теоретичних дослідженнях просіювання акцент робиться на побудові моделей, що описують траєкторії руху частинок та статистичні характеристики проходження через сито. Наприклад, математичне моделювання просіювання сипких сумішей демонструє, як параметри ситового полотна й взаємодія частинок впливають на розподіл матеріалу й ефективність розділення. В інших роботах розглядаються процеси розділення та сегрегації сипких матеріалів, де враховується не лише розмір частинок, але й взаємодія між ними, що суттєво впливає на ймовірність проходження частинок через отвори сита й формується через механізми адвенції, дифузії та сегрегації. Ці математичні підходи створюють базові уявлення про механіку процесу, яке можна адаптувати і до розрахунків ефективності сит, оснащених щітками [10–13].

У широкій сфері досліджень просіювання проводилися експериментальні випробування, що показують залежність ефективності розділення від геометричних параметрів сита та режимів руху. Такі експерименти демонструють, що без систем самоочищення отвори сит мають тенденцію до забивання, особливо при роботі з волокнистими або липкими матеріалами [14–16].

З огляду на практичні обмеження традиційних просіювачів (вібраційних, барабанних чи плоских сіткосів), що стосуються забивання отворів та зниження ефективності при заолієних чи волокнистих сипких матеріалах, окремі дослідження звертають увагу на конструкції з вбудованими механізмами очищення. Теоретичні описові джерела з описом методів розділення виділяють так званий *brushing method* – механічне просіювання з використанням щіток, які активовано рухаються по поверхні сита для запобігання засміченню й покращення проникнення дрібних частинок крізь отвори. Такий підхід визнається ефективним для матеріалів, що мають тенденцію до налипання, наприклад, заолієних сумішей, оскільки щітки постійно видаляють частки, що можуть блокувати отвори й утворювати грудки [16–20].

Загалом, модерні теоретичні моделі закладають основи для розуміння механіки руху й розділення сипких матеріалів, а експериментальні дослідження підтверджують критичні фактори, що визначають



продуктивність та якість сепарації. Водночас чисельні моделі, особливо ті, що включають вплив робочих органів типу щіток, відкривають нові можливості для оптимізації конструкцій просіювачів з урахуванням реальних фізичних взаємодій. Таким чином, поєднання трьох підходів – теоретичного, експериментального та чисельного – є потужним інструментом для розробки ефективних просіювальних машин, здатних вирішувати складні технологічні задачі сепарації, включно з обробкою заолієних і волокнистих сипких матеріалів [21].

Мета та завдання дослідження

Метою роботи є дослідження та кількісна оцінка закономірностей процесу щіткової сепарації подрібненої макухи нішевих олійних культур шляхом чисельного моделювання в програмному пакеті Simcenter Star-CCM+ з використанням методу дискретних елементів, а також встановлення впливу конструктивних і режимних параметрів сепаратора на ступінь просіювання та коефіцієнт засміченості просіву з метою обґрунтування раціональних параметрів і режимів його роботи.

Виклад основного матеріалу.

Моделювання процесу роботи сепаратора подрібненої макухи у програмному пакеті Simcenter Star-CCM+ виконано відповідно до розрахункової схеми, наведеної на рис. 1. Для чисельної симуляції процесу очищення сита щітковим механізмом використано сукупність фізичних моделей, що дозволяють коректно відобразити механічну взаємодію гнучких волокон щітки, частинок сипкого матеріалу та конструктивних елементів сита. Базується розрахунок на застосуванні безсіткової DEM-методології, лагранжевого підходу до опису багатофазної системи, моделі дискретних елементів, нестационарної імпліцитної схеми, урахуванні дії гравітаційних сил, а також використанні опції інтерполяція рішень з метою підвищення ефективності чисельного розв'язання. Прийняті наступні фізико-механічні властивості фаз, використаних у чисельному моделюванні, та параметри їхньої взаємодії. Волокно щітки з капролону моделювалося як сегментована гнучка структура з довжиною 0,05 м і діаметром 0,001 м за щільності матеріалу 1140 кг/м^3 , модуля Юнга 3000 МПа, коефіцієнта Пуассона 0,35, коефіцієнтів статичного тертя 0,25, кочення 0,1 і відскоку 0,1, а жорсткість пружного елемента становила 106 Н/м. Частинка матеріалу задавалася у вигляді кластера з трьох сфер із заданими відносними координатами та радіусами, щільністю 600 кг/м^3 , модулем Юнга 15 МПа, коефіцієнтом Пуассона 0,2, коефіцієнтом статичного тертя 0,53 і коефіцієнтом відскоку 0,1. Стінки розрахункової області зі сталі характеризувалися щільністю

7800 кг/м^3 , модулем зсуву $7,9 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ та коефіцієнтом Пуассона 0,3, тоді як конструкційні елементи сита з капролону мали щільність 1140 кг/м^3 , модуль зсуву 3000 Па і коефіцієнт Пуассона 0,35. Для контактної взаємодії волокна й частинок зі сталевими та капролоновими стінками враховано відповідні коефіцієнти статичного тертя, тертя кочення та відновлення після зіткнення, що забезпечує коректний опис динаміки контактів у процесі моделювання.

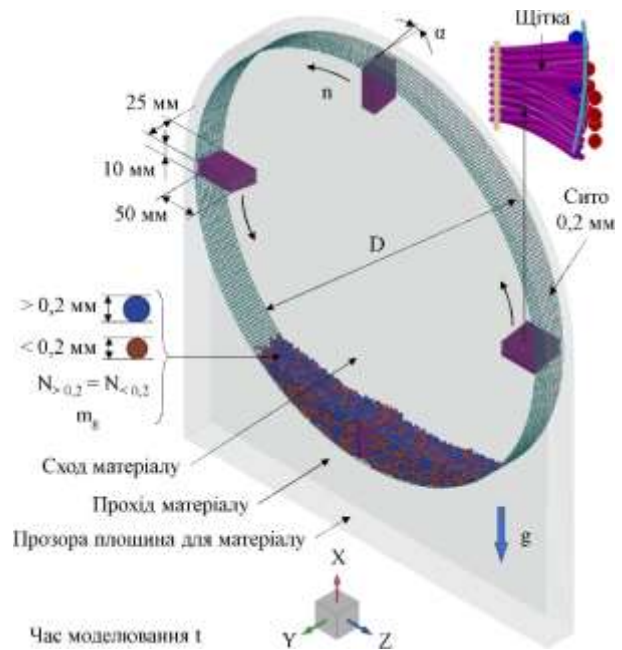


Рис. 1. Розрахункова схема чисельного моделювання сепаратора подрібненої макухи нішевих олійних культур

Згідно з прийнятою схемою, у декартовій системі координат XYZ робоча область сепаратора представлена у вигляді циліндричного сита діаметром D з квадратними отворами розміром $0,2 \times 0,2 \text{ мм}$. Для зменшення обчислювальної складності та оптимізації часу розрахунку висота циліндричного сита прийнята рівною 25 мм, що відповідає сегменту робочої зони сепаратора і є репрезентативним для аналізу характеру руху матеріалу в цілому.

У середині циліндричного сита розміщено чотири щітки розмірами $50 \times 25 \times 10 \text{ мм}$, які встановлені під кутом α до твірної сита. Кількість волокон уздовж напрямку руху у кожній щітці прийнята $N_{bx} = 8$. Щітки здійснюють обертальний рух навколо осі циліндричного сита (вісь OY) з частотою обертання n , що дозволяє інтенсифікувати процес перемішування та розділення матеріалу.



Сипкий матеріал у моделі представлено у вигляді двокомпонентної суміші, що складається з однакової кількості частинок N кожного компонента, із загальною масою m_g . Діаметр частинок першого компонента перевищував 0,2 мм, тоді як діаметр частинок другого компонента був меншим за 0,2 мм, що відповідає умовам фракційного розділення за розміром отворів сита.

Моделювання проводилося в полі сили тяжіння, при цьому вектор прискорення вільного падіння був спрямований уздовж осі ОХ. У процесі розрахунків фіксувався загальний час моделювання t , що дозволяло аналізувати динаміку руху частинок і ефективність процесу сепарації в часі.

Область, розташовану всередині циліндричного сита, надалі прийнято називати областю сходу, тоді як область за межами циліндричного сита – областю проходу. Нижню площину загальної розрахункової області сепаратора задано як прозору для матеріалу, що забезпечує вільний вихід частинок з моделі та коректне відтворення умов реального технологічного процесу. В якості факторів моделювання обрано: діаметр циліндричного сита D , частота обертання щіток n , кут розташування щітки α , загальна маса матеріалу m_g . Рівні варіювання факторів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

**Рівні варіювання факторів чисельного моделювання сепаратора подрібненої макухи
нішевих олійних культур**

Рівень	Діаметр циліндричного сита D , м	Частота обертання щіток n , об/хв	Кут розташування щітки α , °	Загальна маса матеріалу m_g , кг
Кодування	x_5	x_6	x_7	x_8
Нижній (-1)	0,2	40	0	0,06
Нижній (0)	0,4	80	10	0,15
Верхній (+1)	0,6	120	20	0,24
Інтервал	0,2	40	10	0,09

В якості критеріїв дослідження було обрано – ступінь просіювання k (%):

$$k = 100 \frac{m_{s \rightarrow p}}{m_{s \rightarrow g}}, \quad (1)$$

де $m_{s \rightarrow p}$ – маса дрібної фракції в області проходу, кг; $m_{s \rightarrow g}$ – маса дрібної фракції у вхідному матеріалі, кг;

– коефіцієнт засміченості просіву η (%):

$$\eta = 100 \frac{m_{l \rightarrow p}}{m_{l \rightarrow p} + m_{s \rightarrow p}}, \quad (2)$$

де $m_{l \rightarrow p}$ – маса великої фракції в області проходу, кг.

Слід також враховувати необхідність у високій Візуальні результати чисельної симуляції взаємодії щіток сепаратора з компонентами подрібненої макухи наведені на рис. 2. З отриманих результатів наочно видно, що щітка захоплює шар матеріалу, який контактує з внутрішньою поверхнею циліндричного сита, та переміщує його

вздовж колової траєкторії відповідно до напрямку руху щітки.

У процесі взаємодії волокон щітки з частинками відбувається їх інтенсивне перемішування і локальний перерозподіл контактних сил. Дрібна фракція легко проходить крізь волокна щітки та під дією нормальної складової контактної сили і гравітації продавлюється крізь отвори сита, потрапляючи в зону проходу. Водночас незначна частина великої фракції, розміри якої близькі до діаметра отворів сита, за певних умов також може бути продавлена через сито, що зумовлює часткове засмічення зони проходу.

У зоні проходження безпосередньо під щіткою формується характерний шлейф матеріалу, який обумовлений імпульсною дією волокон на частинки та їх інерційним рухом після виходу з-під щітки. Цей ефект свідчить про локальну концентрацію потоку дрібної фракції саме в зоні активної дії щітки

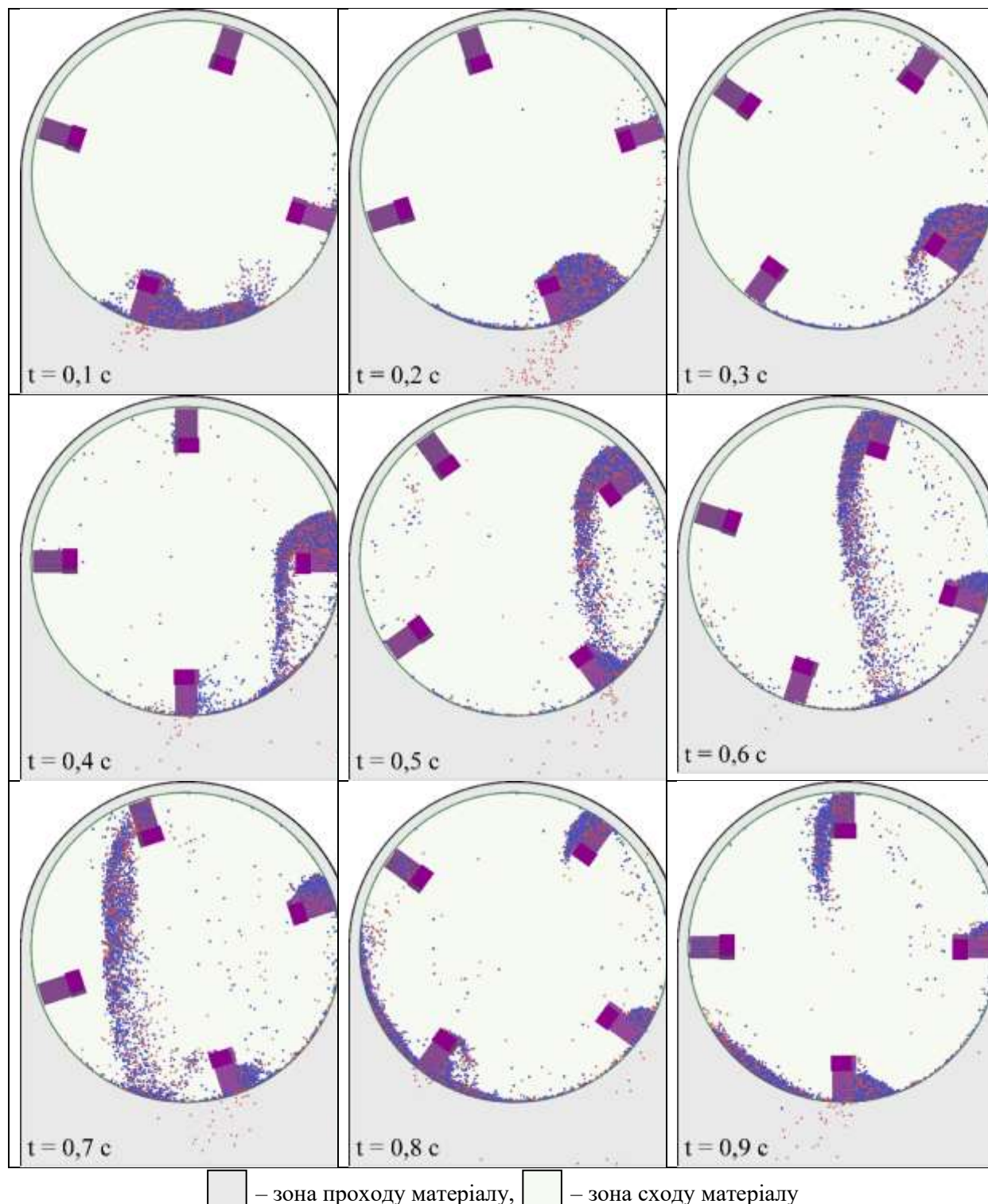


Рис. 2. Візуальні результати симуляції взаємодії щіток сепаратора із компонентами подрібненої макухи ($D = 0,4$ м, $n = 60$ об/хв, $\alpha = 10^\circ$, $m_g = 0,06$ кг)

Одночасно в зоні сходу матеріалу, що розташована всередині циліндричного сита, спостерігається інтенсивне перемішування частинок. Такий режим руху сприяє перерозподілу дрібної фракції в загальному потоці та підвищує ймовірність її повторного контакту з робочою

поверхнею сита, що позитивно впливає на загальну ефективність сепарації.

Крім транспортної функції, щітка виконує важливу очисну функцію: волокна періодично входять у контакти з частинками великої фракції, застряглими в отворах сита, і під дією пружних деформацій та зсувних сил виштовхують їх із



отворів. Це запобігає їх закупорюванню, стабілізує пропускну здатність сита та зменшує втрати дрібної фракції.

Таким чином, фізична суть процесу полягає у комбінованій дії притискання, зсуву та інерційної взаємодії, що забезпечує одночасне транспортування матеріалу, інтенсифікацію проходження дрібної фракції та очищення отворів сита від частинок великої фракції.

Кінетика процесу сепарації наведена на рис. 3. Із наведених залежностей видно зміну ступеня просіювання k (у %) та коефіцієнта засміченості просіву η (у %) у часі t (с):

$$k = 1 - \exp(-\lambda_k t), \quad (3)$$

$$\eta = \lambda_\eta t, \quad (4)$$

де λ_k, λ_η – емпіричні коефіцієнти (для рис. 3: $\lambda_k = -0,203 \text{ c}^{-1}$, $\lambda_\eta = 11,676 \text{ \%/c}$). При $k = 95\%$ час просіювання складає приблизно 12,9 с.

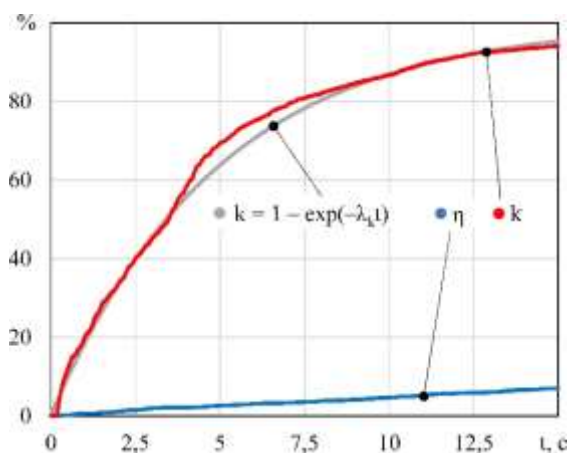


Рис. 3. Кінетика процесу сепарація подрібненої макухи ($D = 0,4 \text{ м}$, $n = 60 \text{ об/хв}$, $\alpha = 10^\circ$, $m_g = 0,06 \text{ кг}$)

Аналіз кривих показує, що ступінь просіювання k з достатньою точністю описується експоненційною залежністю, що свідчить про наявність інтенсивної початкової стадії процесу. На початку сепарації спостерігається швидке зростання k , обумовлене високою концентрацією дрібної фракції в шарі матеріалу та значною

ймовірністю її контакту з отворами сита. У подальшому темп зростання ступеня просіювання поступово зменшується і процес переходить у квазістаціонарний режим, що пояснюється вичерпанням запасу дрібної фракції та зниженням частоти її ефективних контактів з ситом.

На відміну від цього, коефіцієнт засміченості просіву η змінюється за лінійним законом на зазначеному діапазоні часу, що вказує на відносно рівномірне надходження частинок крупної фракції до зони проходження протягом усього часу процесу. Така поведінка пов'язана з імовірнісним характером продавлювання граничних за розміром частинок крізь отвори сита під дією волокон щітки та інерційних сил, а також із поступовим накопиченням цих частинок у просіві.

З фізичної точки зору, відмінність характеру залежностей $k(t)$ і $\eta(t)$ зумовлена різною природою відповідних процесів. Просіювання дрібної фракції є кінетично обмеженим процесом, швидкість якого пропорційна поточній кількості доступних до проходження частинок, що й обумовлює експоненційний характер залежності. Натомість засмічення просіву формується як акумулятивний процес, пов'язаний із поступовим перенесенням окремих частинок крупної фракції у зону проходження, що зумовлює лінійну залежність $\eta(t)$.

Отримані результати підтверджують адекватність побудованої моделі та дозволяють використовувати параметри кінетичних залежностей для оцінювання ефективності процесу сепарації і вибору раціональної тривалості його перебігу.

На основі результатів чисельного моделювання та подальшої статистичної обробки даних в Wolfram Cloud отримано рівняння регресії другого порядку для:

– ступінь просіювання (рис. 4) (%):

$$k = 73,4056 + 8,81481 D - 124,938 m_g + 0,400671 n - 0,00184491 n^2 + 1,23519 \alpha - 0,00365972 n \alpha - 0,0440185 \alpha^2; \quad (5)$$

– коефіцієнт засміченості просіву (рис. 5) (%):

$$\eta = 10,0426 - 0,981481 D + 3,33333 D^2 + 20,3086 m_g - 0,128519 n + 0,000635417 n^2 - 0,305 \alpha + 0,000541667 n \alpha + 0,0112778 \alpha^2. \quad (6)$$

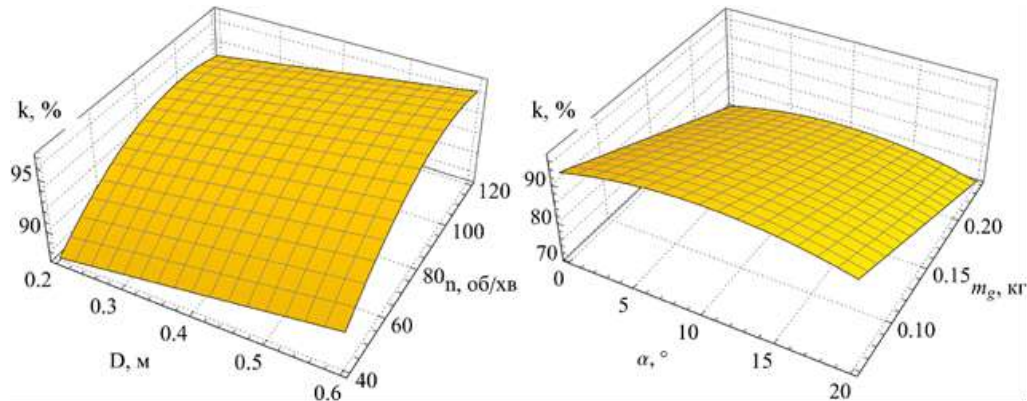


Рис. 4. Залежність ступеня просіювання k від діаметра циліндричного сита D , частоти обертання щіток n , кута розташування щітки α , загальної маси матеріалу m_g

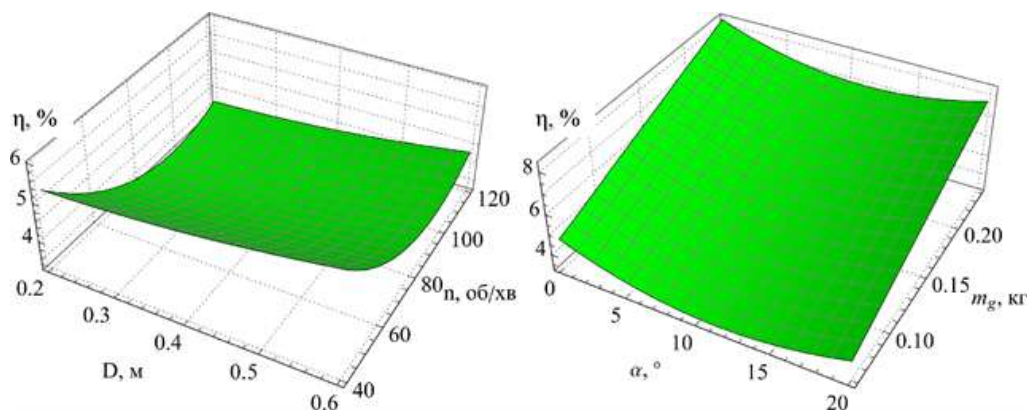


Рис. 5. Залежність коефіцієнта засміченості просіву η від діаметра циліндричного сита D , частоти обертання щіток n , кута розташування щітки α , загальної маси матеріалу m_g

Отримані регресійні залежності (5) і (6) відображають узагальнений вплив конструктивних і режимних параметрів на перебіг процесу щіткової сепарації та дозволяють простежити фізичні механізми формування ступеня просіювання і засміченості просіву. Величина ступеня просіювання k визначається інтенсивністю контактної взаємодії частинок із робочою поверхнею сита та щітками, тоді як коефіцієнт засміченості η характеризує імовірність потрапляння частинок граничних і великих розмірів у зону проходження.

Діаметр циліндричного сита D має суттєвий додатний вплив на ступінь просіювання, що фізично пояснюється збільшенням активної площі контакту матеріалу з ситом і зменшенням кривизни поверхні. За більших значень D шар матеріалу розподіляється рівномірніше, а частинки дрібної фракції частіше контактують з отворами, що підвищує ймовірність їх проходження. Водночас у рівнянні для коефіцієнта засміченості лінійний від'ємний і квадратичний додатний члени при D свідчать про наявність оптимального діаметра: при малих D зростає інтенсивність примусового продавлювання крупних частинок, а при надмірному збільшенні діаметра погіршується ефект самоочищення отворів.

Частота обертання щіток n впливає на процес двояко. Лінійний додатний коефіцієнт у рівнянні вказує на зростання ступеня просіювання зі збільшенням швидкості руху волокон, що пов'язано з підвищенням кінетичної енергії щітки та інтенсивності зсувних і ударних взаємодій. Проте від'ємний квадратичний член свідчить про існування оптимальної частоти обертання, перевищення якої призводить до нестабільного контакту, відскоків частинок і зменшення часу їх ефективної взаємодії з отворами сита. Аналогічна нелінійність проявляється і для коефіцієнта засміченості η : при помірних значеннях n засміченість зменшується, однак за високих частот через інерційне продавлювання зростає ймовірність потрапляння частинок крупної фракції в просів.

Кут розташування щітки α відіграє роль регулятора співвідношення нормальної та тангенціальної складових сили, що діє на частинки. Додатний лінійний і від'ємний квадратичний члени у рівнянні для k означають, що помірно збільшення кута покращує умови зсуву та «зскрібання» матеріалу з поверхні сита, тоді як надмірний кут призводить до зменшення ефективного притискання і погіршення просіювання. Для коефіцієнта засміченості η від'ємний лінійний член при α свідчить про зменшення засміченості за рахунок



ефективнішого виштовхування застряглих частинок з отворів, однак додатний квадратичний член знову вказує на наявність оптимального діапазону значень кута.

Загальна маса матеріалу m_g істотно впливає на обидва критерії, що відображає роль товщини шару і внутрішньшарових контактів. Від'ємний коефіцієнт при m_g у рівнянні для ступеня просіювання означає, що зі збільшенням маси матеріалу зростає взаємне екранування частинок і зменшується доступ дрібної фракції до отворів сита. Водночас додатний коефіцієнт у рівнянні для η свідчить про підвищення засміченості просіву за рахунок зростання контактних сил у шарі та більшої ймовірності продавлювання граничних частинок.

Наявність перехресних членів na у обох рівняннях підкреслює взаємозалежність кінематичних і геометричних параметрів: ефект від зміни частоти обертання щіток істотно залежить від кута їх розташування, що визначає напрямок прикладення зусиль до частинок і характер їх руху відносно отворів сита.

Узагальнюючи результати, можна стверджувати, що процес сепарації має виражений оптимізаційний характер, у якому максимальний ступінь просіювання та мінімальна засміченість досягаються за збалансованого поєднання геометрії сита, кінематики щіток і навантаження матеріалом. За умови мінімізації коефіцієнта засміченості при ступені просіювання не менше 95% оптимальне поєднання параметрів $D = 0,36$ м, $n = 97$ об/хв, $\alpha = 10,7^\circ$, $m_g = 0,06$ кг забезпечує найбільш ефективний режим роботи сепаратора ($\eta = 4,44\%$ і $k = 95\%$), що підтверджує адекватність побудованої моделі та її фізичну обґрунтованість.

Висновки. Проведене чисельне моделювання та статистичний аналіз процесу щіткової сепарації подрібненої макухи дозволили всебічно розкрити механізми взаємодії матеріалу з робочими органами сепаратора та встановити закономірності формування показників ефективності процесу. Візуальні результати симуляції підтвердили, що щітка одночасно виконує транспортну, інтенсифікуючу та очисну функції, забезпечуючи переміщення матеріалу вздовж поверхні циліндричного сита, інтенсифікацію проходження дрібної фракції та періодичне очищення отворів від частинок крупної фракції. Аналіз кінетики процесу показав, що просіювання дрібної фракції має експоненційний характер і визначається інтенсивною початковою стадією, тоді як засміченість просіву формується поступово і описується лінійною залежністю від часу. Це свідчить про принципову відмінність фізичної природи

відповідних процесів: просіювання є кінетично обмеженим, а засмічення – акумулятивним явищем.

В результаті чисельного моделювання отримані регресійні моделі другого порядку адекватно описують вплив конструктивних і режимних параметрів на ступінь просіювання k та коефіцієнт засміченості просіву η . Встановлено, що діаметр циліндричного сита D , частота обертання щіток n , кут їх розташування α та маса матеріалу m_g мають виражений нелінійний вплив і формують оптимізаційний характер процесу. З фізичної точки зору це зумовлено балансом між інтенсивністю контактної взаємодії, інерційними ефектами, умовами самоочищення отворів та екрануванням частинок у шарі матеріалу. У результаті оптимізації параметрів за умов мінімізації коефіцієнта засміченості при ступені просіювання не менше 95 % визначено раціональний режим роботи сепаратора: $D = 0,36$ м, $n = 97$ об/хв, $\alpha = 10,7^\circ$, $m_g = 0,06$ кг, який забезпечує високу ефективність процесу ($\eta = 4,44\%$ і $k = 95\%$). Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування конструктивних параметрів і режимів роботи щіткових сепараторів у промислових умовах.

Список використаних джерел

1. Алієв Е. Б. Обґрунтування складу техніко-технологічного забезпечення процесів переробки нішевих олійних культур. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*, 2025, 39, 199–215. <https://doi.org/10.36710/IOC-2025-39-17>
2. Çakaloğlu B., Özyurt V. H., Ötleş S. Cold press in oil extraction: A review. *Ukrainian Food Journal*, 2018, 7(4), 640–654. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2018-7-4-9>
3. Ionescu M., Voicu G. H., Biriş S. Ş. T., Vlăduţ V., Ungureanu N., Ştefan E. M., Dincă M., Matache M. Oil extraction using a vertical press with piston. In *Symposium "Actual Tasks on Agricultural Engineering"*, Opatija, Croatia, 2016, 249–258.
4. Теслюк Ю. В., Теслюк Г. В., Пушка О. С., Сова Н. А. Економічний потенціал переробки малопоширених (нішевих) олійних культур в агросекторі України. *Ефективна економіка*, 2025, 10. <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2025.10.46>
5. Алієв Е. Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: Аграрна наука, 2023, 340 с. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9>
6. Jesny S., Prasobh G. R. A review on size separation. *International Journal of Pharmaceutical Research and Applications*, 2022, 7(2), 286–296. <https://doi.org/10.35629/7781-0702286296>
7. Piven M., Volokh V., Piven A.,



Kharchenko S. Research into the process of loading the surface of a vibrosieve when a loose mixture is fed unevenly. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, 6(1(96)), 62–70. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.149739>

8. Nanka A., Kharchenko S., Sementsov V. I., Sementsov V. V., Abduev M. Intensification of the process of dosing bulk concentrated feeds by sieve hopper. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, 2(1(98)), 14–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.161410>

9. Kharchenko S., Samborski S., Kharchenko F., Kotliarevskiy I. Determination of hole blocking conditions for perforated sifting surfaces. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2024, 18(5), 342–360. <https://doi.org/10.12913/22998624/190483>

10. Zhu L., Chen S., Zhao Z., Ding H., Zhu Y. Influence of sieve surface attitude on sieving performance of granular materials with non-uniform feeding conditions. *Agriculture*, 2022, 12(12), 2023. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122023>

11. Xie S., Zhang Y., Li J., Liu F. Analysis of breaking and separating characteristics of potato–soil aggregates based on the new type of swing separation sieve. *Agronomy*, 2024, 14(6), 1272. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061272>

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

13. Yuan J., Li H., Qi X., Hu T., Bai M., Wang Y. Optimization of airflow cylinder sieve for threshed rice separation using CFD-DEM. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2020, 14(1), 871–881. <https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1778540>

14. Сало В. М., Мороз С. М., Васильковський О. М., Петренко, Д. І. Розробка нової конструкції пневморешітної зерноочисної машини. Том 1. Обґрунтування параметрів транспортера сепаратора. Кіровоград: Видавець Лисенко В. Ф., 2014, 108 с.

15. Бажан І. М., Васильковський О. М., Лещенко С. М., Амосов В. В. Інтенсифікація процесу сепарації зерна на плоскому коливальному решеті із зигзаговидним розташуванням отворів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, 2024, 54, 192–202. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.192-202>

16. Задорожній О., Мороз С. М., Васильковський О. М. Аналіз конструкцій очисних пристроїв гравітаційних решіт з коливальним рухом решітного стану зерноочисних машин загального призначення. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, 2023, 53, 237–246. [https://doi.org/10.32515/2414-](https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.237-246)

[3820.2023.53.237-246](https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.237-246)

17. 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, 50, 52–58. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.52-58>

18. Uhlmann E., Hoyer A. Modeling of contact forces for brushing tools. *Ceramics*, 2021, 4(3), 397–407. <https://doi.org/10.3390/ceramics4030029>

19. Kwon J. W., Ahn J. Prediction of leakage flow rate and blow-down in brush seals via 2D CFD simulation with porosity correction. *Applied Sciences*, 2024, 14(19), 8821. <https://doi.org/10.3390/app14198821>

20. Hoyer A., Uhlmann E. Image-based tool characterization and DEM simulation of abrasive brushing processes. *Machines*, 2024, 12(3), 171. <https://doi.org/10.3390/machines12030171>

21. 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*, 2018, 54(1), 95–104.

References

1. Aliyev E. B. (2025). Obgruntuvannya skladu tekhniko-tekhnologichnoho zabezpechennya protsesiv pererobky nishevyykh oliynykh kul'tur. [Substantiation of the composition of technical and technological support for the processes of processing niche oilseeds]. *Scientific and Technical Bulletin of the Institute of Oilseeds of the NAAS*, 39, 199–215. DOI: <https://doi.org/10.36710/IOC-2025-39-17> [in Ukrainian].
2. Çakaloğlu B., Özyurt V. H., Ötleş S. (2018). Cold press in oil extraction: A review. *Ukrainian Food Journal*, 7(4), 640–654. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2018-7-4-9> [in English]
3. Ionescu M., Voicu G. H., Biriş S. Ş. T., Vlăduţ V., Ungureanu N., Ştefan E. M., Dincă M., Matache M. (2016). Oil extraction using a vertical press with piston. In *Symposium "Actual Tasks on Agricultural Engineering", Opatija, Croatia*, 249–258. [in English]
4. Teslyuk Yu. V., Teslyuk G. V., Pushka O. S., Sova N. A. (2025). Ekonomichnyy potentsial pererobky maloposhyrenyykh (nishevyykh) oliynykh kul'tur v ahrosektori Ukrayiny [Economic potential of processing of rare (niche) oilseed crops in the agricultural sector of Ukraine] *Effective Economy*, 10. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2025.10.46> [in Ukrainian].



5. Aliiev E. B. (2023). Chysel'ne modelyuvannya protsesiv ahropromyslovoho vyrobnytstva: pidruchnyk [Numerical modeling of agroindustrial production processes: textbook]. Kyiv: Ahrarna nauka, 340 s. DOI: <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9>. [in Ukrainian].
6. Jesny S., Prasobh G. R. (2022). A review on size separation. *International Journal of Pharmaceutical Research and Applications*, 7(2), 286–296. <https://doi.org/10.35629/7781-0702286296> [in English]
7. Piven M., Volokh V., Piven A., Kharchenko S. (2018). Research into the process of loading the surface of a vibrosieve when a loose mixture is fed unevenly. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(1(96)), 62–70. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.149739> [in English]
8. Nanka A., Kharchenko S., Sementsov V. I., Sementsov V. V., Abduev M. (2019). Intensification of the process of dosing bulk concentrated feeds by sieve hopper. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(1(98)), 14–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.161410> [in English]
9. Kharchenko S., Samborski S., Kharchenko F., Kotliarevskiy I. (2024). Determination of hole blocking conditions for perforated sifting surfaces. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 18(5), 342–360. <https://doi.org/10.12913/22998624/190483> [in English]
10. Zhu L., Chen S., Zhao Z., Ding H., Zhu Y. (2022). Influence of sieve surface attitude on sieving performance of granular materials with non-uniform feeding conditions. *Agriculture*, 12(12), 2023. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122023> [in English]
11. Xie S., Zhang Y., Li J., Liu F. (2024). Analysis of breaking and separating characteristics of potato–soil aggregates based on the new type of swing separation sieve. *Agronomy*, 14(6), 1272. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061272> [in English]
12. Shevchenko I., Aliiev E. (2018). Study of the process of calibration of confectionery sunflower seeds. *Food Science and Technology*, 12(4), 135–142 [in English]
13. Yuan J., Li H., Qi X., Hu T., Bai M., Wang Y. (2020). Optimization of airflow cylinder sieve for threshed rice separation using CFD-DEM. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14(1), 871–881. <https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1778540> [in English]
14. Salo V. M., Moroz S. M., Vasytkovsky O. M., Petrenko, D. I. (2014). Rozrobka novoyi konstruktsiyi pnemoreshitnoyi zernoochysnoyi mashyny. Tom 1. Obgruntuvannya parametriv transporterera separatora [Development of a new design of a pneumatic grain cleaning machine. Volume 1. Justification of the parameters of the separator conveyor]. Kirovograd: Publisher Lysenko V. F., 108 p. [in Ukrainian].
15. Bazhan I. M., Vasytkovskyi O. M., Leshchenko S. M., Amosov V. V. (2024). Intensyfikatsiya protsesu separatsiyi zerna na ploskomu kolyval'nomu resheti iz zyzahovydnym roztashuvannyam otvoriv [Intensification of the grain separation process on a flat vibrating sieve with a zigzag arrangement of holes]. *Konstruyuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiya sil's'kohospodars'kykh mashyn*, 54, 192–202. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.192-202> [in Ukrainian].
16. Zadorozhniy O., Moroz S. M., Vasytkovskyy O. M. (2023). Analiz konstruktsiy ochysnykh prystroyiv hraitatsiynykh reshit z kolyval'nym rukhom reshitnoho stanu zernoochysnykh mashyn zahal'noho pryznachennya [Analysis of the structures of cleaning devices of gravity sieves with oscillatory motion of the sieve stand of general-purpose grain cleaning machines]. *Konstruyuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiya sil's'kohospodars'kykh mashyn*, 53, 237–246. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.237-246> [in Ukrainian].
17. Vasytkovskyy O. M., Leshchenko S. M., Moroz S. M., Nesterenko O. V., Molokost, L. A. (2020). Do stvorennya kontseptsiyi «ideal'noho» resheta zernovoho separatora [Towards the creation of the concept of an “ideal” sieve for a grain separator]. *Konstruyuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiya sil's'kohospodars'kykh mashyn*, 50, 52–58. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.52-58> [in Ukrainian].
18. Uhlmann E., Hoyer A. (2021). Modeling of contact forces for brushing tools. *Ceramics*, 4(3), 397–407. <https://doi.org/10.3390/ceramics4030029> [in English]
19. Kwon J. W., Ahn J. (2024). Prediction of leakage flow rate and blow-down in brush seals via 2D CFD simulation with porosity correction. *Applied Sciences*, 14(19), 8821. <https://doi.org/10.3390/app14198821> [in English]
20. Hoyer A., Uhlmann E. (2024). Image-based tool characterization and DEM simulation of abrasive brushing processes. *Machines*, 12(3), 171. <https://doi.org/10.3390/machines12030171> [in English]
21. Aliev E. B., Bandura V. M., Pryshliak V. M., Yaropud V. M., Trukhanska O. O. (2018). Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 54(1), 95–104. [in English]



SIMULATION RESULTS OF A NICHE OILSEED MEAL SEPARATOR

The separation processes of bulk materials are an integral part of technological lines for oilseed processing, particularly at the stage of crushed meal handling. Niche oilseeds are characterized by significant variability in physicochemical properties, heterogeneous particle size distribution, and a tendency of the material to agglomerate, which complicates the sieving process and leads to intensive clogging of sieve openings. This results in reduced throughput of separators, losses of fine fractions, and decreased energy efficiency of the equipment. This study presents a numerical investigation of the brushing separation process of crushed meal from niche oilseeds using the Discrete Element Method (DEM) in the Simcenter Star-CCM+ software package.

A three-dimensional model of a brush separator with a cylindrical sieve was constructed, accounting for the contact interactions between material particles, flexible brush fibers, and the structural elements of the sieve. The influence of key structural and operational parameters, including the diameter of the cylindrical sieve, brush rotation frequency, brush inclination angle, and

material mass, on the sieving efficiency and sieve clogging coefficient was analyzed. The analysis of visual and quantitative simulation results showed that the brush simultaneously performs transport, intensification, and cleaning functions, ensuring active material mixing, enhanced passage of fine fractions, and prevention of sieve opening blockage.

It was determined that the kinetics of fine fraction sieving follow an exponential pattern, whereas sieve clogging develops linearly over time. Based on statistical processing of the results, second-order regression models were obtained that adequately describe the nonlinear influence of parameters on process efficiency indicators. An optimal combination of parameters was identified, ensuring a sieving efficiency of at least 95% with minimal sieve clogging. The obtained results can be used to justify design solutions and optimal operating modes of brush separators under industrial conditions.

Keywords: bulk material separation, crushed meal, niche oilseeds, brush separator, numerical modeling, Discrete Element Method (DEM), sieving efficiency, sieve clogging, parameter optimization.

Відомості про авторів

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

Литвинов Ілля Вікторович – аспірант, технік Дніпровського державного аграрно-економічного університету (м. Дніпро, вул. Сергія Єфремова, 25, e-mail: illalitinov901@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-7961-8086>)

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

Illia Lytvynov – Postgraduate Student, Technician of the Department of Technical Systems Engineering of Dnipro State Agrarian and Economic University (St. S. Efremova, 25, Dnipro, Ukraine, 49000, e-mail: illalitinov901@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-7961-8086>).

Стаття надійшла 04.02.2026

Стаття прийнята 10.02.2026

Опубліковано 17.04.2026