

УДК 631.362.3:633.1

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.209-223>

С. О. Харченко¹, доц., д-р техн. наук, Ф. М. Харченко¹, канд. техн. наук,
А. М. Стельмах¹, О. В. Панкова², доц., канд. с.г. наук, В. В. Котляревський¹,
Є. Г. Лабєцький¹

¹Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

²Харківський автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

e-mail: kharchenko_mtf@ukr.net

Обґрунтування параметрів просіювальної поверхні об'ємної структури: багатофакторне моделювання і виробнича валідація

Технологічна ефективність сепарування сипких матеріалів залежить не лише від геометрії отворів, а й від динаміки багатошарового потоку над просіювальною поверхнею. Метою дослідження було встановлення спільного впливу відносної висоти просторово-профільованих елементів, кількості підшарів зернового матеріалу та коефіцієнта відкритої площі на продуктивність сепарування за повноти поділу не нижче 95%. Наукова новизна полягає у використанні системи взаємопов'язаних нормованих і структурних факторів, що забезпечує фізичну інтерпретованість і масштабованість результатів. Експеримент проведено на зерновій суміші кукурудзи за трифакторним планом Бокса–Бенкіна. Побудовано квадратичну регресійну модель, статистичну достовірність якої підтверджено критеріями Кохрена, Стюдента та Фішера. Установлено раціональні діапазони: відносна висота профільних елементів 0,46–0,51, кількість підшарів 4,5–5,5, коефіцієнт відкритої площі 0,270–0,285. Промислова перевірка на сепараторах Petkus K-527 і БСХ-100 підтвердила підвищення продуктивності на 20–30% та зниження питомої енергоємності. Отримані результати доводять масштабованість принципу узгодження геометрії профільованої поверхні зі структурою зернового шару.

сипкий матеріал, просіювання, просіювальна поверхня, структурна товщина шару, план Бокса–Бенкіна, промислова валідація, енергоємність

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій. Перфоровані просіювальні поверхні є основними робочими органами машин для очищення та фракціонування сипких матеріалів за розмірами їх компонентів [1,2]. Їхня технологічна ефективність традиційно пов'язується з формою і розмірами отворів, частотою та амплітудою коливань, кутом нахилу й питомим завантаженням [3–6]. Проте продуктивність сепарування (технологічна продуктивність сепараторів) фактично формується внаслідок багаторівневої взаємодії компонентів сипкого матеріалу із просіювальною поверхнею (решетом) [3, 7, 8]: переміщення матеріалу вздовж решета, вертикальної перебудови шару, сегрегації компонентів, орієнтації компонентів відносно отворів, проходження компонентів прохідної фракції через отвори, очищення заблокованих отворів.

За умов багатошарового руху геометрично доступна площа отворів не є тотожною їхній технологічно активній площі. Підтвердженням цього є розробка та дослідження просіювальних поверхонь з новими формами отворів, інтенсифікаторами та іншими додатковими елементами [3, 8–10]. В подібних решетах інтенсивність просіювання залежить не тільки від їх «живого» перетину, а й від параметрів отворів або інтенсифікаторів.

Інший важливий момент, коли частина домішкових компонентів, розташовані у верхніх підшарах, повинні спочатку перерозподілитися до нижньої контактної зони з перфорованою просіювальною поверхню. Зі збільшенням подачі це обмеження ще більше посилюється: зростає кількість підшарів, зменшується рухливість компонентів біля просіювальної поверхні та збільшується тривалість їхнього перебування поза зоною контакту з отворами. Це також стримує інтенсивність просіювання сипких матеріалів. Об'ємне профілювання перфорованої поверхні [11, 12] створює додаткові локальні імпульси в потоці сипкого матеріалу. Об'ємні елементи змінюють напрямок і швидкість руху компонентів, руйнують стабільну шарувату структуру та сприяють переходу прохідного компонента до отворів просіювальної поверхні. Водночас, збільшення висоти об'ємних елементів є опором руху матеріалу, що створює певні обмеження. Надмірно високі об'ємні елементи збільшують опір поздовжньому переміщенню та знижують продуктивність.

Отже, технологічна ефективність визначається балансом трьох механізмів [3, 11]: -інтенсивністю перебудови шару, яка залежить від геометрії об'ємних елементів; - потенційною пропускною здатністю, що визначається площею «живого» перетину; - опором багатшарового потоку, пов'язаним зі структурною товщиною сипкого шару.

У більшості досліджень ці механізми аналізуються окремо [13-15]: параметри поверхні задаються в абсолютних одиницях, висота шару сипкого матеріалу - як локальна лінійна величина або масове навантаження. Це ускладнює можливості практичного використання даних для різних сипких матеріалів та сепарувального обладнання, потребує відповідних наукових досліджень. Таким чином, існує обмежена область узгоджених значень відносної висоти профільних елементів, структурної товщини зернового шару та відкритої площі перфорованої поверхні, у межах якої інтенсивність міжшарової перебудови й доступність отворів переважають над опором багатшарового потоку. Збереження цих безрозмірних співвідношень забезпечує масштабоване підвищення продуктивності сепарування за незмінної якості поділу.

Постановка завдання. Метою роботи є встановлення закономірностей впливу комплексних параметрів просіювальних поверхонь об'ємної структури, властивостей сипких матеріалів на технологічну продуктивність сепарування, з визначенням раціональної області їх поєднання та проведенням виробничої перевірки.

Для виконання мети роботи намічені наступні завдання: - формуванні системи факторів, яка одночасно характеризує геометрію профільованої поверхні, її потенційну проникність і дискретну структуру шару; - нормуванні висоти об'ємного елемента відносно характерного розміру прохідного компоненту; - комплексне представлення товщини шару; - встановлення нелінійних і парних ефектів між геометричними та технологічними факторами; - встановлення раціональної області параметрів решета; - промислова валідація визначених співвідношень.

Виклад основного матеріалу.

2.1. Концепція вибору факторів та критеріїв

Повний перелік параметрів, які потенційно впливають на процеси сепарування сипких матеріалів, охоплює [3, 10-12]: кінематичні характеристики, геометрію поверхні, параметри отворів, профіль і розміщення об'ємних елементів, товщину шару та властивості зернового матеріалу.

Для дослідження було застосовано послідовний відбір факторів, який неодноразово довів свою спроможність. Кінематичні параметри було зафіксовано, оскільки їхній вплив попередньо визначено окремими дослідженнями за кількісним критерієм максимального просіювання крізь отвори [11, 16]. Розміри отворів задавалися технологічними вимогами щодо проходження цільового домішкового компонента

(обрано соняшник та кукурудза). Напівкруглий профіль і шахове розташування елементів прийнято за результатами попереднього порівняння технологічної ефективності та конструктивної надійності [17-19].

У результаті попередніх досліджень для оптимізації залишено три фактори, які представляють різні фізичні рівні процесу (Табл.1).

Таблиця 1 – Фактори процесу сепарування сипких матеріалів

Рівень системи	Фактор	Фізичний зміст
Локальний контакт «частинка–профіль»	відносна висота профільного елемента (K_r)	інтенсивність відхилення, переорієнтації та вертикальної міграції частинок
Структура багат шарового потоку	кількість підшарів (N_L)	опір переміщенню прохідного компонента до робочої поверхні
Інтегральна геометрія поверхні	коефіцієнт відкритої площі	потенційна площа проходження частинок крізь перфорацію

Джерело: розроблено автором

Використання подібних комплексних факторів є принципово важливою по причині поєднання мікрогеометричного, мезоструктурного і макрогеометричного рівнів процесу сепарування сипких матеріалів в одній моделі.

Фактичну висоту профільного елемента визначали через характерну товщину прохідного компоненту сипкого матеріалу:

$$h_r = K_r b_g, \quad (1)$$

де h_r – фактична висота профільного елемента, мм; K_r – безрозмірний коефіцієнт відносної висоти; b_g – товщина прохідного компонента сипкого матеріалу, мм.

Для досліджуваної суміші прийнято $b_g=4,3$ мм. Відповідно, прийнявши $K_r = 0,25; 0,5; 0,75$, маємо фактичні висоти об'ємних елементів:

$$h_r = 1,08 \text{ мм}/2,15\text{мм}/3,23 \text{ мм}. \quad (2)$$

Використання коефіцієнта K_r , а не абсолютного значення h_r , є одним із ключових елементів наукової новизни. Воно дає змогу пов'язати геометрію поверхні з гранулометричними характеристиками сипкого матеріалу, що уніфікує можливості використання результатів для різних умов.

Коефіцієнт відкритої площі визначали як [11, 20]:

$$\varepsilon = \frac{\sum S_h}{S_s} = \frac{S_h N_h}{S_s}, \quad (3)$$

де S_h – площа отвору; N_h – кількість отворів на перфорованій просіювальній поверхні; S_s – площа робочої ділянки поверхні.

Для однакових прямокутних отворів маємо:

$$\varepsilon = \frac{N_h T_h L_h}{L \times B}, \quad (4)$$

де T_h, L_h – ширина та довжина отвору, відповідно; L, B – довжина та ширина просіювальної поверхні.

На відміну від використання лише кількості отворів, коефіцієнт ε є інтегральним безрозмірним показником, придатним для порівняння поверхонь різної площі.

Товщину шару сипкого матеріалу представлено через кількість умовних підшарів:

$$N_L = \frac{h}{d_e}, \quad (5)$$

де h – середня товщина шару; d_e – характерний еквівалентний розмір основного компонента.

Таке представлення відображає не лише геометричну висоту, але й кількість контактних рівнів, через які прохідна частинка повинна переміститися до поверхні.

Функцією відгуку була прийнята технологічна продуктивність, згідно з загальновідомими науковими рекомендаціями [3]:

$$Q = \frac{m}{t}, \quad (6)$$

де m – маса обробленого сипкого матеріалу; t – тривалість процесу сепарування.

Однак оптимізацію треба проводити не як безумовну максимізацію Q , а як задачу з обмеженням:

$$\max Q(K_r, N_L, \varepsilon), \text{ за умови } \eta \geq 0,95, \quad (7)$$

де η – повнота виділення прохідного домішкового компонента.

Повноту поділу визначали за співвідношенням [3]:

$$\eta = m_{d,sep}/m_{d,0}, \quad (8)$$

де $m_{d,sep}$ – маса домішкового компонента, виділеного крізь отвори; $m_{d,0}$ – його початкова маса в навісці.

Слід зауважити, що отриманий максимум характеризує гранично допустиму продуктивність за фіксованої якості поділу, а не лише механічну пропускну здатність.

2.2. Експериментальна перевірка

Для дослідження обрано сипкі зернові матеріали кукурудзи (Табл.2).

Таблиця 2 – Властивості сипкого зернового матеріалу

Властивості	Значення
Початковий вміст домішкового компонента	20 %
Вологість	не більше 14 %
Насипна густина	730 кг/м ³

Джерело: розроблено автором

Для експериментів використано експериментальну установку (рис.1) з наступними параметрами (табл.3).

Таблиця 3 – Параметри сепаратора лабораторного

Параметри	Значення
Амплітуда коливань	8 мм
Частота коливань	12,1 Гц
Кут нахилу поверхні	8°
Довжина робочої ділянки	0,77 м
Ширина робочої ділянки	0,25 м
Профіль об'ємних елементів	напівкруглий
Схема розташування	шахова

Джерело: розроблено автором

Просіювальні поверхні для досліджень представлені на рис.2.



Рисунок 1 – Загальний вигляд лабораторного сепаратора

Джерело: розроблено автором

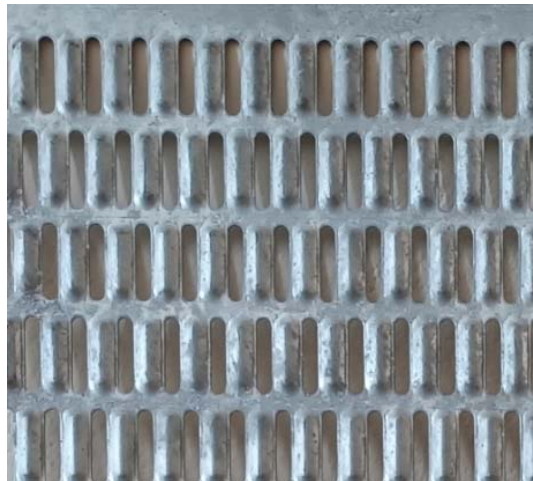


Рисунок 2 – Загальний вигляд перфорованих просіювальних поверхонь об'ємної структури

Джерело: розроблено автором

2.3. План експерименту

Для трьох факторів реалізовано трирівневий план Бокса–Бенкіна, який довів спроможність щодо оптимізації параметрів процесу сепарування сипкого матеріалу [21, 22].

Кодування факторів виконували за виразом [21]:

$$x_i = \frac{(X_i - X_{0i})}{\Delta X_i}, \quad (9)$$

де X_i – натуральне значення фактора; X_{0i} – центральний рівень; ΔX_i – інтервал варіювання.

Результат кодування представлений в таблиці 4.

Модель другого порядку згідно обрану плану має вигляд:

$$Q = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2. \quad (10)$$

Рівні факторів та матриця плану експерименту представлені в табл. 4,5.

Таблиця 4 – Рівні факторів

Фактор	Позначення	(-1)	(0)	(+1)	Інтервал
Відносна висота об'ємного елементу	K_r	0,25	0,50	0,75	0,25
Кількість підшарів матеріалу	N_L	3	5	7	2
Коефіцієнт відкритої площі решета	ε	0,25	0,28	0,31	0,03

Джерело: розроблено автором

Таблиця 5 – Матриця плану та середні значення критерію

№	x_1	x_2	x_3	Q_1	Q_2	Q_3	$\bar{Q}$, кг/с
1	+1	+1	0	0,023	0,025	0,024	0,0240
2	-1	-1	0	0,029	0,028	0,025	0,0273
3	+1	-1	0	0,020	0,021	0,021	0,0208
4	-1	+1	0	0,026	0,0266	0,027	0,0265
5	+1	0	+1	0,0061	0,0065	0,0066	0,0064
6	-1	0	-1	0,0138	0,0142	0,0145	0,0142
7	+1	0	-1	0,009	0,008	0,010	0,0090
8	-1	0	+1	0,010	0,012	0,011	0,0110
9	0	+1	+1	0,0364	0,0369	0,0372	0,0368
10	0	-1	-1	0,0382	0,0387	0,0391	0,0387
11	0	+1	-1	0,038	0,037	0,039	0,0380
12	0	-1	+1	0,032	0,033	0,031	0,0320
13	0	0	0	0,038	0,037	0,039	0,0380
14	0	0	0	0,036	0,037	0,039	0,0373
15	0	0	0	0,038	0,039	0,036	0,0377

Джерело: розроблено автором

2.5. Статистична перевірка

Однорідність дисперсій перевіряли за критерієм Кохрена:

$$G_p = \frac{\max S_u^2}{\sum S_u^2}, \quad (11)$$

де S_u^2 – дисперсія в u -й точці плану; $\max S_u^2$ – найбільша дисперсія серед усіх точок; $\sum S_u^2$ – сума всіх дисперсій.

Умова відтворюваності: $G_p < G_t$, що після обчислень становить $0,27259 < 0,3346$.

Це підтверджує то, що процес є відтворюваним.

Дисперсія паралельних дослідів становить

$$S_u^2 = \frac{[\sum (Q_{ui} - \bar{Q}_u)^2]}{(m-1)}, \quad (13)$$

де Q_{ui} – результат i -го повторення в u -й точці плану; $\bar{Q}_u = \frac{(Q_{u1} + Q_{u2} + \dots + Q_{um})}{m}$ – середнє значення продуктивності в u -й точці; m – кількість повторень.

Значущість коефіцієнтів оцінювали за критерієм Стюдента:

$$|b_j| \geq \Delta b_j, \quad (12)$$

де b_j – відповідний коефіцієнт регресії; Δb_j – довірчий інтервал для цього коефіцієнта.

Адекватність моделі перевіряли за критерієм Фішера:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}. \quad (13)$$

де S_{ad}^2 – дисперсія неадекватності моделі; S_y^2 – дисперсія відтворюваності.

Умова адекватності: $F_p < F_t$, а після обчислень маємо: $0,70 < 2,53$.

Тобто модель є адекватною.

3. Результати

3.1. Регресійна модель

Після оцінювання коефіцієнтів отримано початкову модель:

$$Q = 0,0377 - 0,00235x_1 + 0,00082x_2 - 0,0017x_3 + 0,00099x_1x_2 + 0,000142x_1x_3 + 0,00138x_2x_3 - 0,019613x_1^2 + 0,006621x_2^2 - 0,00791x_3^2. \quad (14)$$

Член x_1x_3 був статистично незначущим:

$$|b_{13}| = 0,000142 < \Delta b_{ij} = 0,000607. \quad (15)$$

Після його вилучення:

$$Q = 0,0377 - 0,00235x_1 + 0,00082x_2 - 0,0017x_3 + 0,00099x_1x_2 + 0,00138x_2x_3 - 0,019613x_1^2 + 0,006621x_2^2 - 0,00791x_3^2. \quad (16)$$

Таблиця 6 – Статистична значущість коефіцієнтів

Коефіцієнт	Значення	95 % півширина інтервалу	Висновок
(b_0)	0,037667	0,000701	значущий
(b_1)	-0,002350	0,000429	значущий
(b_2)	0,000820	0,000429	значущий
(b_3)	-0,001700	0,000429	значущий
(b_{12})	0,000992	0,000607	значущий
(b_{13})	0,000142	0,000607	незначущий
(b_{23})	0,001380	0,000607	значущий
(b_{11})	-0,019613	0,000632	значущий
(b_{22})	0,006621	0,000632	значущий
(b_{33})	-0,007910	0,000632	значущий

Джерело: розроблено автором

3.2. Фізична інтерпретація коефіцієнтів

Найбільшим за абсолютним значенням є коефіцієнт b_{11} . Отже, продуктивність особливо чутлива до відхилення висоти профільного елемента від проміжного рівня.

Від'ємне значення b_{11} характеризує локальне максимальне значення відгуку за (x_1): як недостатня, так і надмірна висота профілю зменшує продуктивність.

Від'ємний коефіцієнт b_{33} підтверджує наявність раціонального проміжного значення відкритої площі.

Значущість b_{12} свідчить, що ефект профілювання залежить від структурної товщини шару.

Значущість b_{23} доводить, що реальна ефективність відкритої площі визначається кількістю підшарів над поверхнею.

Незначущість b_{13} означає, що безпосередній зв'язок між висотою профільних елементів та відкритою площею слабший, ніж їхня опосередкована взаємодія через структуру шару.

Це є важливим науковим результатом: центральною змінною, яка з'єднує геометрію профілю та проникність поверхні, виступає структурна товщина зернового шару.

3.3. Стаціонарна область та поверхні відгуку

Стаціонарну точку визначали із системи

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x_1} = -0,00235 + 0,000992x_2 - 0,039226x_1 = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial x_2} = -0,00082 + 0,000992x_1 + 0,00138x_3 + 0,013242x_2 = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial x_3} = -0,0017 + 0,00138x_2 - 0,01582x_3 = 0 \end{cases} \quad (17)$$

Вона розташована поблизу центра експерименту:

$$x_{1s} = -0,061; x_{2s} = -0,046; x_{3s} = -0,111.$$

Цим координатам відповідають наближені натуральні значення:

$$K_{r,s} = 0,5 + 0,25(-0,061) = 0,485;$$

$$N_{L,s} = 5 + 2(-0,046) = 4,91;$$

$$\varepsilon_s = 0,28 + 0,03(-0,111) = 0,277.$$

Прогнозована продуктивність становить приблизно $Q = 0,0378$ кг/с.

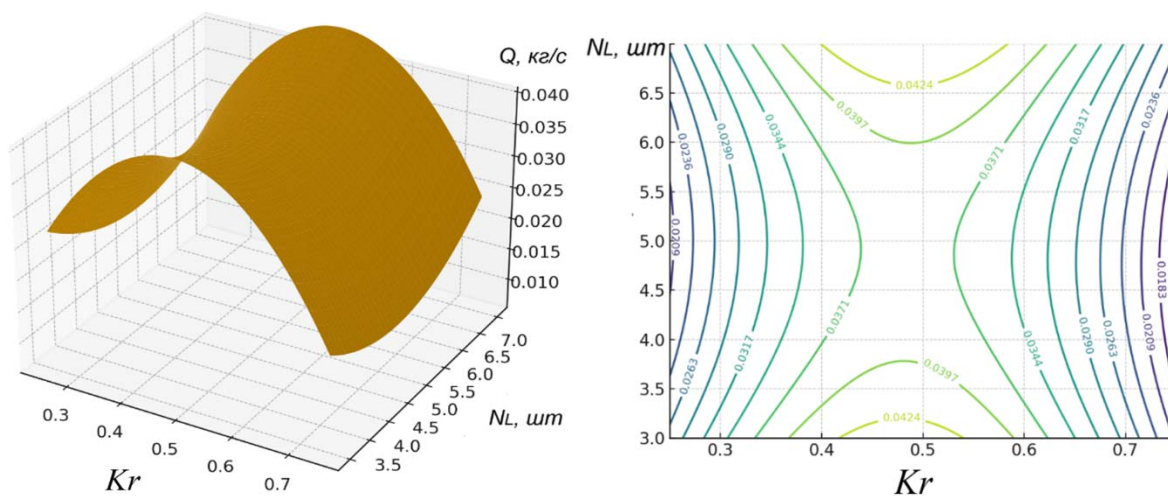
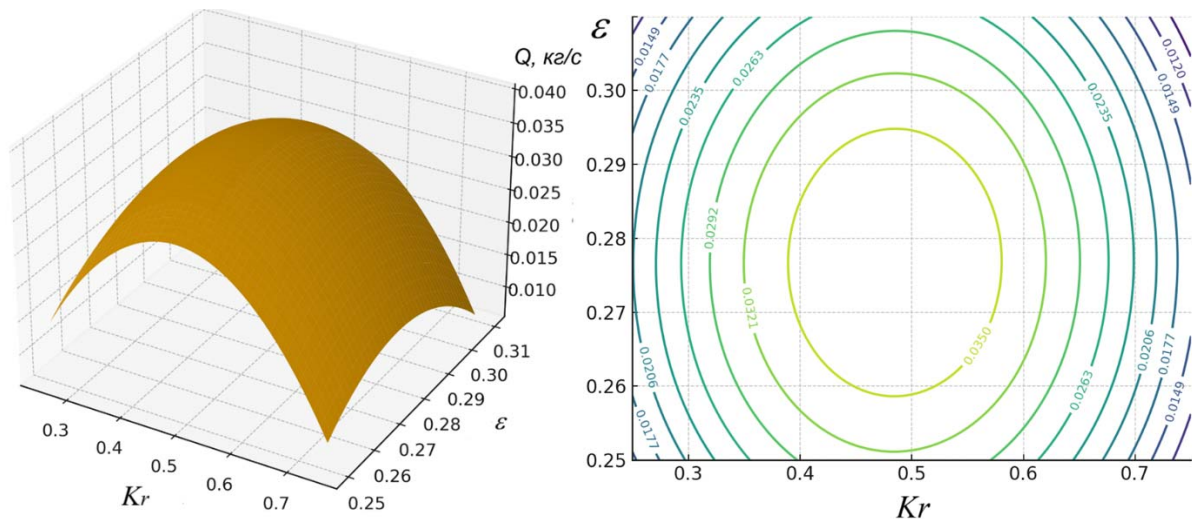


Рисунок 3 – Поверхня відгуку та контурний переріз $Q=f(K_r, N_L)$

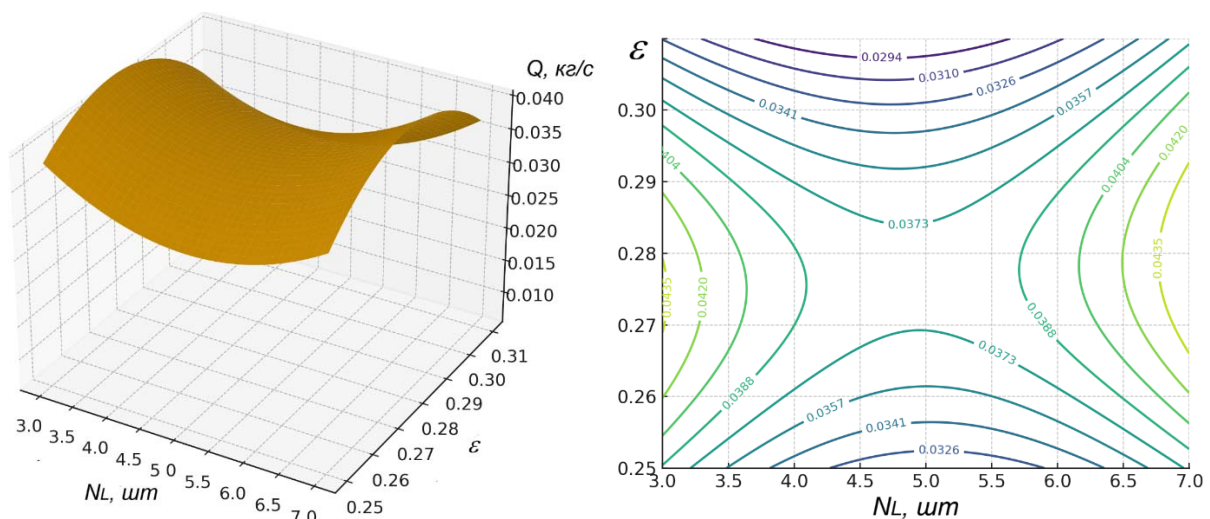
Джерело: розроблено автором

Координати центру становлять $x_{1s} = -0,061$; $x_{2s} = 0,049$. Раціональна область становить $K_r = 0,45 - 0,55$, $N_L = 4,5 - 5,5$.

Рисунок 4 – Поверхня відгуку та контурний переріз ($Q=f(K_r, \varepsilon)$) за ($N_L=5$).

Джерело: розроблено автором

Для перерізу (рис.4) встановлено раціональну область: $K_r \approx 0,46-0,51$, $\varepsilon=0,27-0,285$.

Рисунок 5 – Поверхня відгуку та контурний переріз ($Q=f(N_L, \varepsilon)$) за ($K_r=0,50$).

Джерело: розроблено автором

Раціональна область складає $N_L=4,5 \dots 5,5$, $\varepsilon = 0,270 \dots 0,285$.

Ця поверхня має сідлоподібний характер, тому її стаціонарна точка не повинна беззастережно трактуватися як глобальний максимум.

3.5. Раціональні параметри

Визначені раціональні параметри зведено до табл.7.

Таблиця 7 – Результат багатфакторної оптимізації

Параметр	Раціональний інтервал	Рекомендоване значення
Відносна висота профільного елемента K_r	0,46–0,51	0,49

Кількість підшарів N_L	4,5–5,5	5,0
Коефіцієнт відкритої площі ϵ	0,270–0,285	0,277
Продуктивність поверхні Q	0,036–0,039 кг/с	приблизно 0,0378 кг/с
Повнота поділу η	не менше 0,95	0,95 і більше

Джерело: розроблено автором

Визначений раціональний діапазон забезпечує стійкість до варіацій властивостей сипкого матеріалу, зокрема, вологості, гранулометричного складу, коефіцієнта тертя і нерівномірності подачі.

Перевірка оптимізованих поверхонь у виробничих умовах

Виробнича перевірка була проведена для підтвердження технологічного ефекту з урахуванням зміни умов: від лабораторної поверхні до повнорозмірного решета; від одиничної робочої ділянки до багаторешітного стану; від контрольованої суміші до виробничого зернового потоку; різних типів сепараторів.

Геометрію просіювальних поверхонь формували зі збереженням визначених нормованих співвідношень, насамперед K_r та ϵ .

Просіювальні поверхні з раціональними параметрами встановлено як підсівні робочі органи у наступні сепаратори (рис.6): Petkus K-527; БСХ-100. Виробнича перевірка відбулася на базі агропідприємств ТДВ «Племзавод «Михайлівка»», СТОВ «Промінь», ТОВ «Ханзе Агрі».



а)



б)

Рисунок 6 – Виробничі випробування модернізованих сепараторів: а) – БСХ-100, б) – Petkus K-527

Джерело: розроблено автором

Базові й розроблені просіювальні поверхні порівнювали за подібних (максимально наближених) умов: культура; конструкція та технологічний режим сепараторів; вимоги до кінцевої якості.

Якість очищення контролювали за вмістом домішкової фракції відповідно до нормативної методики визначення якості насіння.

Відносне підвищення продуктивності визначали як

$$\Delta Q = \left[\frac{Q_{opt} - Q_{base}}{Q_{base}} \right] 100\%, \quad (18)$$

де Q_{opt} – продуктивність із оптимізованою поверхнею; Q_{base} – продуктивність із базовою поверхнею.

Питому енергоємність визначали за формулою:

$$e = \frac{P}{Q}, \quad (19)$$

де P – потужність, споживана сепаратором, кВт; Q – продуктивність, т/год.

Зниження питомої енергоємності:

$$\Delta e = \left[\frac{e_{base} - e_{opt}}{e_{base}} \right] 100\%. \quad (20)$$

Питома металоємність процесу становить:

$$\mu = \frac{M}{Q}, \quad (21)$$

де μ – питома металоємність, кг/(т/год); M – маса сепаратора; Q – продуктивність, т/год.

Результати виробничої перевірки представлені в табл.8.

Таблиця 8 – Продуктивність модернізованих сепараторів з об'ємними просіювальними поверхнями

Сепаратор	Продуктивність, т/год	Підвищення відносно базової конструкції
Petkus K-527	34	20–30 %
БСХ-100	72	20–25 %

Джерело: розроблено автором

Промислові випробування підтвердили не лише збільшення продуктивності, але й відсутність технологічних збоїв та відмов, пов'язаних із застосуванням просіювальних поверхонь об'ємної структури.

З метою визначення технологічної ефективності просіювальних поверхонь проведено порівняння питомих показників металоємності та енергоємності з базовими конструкціями решет. Результати представлені в табл. 9.

Таблиця 9 – Питомі технологічні показники

Сепаратор	Тип решета	Продуктивність, т/год	Металоємність, кг/(т·год)	Енергоємність, кВт·год/т
Petkus K-527	базова	31	67,7	0,36
	розроблена	34	61,8	0,32
БСХ-100	базова	57	27,8	0,026
	розроблена	72	21,9	0,021

Джерело: розроблено автором

Таким чином, в результаті виробничої перевірки встановлено, що модернізація сепараторів шляхом встановлення перфорованих просіювальних поверхонь об'ємної структури призводить до зростання продуктивності на 9,7-26,3%. При цьому, відбувається зниження питомих показників енерго- та металоємності на 11,1-19,2% та 8,7-21,2%, відповідно.

Обговорення результатів

Основна новизна дослідження полягає не у застосуванні плану Бокса–Бенкіна як такого, а у фізично обґрунтованому виборі факторного простору. Відносна висота K_r пов'язує геометрію робочого органа з розміром прохідного компоненту. Тому значення K_r характеризує не висоту конкретного рифля, а співвідношення між профілем поверхні та висотою прохідного компоненту. Кількість підшарів N_L характеризує структурний опір потоку. На відміну від масової подачі, цей фактор безпосередньо пов'язаний із

кількістю послідовних контактних рівнів над поверхнею. Коефіцієнт ε характеризує потенційну проникність незалежно від загальної площі решета. Таким чином, фактори формують систему: локальна геометрія, структура та інтегральна проникність.

Це суттєво відрізняється від традиційної оптимізації, де незалежно варіюють швидкість, частоту, кут або кількість отворів.

Профільовані елементи посилюють вертикальне переміщення частинок і руйнують стабільну шарувату структуру. Це скорочує шлях домішкового компонента до отворів і збільшує частоту його контактів із проникними ділянками.

Проте технологічний ефект виникає лише за узгодження з N_L та ε . За малого ε площа проходження є недостатньою. За надмірного ε зменшується опорна частина поверхні, порушується кероване переміщення матеріалу та знижується ефективність взаємодії з профільними елементами. За малого N_L робоча площа недовантажена. За великого N_L верхні підшари практично не беруть участі у безпосередньому проходженні, а нижній шар ущільнюється. Тому оптимальний режим формується не максимальним значенням одного фактора, а узгодженим їх компромісом.

Збереження позитивного ефекту на Petkus K-527, BCX-100 доводить, що отримані параметри описують масштабовану фізичну закономірність. Особливо важливим є підтвердження результатів: на машинах із різною кінематикою; на різних підприємствах; для кукурудзи та соняшнику; у діапазоні продуктивності від 19 до 165 т/год; за тривалої роботи без технологічних відмов.

Зниження питомої енергоємності показує, що підвищення продуктивності досягнуто не за рахунок збільшення привідної потужності, а внаслідок більш ефективного використання площі просіювання.

Виробничі результати підтверджують технологічну масштабованість, однак для повної статистичної валідації доцільно в майбутньому наводити: кількість незалежних виробничих повторень; стандартні відхилення продуктивності; довірчі інтервали; початкову й кінцеву засміченість; вологість кожної виробничої партії; тривалість безперервної роботи; показники засмічення отворів і пошкодження зерна.

Висновки.

1. Запропоновано методологію багатфакторної оптимізації, в якій геометричні та технологічні параметри подано через фізично інтерпретовані характеристики: відносну висоту профільних елементів K_r , кількість підшарів N_L та коефіцієнт відкритої площі ε .

2. Наукова новизна вибору факторів полягає в одночасному представленні локальної взаємодії частинок із профілем, структурного опору багатошарового потоку та інтегральної проникності поверхні.

3. Побудовано квадратичну регресійну модель продуктивності за умови повноти поділу не нижче 95 %. Однорідність дисперсій підтверджено співвідношенням ($Gp=0,27259 < Gt=0,3346$), а адекватність моделі — ($Fp=0,70 < Ft=2,53$).

4. Найбільшу нелінійну чутливість процесу встановлено щодо відносної висоти профільних елементів. Статистично значущі взаємодії ($K_r N_L$) і ($N_L \setminus \varepsilon$) підтвердили, що структурна товщина шару є центральною змінною, яка узгоджує геометрію поверхні з її фактичною проникністю.

5. Визначено раціональну область параметрів: $K_r = 0,46\text{--}0,51$, $N_L = 4,5\text{--}5,5$, $\varepsilon = 0,270\text{--}0,285$. Для практичного застосування рекомендовано: $K_r \approx 0,49$, $N_L \approx 5$ та $\varepsilon \approx 0,277$.

6. Промислова перевірка на Petkus K-527, BCX-100 підтвердила підвищення продуктивності на 20–30 % у виробничих умовах, без збільшення складності

кінематичної системи сепаратора, що підтверджує технологічну та енергетичну доцільність запропонованого рішення.

Список літератури

1. Сало В. М. та ін. Розробка нової конструкції пневморешітної зерноочисної машини: монографія. Кіровоград. нац. техн. ун-т. - Кіровоград : Лисенко В.Ф., 2014. 107 с.
2. Wang, L., Chai, J., Wang, H., & Wang, Y. (2021). Design and performance of a countersunk screen in a maize cleaning device. *Biosystems Engineering*, 209, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.07.008>
3. Ольшанський В.П. та ін. Теорія сепарування зерна: монографія. Харків: ХНТУСГ, 2017. 802 с.
4. Feng, X., Gong, Z., Wang, L., Yu, Y., Liu, T., & Song, L. (2021). Behavior of maize particle penetrating a sieve hole based on the particle centroid in an air-screen cleaning unit. *Powder Technology*, 385, 501–516. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.02.035>
5. Котов Б. І., Пастушенко М. Г. Експериментальна оцінка процесу вібровідцентрового очищення зерна ступінчато-конічним решетом. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2005. Вип. 35. С. 205–208.
6. Li, Z., Jia, P., Li, K., Tong, X., & Wu, Z. (2021). Study on screening performance and parameter optimization of vibrating-dewatering screen. *Advances in Mechanical Engineering*, 13. <https://doi.org/10.1177/16878140211046580>
7. Пивень М. В. Efficiency of separation of grain mixtures by flat vibrating sieves with openers. Інженерія природокористування. 2017. № 2(8). С. 38–44.
8. Zhou, L., Yu, J., Liang, L., Yu, Y., Yan, D., Sun, K., & Wang, Y. (2021). Study on key issues in the modelling of maize seeds based on the multi-sphere method. *Powder Technology*, 394, 791–812.
9. Shchur T., Bredykhin V., Tikhonov S., Makarenko O., Mezentssev V., Kruszelnicka W. Evaluation of Maize Seed Sieving Performance using Sieves with Cassini Oval Shape Openings. *Journal of Agricultural Engineering*. 2024. Vol. 5, № 62. P. 666-673.
10. Tishchenko L., Kharchenko S., Kharchenko F., Bredykhin V., Tsurkan O. Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 2, Issue 7. P. 63-69. DOI 10.15587/1729-4061.2016.65920.
11. Харченко С. О. Концепція інтенсифікації процесів віброрешітного просіювання зернових сумішей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Харків, 2018. 40 с.
12. Kharchenko S., Samborski S., Kharchenko F., Korzec-Strzałka I., Stelmakh A. Dynamics of Loose Materials and Oscillations of Cylindrical Perforated Sifting Surfaces with Volumetric Riffles. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2024;18(8):238-255. doi:10.12913/22998624/194114.
13. Zhao, H., Li, X., Zhao, Y., Li, S., & Diao, P. (2024). Simulation analysis and experiment of a cleaning mechanism with a pre-screening device based on CFD–DEM coupling. *INMATEH—Agricultural Engineering*, 74(3), 603–614. <https://doi.org/10.35633/inmateh-74-54>
14. Liu, W., Zhang, Z., Li, Y., Song, Z., Ma, Z., & Liu, Y. (2024). Parameter optimization of a spiral-step cleaning device for ratooning rice based on computational fluid dynamics–discrete element method coupling. *Agriculture*, 14(12), 2141. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122141>
15. Harzanak, A., & Orhan, E. C. (2024). DEM-aided investigation of the effects of screen surface properties on screening performance. *Madencilik*, 63(2), 86–94.
16. Kharchenko S., Samborski S., Kharchenko F., Korzec-Strzałka I., Stelmakh A. Dynamics of Loose Materials and Oscillations of Cylindrical Perforated Sifting Surfaces with Volumetric Riffles. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2024;18(8):238-255. doi:10.12913/22998624/194114.
17. Kharchenko, S.O., Kharchenko, F.M., Stelmakh, A.M., Pogulyai, V.M., Mayorov, O.V., Guz, O.I. (2024). Analysis of perforated sifting surfaces of separation equipment and prospects for their development. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*, (3 (57), 56-63. <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.3.8>.
18. Стельмах А.М. Моделювання динаміки сипких зернових матеріалів на перфорованих просіювальних віброповерхнях. Вісник СНАУ: Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». 2025. Вип. 3 (61). С.125-134.
19. Kharchenko, S., Samborski, S., Kloda, L. et al. (2025). Combined method of identification of free oscillations of perforated riffled plates. *Sci Rep*. 15, 23992. DOI: 10.1038/s41598-025-06614-5.
20. 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>

21. Szpisják-Gulyás, N., Al-Tayawi, A. N., Horváth, Z. H., László, Z., Kertész, S., & Hodúr, C. (2023). Methods for experimental design, central composite design and the Box–Behnken design, to optimise operational parameters: A review. *Acta Alimentaria*, 52(4), 521–537. <https://doi.org/10.1556/066.2023.00235>
22. Zhang, N., Fu, J., Chen, Z., Chen, X., & Ren, L. (2021). Optimization of the process parameters of an air-screen cleaning system for frozen corn based on the response surface method. *Agriculture*, 11(8), 794. <https://doi.org/10.3390/agriculture11080794>

References

1. Salo, V.M. et al. (2014). *Rozrobka novej konstruktsii pnevmoreshitnoi zernoochysnoi mashyny: monohrafiia*. Kirovohr. nats. tekhn. un-t. Kirovohrad : Lysenko V.F. [in Ukrainian].
2. Wang, L., Chai, J., Wang, H., & Wang, Y. (2021). Design and performance of a countersunk screen in a maize cleaning device. *Biosystems Engineering*, 209, 300–314. DOI 10.1016/j.biosystemseng.2021.07.008 [in English].
3. Olshanskyi, V.P. et al. (2017). *Teoriia separuvannia zerna: monohrafiia*. Kharkiv: KhNTUSH [in Ukrainian].
4. Feng, X., Gong, Z., Wang, L., Yu, Y., Liu, T., & Song, L. (2021). Behavior of maize particle penetrating a sieve hole based on the particle centroid in an air-screen cleaning unit. *Powder Technology*, 385, 501–516. DOI 10.1016/j.powtec.2021.02.035 [in English].
5. Kotov, B. I., Pastushenko, M. G. Experimental evaluation of the process of vibro-centrifugal grain cleaning using a stepped conical sieve. Design, manufacture and operation of agricultural machinery. 2005. Issue 35. pp. 205–208. [in Ukrainian].
6. Li, Z., Jia, P., Li, K., Tong, X., & Wu, Z. (2021). Study on screening performance and parameter optimization of vibrating-dewatering screen. *Advances in Mechanical Engineering*, 13. <https://doi.org/10.1177/16878140211046580> [in English].
7. Piven M. V. Efficiency of separation of grain mixtures by flat vibrating sieves with openers *Environmental Engineering*. 2017. № 2(8). С. 38–44. [in English].
8. Zhou, L., Yu, J., Liang, L., Yu, Y., Yan, D., Sun, K., & Wang, Y. (2021). Study on key issues in the modelling of maize seeds based on the multi-sphere method. *Powder Technology*, 394, 791–812. [in English].
9. Shchur, T., Bredykhin, V., Tikhonov, S., Makarenko, O., Mezentssev, V., Kruszelnicka, W. (2024). Evaluation of Maize Seed Sieving Performance using Sieves with Cassini Oval Shape Openings. *Journal of Agricultural Engineering*. Vol. 5, № 62, 666–67. [in English].
10. Tishchenko L., Kharchenko S., Kharchenko F., Bredykhin V., Tsurkan O. (2016). Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 16, Vol. 2, Issue 7, 63–69. DOI 10.15587/1729-4061.2016.65920. [in English].
11. Kharchenko, S. O. The concept of intensifying the processes of vibrating-screen sieving of grain mixtures: abstract of a thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences: 05.05.11. Kharkiv, 2018. 40 p. [in Ukrainian].
12. Zhao, H., Li, X., Zhao, Y., Li, S., & Diao, P. (2024). Simulation analysis and experiment of a cleaning mechanism with a pre-screening device based on CFD–DEM coupling. *INMATEH—Agricultural Engineering*, 74(3), 603–614. <https://doi.org/10.35633/inmateh-74-54> [in English].
13. Liu, W., Zhang, Z., Li, Y., Song, Z., Ma, Z., & Liu, Y. (2024). Parameter optimization of a spiral-step cleaning device for ratooning rice based on computational fluid dynamics–discrete element method coupling. *Agriculture*, 14(12), 2141. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122141> [in English].
14. Harzanak, A., & Orhan, E. C. (2024). DEM-aided investigation of the effects of screen surface properties on screening performance. *Madencilik*, 63(2), 86–94. [in English].
15. Kharchenko S., Samborski S., Kharchenko F., Korzec-Strzałka I., Stelmakh A. Dynamics of Loose Materials and Oscillations of Cylindrical Perforated Sifting Surfaces with Volumetric Riffles. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2024;18(8):238–255. doi:10.12913/22998624/194114. [in English].
16. Kharchenko, S.O., Kharchenko, F.M., Stelmakh, A.M., Pogulyai, V.M., Mayorov, O.V., Guz, O.I. (2024). Analysis of perforated sifting surfaces of separation equipment and prospects for their development. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*, (3 (57), 56–63. <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.3.8>.
17. Stelmakh, A. M. Modelling the dynamics of free-flowing granular materials on perforated vibrating screening surfaces [in English]. *Bulletin of the SNAU: Series ‘Mechanisation and Automation of Production Processes’*. 2025. Issue 3 (61). 125–134. [in Ukrainian].

18. Kharchenko, S., Samborski, S., Kloda, L. et al. (2025). Combined method of identification of free oscillations of perforated riffled plates. *Sci Rep.* 15, 23992. DOI: 10.1038/s41598-025-06614-5. [in English].
19. 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].
20. Szpisják-Gulyás, N., Al-Tayawi, A. N., Horváth, Z. H., László, Z., Kertész, S., & Hodúr, C. (2023). Methods for experimental design, central composite design and the Box–Behnken design, to optimise operational parameters: A review. *Acta Alimentaria*, 52(4), 521–537. <https://doi.org/10.1556/066.2023.00235> [in English].
21. Zhang, N., Fu, J., Chen, Z., Chen, X., & Ren, L. (2021). Optimization of the process parameters of an air-screen cleaning system for frozen corn based on the response surface method. *Agriculture*, 11(8), 794. <https://doi.org/10.3390/agriculture11080794> [in English].

Serhii Kharchenko¹, Assoc. Prof., DSc., Farida Kharchenko¹, Assoc. Prof., PhD tech. sci., Andrii Stelmakh¹, Pankova Oksana², Assoc. Prof., PhD agric. sci., Ihor Kotliarevskiy¹, Ievgen Labetskyi¹

¹ Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

² Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

Optimization of Three-Dimensional Screening Surface Parameters: Multifactor Modeling and Industrial Validation

The technological efficiency of bulk-material separation is determined not only by the area and geometry of the apertures but also by the dynamics of the multilayer material flow above the screening surface. Conventional approaches to separator optimization are primarily based on varying kinematic operating conditions, the inclination angle, or the absolute geometric dimensions of the working elements. However, such an approach does not ensure adequate coordination between the surface geometry, particle dimensions, and the structural thickness of the material layer, thereby limiting the transferability of the obtained results to other grain materials and industrial-scale machines.

The aim of this study was to establish the nonlinear patterns of the combined effects of the relative height of spatially profiled elements, the number of grain-material sublayers, and the open-area ratio of the perforated surface on separation capacity at a specified separation completeness, as well as to verify the scalability of the identified parameters under industrial operating conditions. The scientific distinctiveness of the proposed approach lies in selecting optimization factors not as isolated absolute machine parameters, but as a system of interrelated geometric and structural characteristics. The height of the three-dimensional element was normalized relative to the characteristic thickness of the undersize component; the material-layer thickness was represented by the number of equivalent sublayers; and the geometric throughput potential of the surface was characterized by the open-area ratio. This approach ensured the physical interpretability of the factors and enabled the transfer of the identified relationships across equipment of different scales. The experiment was conducted using a maize grain mixture and a three-factor, three-level Box–Behnken design. The response variable was separation capacity, subject to the mandatory condition that the separation completeness of the impurity component was not lower than 95%. A second-order regression model was developed. Homogeneity of the experimental variances was confirmed using Cochran's test, the significance of the regression coefficients was assessed using Student's t-test, and model adequacy was verified using Fisher's F-test at a confidence probability of 0.95. A rational parameter region was identified: a relative profiled-element height of 0.46–0.51, a number of sublayers of 4.5–5.5, and an open-area ratio of 0.270–0.285. The recommended central configuration was 0.49, 5.0, and 0.277, respectively. Industrial testing of the optimized screening surfaces on Petkus K-527 and BSH-100 separators during maize cleaning confirmed a 20–30% increase in throughput compared with conventional screens. For the BSH-100 separator, throughput increased from 57 to 72 t/h during maize cleaning and from 33 to 40 t/h during sunflower-seed cleaning. At the same time, the specific energy consumption decreased from 0.026 to 0.021 kWh/t for maize and from 0.045 to 0.0375 kWh/t for sunflower seeds.

The results demonstrate that the normalized coordination of profiled-surface geometry with the discrete structure of the grain layer represents a scalable principle for intensifying separation rather than a local effect limited to a particular laboratory-scale installation.

bulk material, screening, screening surface, structural layer thickness, Box–Behnken design, industrial validation, specific energy consumption

Одержано (Received) 23.06.2026

Прорецензовано (Reviewed) 25.06.2026

Прийнято до друку (Approved) 26.06.2026