

Д.І. Петренко, доц., канд. техн. наук, В.М. Сало, проф., д-р техн. наук,
Д.С. Недельський

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна,
e-mail: petrenko.dimitriy@gmail.com

Аналіз ефективності роботи каскадного решітного сепаратора зернових сумішей

За результатами проведеного аналізу результатів наукових досліджень в сфері післязбиральної обробки зернових сумішей встановлено, що актуальним є подальше удосконалення решітних каскадно-гравітаційних сепараторів шляхом компіляції ефективних дугоподібних решіт пруткового профілю у їх конструкцію. При цьому, потребує встановлення раціональної кількості решіт, зважаючи на крайові умови «ефективність-енерговитрати-компактність». За результатами математичного моделювання визначено раціональну кількість каскадів решіт, що забезпечують максимальну якість сепарації при мінімальних витратах ресурсів, зокрема за критеріями максимальної ефективності сепарації при мінімальних питомих енерговитратах і оптимальній компактності сепаратора.

каскадно-гравітаційний сепаратор, ефективність сепарації, дугоподібне решето, прутковий профіль, математичний аналіз

Постановка проблеми. Питанню післязбиральної обробки зернових сумішей приділено досить широка увага дослідників, сформована усталена класифікація зерноочисних машин за принципом розділення зерноматеріалів на фракції залежно від різниці у фізико-механічних властивостях її компонентів, визначені пріоритетні напрямки розвитку сепаруючих систем [1, 3-5, 8-10]. Так можемо спостерігати все більше ускладнення конструктивних схем сепараторів, що, в основному, пов'язане з намаганням поєднати в одній машині декількох функціональних систем і принципів розділення [1, 6, 8-11]. При цьому, зачасту такі схеми не є синергетичними, а являють собою модульну, в кращому випадку симбіотичну конструкцію, яку виробники пропонують комбінувати залежно від потреб і вартості обладнання.

Як відомо [1, 2], чим більше «корисних» функціональних елементів містить система, тим вище її загальна ефективність, проте при цьому спостерігається зменшення її питомої ефективності і надійності. Це призводить до того, що великі за кількістю функціональних елементів системи вимагають і ускладнення запобіжних та управляючих систем, що призводить до збільшення собівартості обладнання.

Натомість, існує і клас простих сепаруючих систем, які мають просту за складом і функцією конструкцію, проте не знайшли широкого застосування внаслідок власних недоліків, пов'язаних, в основному, з обмеженою функціональністю і продуктивністю.

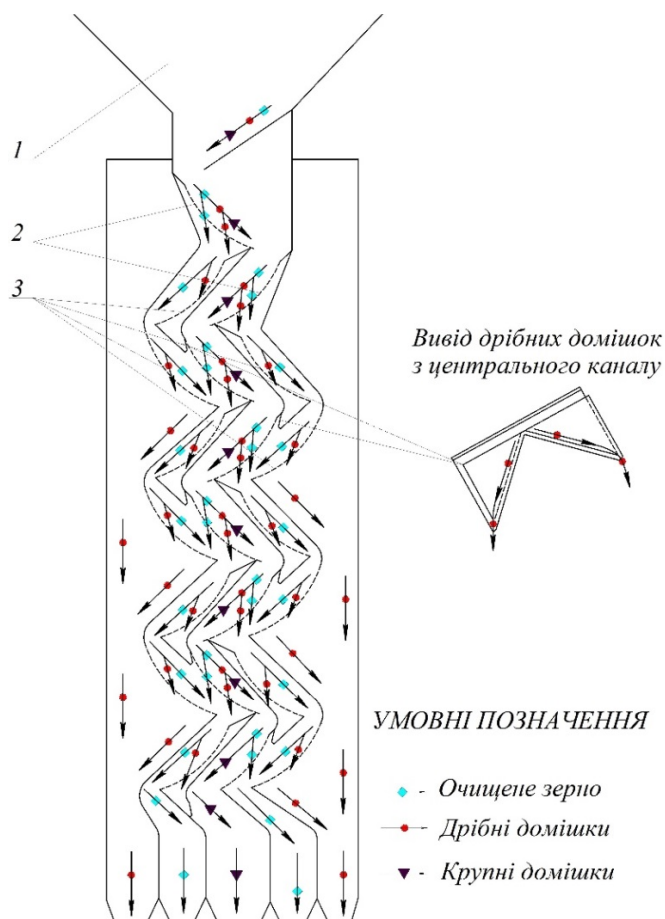
Одним з таких сепараторів є решітний каскадно-гравітаційний [6, 7, 9, 10]. У такого сепаратора робочими органами є решета, розміщені під визначеним кутом каскадно один відносно одного у вертикальній площині. Сепаратор виділяється простотою конструкції та відсутністю активного приводу, має мінімальні габарити в горизонтальній площині та забезпечує можливість поділу зерноsumіші на декілька фракцій. Проте не знайшов широкого вжитку внаслідок обмеженого функціонального застосування, що пов'язано з конструктивним виконанням решіт у вигляді сітчастої поверхні або жорсткої пальцевої [7, 9].

Таким чином, зважаючи на зазначені переваги вказаного типу сепараторів, постає задача щодо їх подальшого удосконалення.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Пошуком найбільш ефективних решіт для сепарації зернових сумішей за розмірними характеристиками займались ряд дослідників, зокрема Васильковський М.І., Котов Б.І., Васильковський О.М., Степаненко С.П., Лузан П.Г., Лещенко С.М., Мороз С.М. та інші [5, 7, 8, 11, 12].

Дослідження [8, 12, 13] акцентують увагу на ефективності застосування решіт, які не мають поперечних перетинок, що пов'язано зі збільшеним «живим» перерізом решітного полотна. Крім того, авторами [12, 15] доводиться ефективність застосування пруткових решіт, які мають достатню жорсткість конструкції і при цьому володіють максимально ефективною площею просіювання. Окрім того, підтверджена і ефективність застосування решіт пруткового профілю, що мають дугоподібну форму, яка сприяє більш активній взаємодії зерноsumіші з решетом внаслідок дії інерційних сил [14]. До того ж, конструкція решіт пруткового профілю дозволяє виконувати регулювання зазору між прутками, тобто робочого отвору решіт, з застосуванням лише комплекту змінних шайб, що сприяє зменшенню собівартості обладнання.

Таким чином, актуальною є компіляція ефективних дугоподібних решіт пруткового профілю у конструкцію гравітаційно-каскадного сепаратора (рис. 1). При цьому, необхідно встановити раціональну кількість решіт, зважаючи на крайові умови «ефективність-енерговитрати-компактність».



1 – бункер; 2 – колосові решета; 3 – підсвіні решета

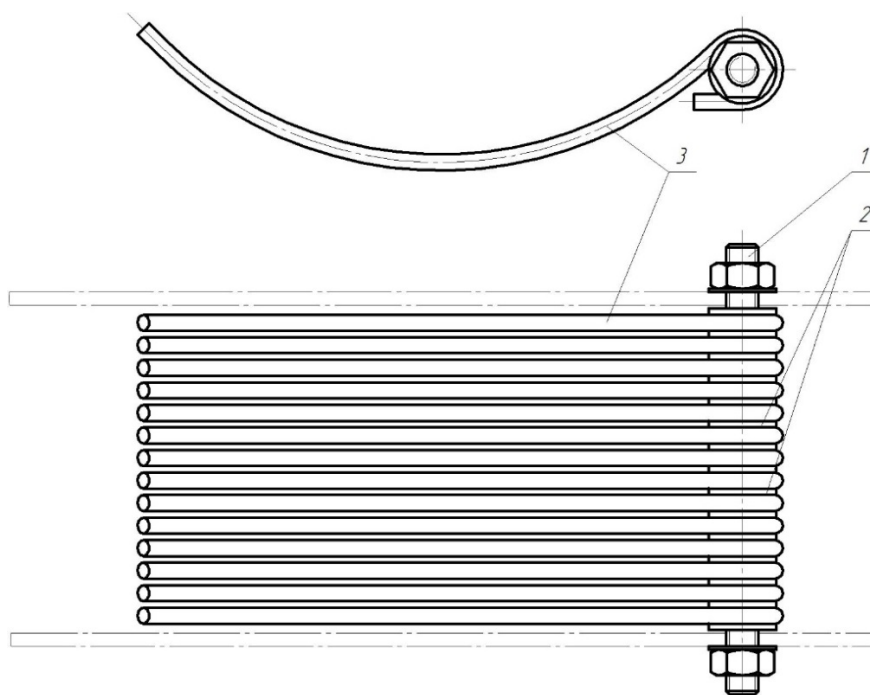
Рисунок 1 – Функціональна схема сепаратора гравітаційно-каскадного типу з використанням пруткових решіт дугоподібної форми

Джерело: розроблено авторами

Постановка завдання. Дослідження технологічного процесу та обґрунтування параметрів решітного сепаратора гравітаційно-каскадного типу з використанням пруткових решіт дугоподібної форми.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо сепаратор зернових сумішей, що має наступні конструктивні особливості (рис. 1):

- робочі органи – решета пруткового типу (рис. 2);
- розміщення решіт – каскадне під кутом $\alpha > \phi$ (де ϕ – кут тертя);
- форма решіт – дугоподібна з радіусом R ;
- використано два типи решіт: колосові (у центральному каналі) та підсівні (у бічних каналах).



1 – головна вісь; 2 – шайби; 3 – прутки дугоподібної форми

Рисунок 2 – Загальна конструкція пруткового решета дугоподібної форми

Джерело: розроблено авторами з використанням [12, 14]

Відповідно, основним завданням є визначення раціональної кількості каскадів решіт n_1 (колосових) та n_2 (підсівних), що забезпечують максимальну якість сепарації при мінімальних витратах ресурсів.

Критеріями оптимізації обираємо наступні:

- ефективність сепарації: $E(n) \rightarrow \max$;
- питомі енерговитрати: $W(n) \rightarrow \min$;
- компактність: $n \rightarrow \min$ при $E(n) \geq E_{\min}$ (де n – кількість каскадів решіт).

Проаналізуємо кінематику руху частинок по дугоподібному решету (рис. 3). При цьому враховуємо, що згідно законів класичної механіки на частку діятимуть сили: тяжіння $G = mg$; нормальна реакція поверхні N ; тертя $F_{mp} = \mu N$ (де μ – коефіцієнт тертя); відцентрова $F_{\text{вц}} = (m\mathcal{G}^2)/R$.

Швидкість частинки на дугоподібному решеті не є постійною, а її прискорення матиме значення:

$$\frac{d\mathcal{G}}{dt} = g(\sin \varphi - \mu \cdot \cos \varphi) - \frac{\mu \mathcal{G}^2}{R}, \quad (1)$$

де φ – поточний кут положення частки на дузі.

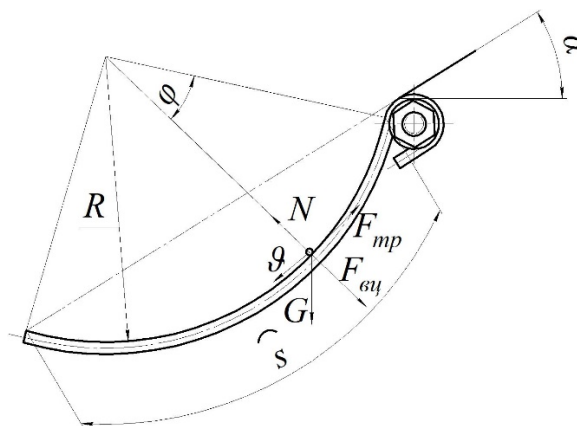


Рисунок 3 – Кінематика переміщення часток по прутковому решето дугоподібної форми
Джерело: розроблено авторами з використанням [10, 14, 15]

Для забезпечення ефективного просування через пруткове решето швидкість часток повинна бути достатньою для: подолання сили тертя; створення умов для проходження дрібних частинок через щілини; утримання великих частинок на поверхні, тобто:

$$g_{omm} = \sqrt{[2gR(\sin \varphi - \mu \cdot \cos \varphi)]}. \quad (2)$$

Для того, щоб зернова суміш не забивала решето, необхідно, щоб тангенціальна сила була більшою за сили опору:

$$g \sin \varphi > \mu \cdot \left(g \cdot \cos \varphi + \frac{g^2}{R} \right). \quad (3)$$

При цьому час перебування частинки на решеті довжиною дуги $s = R\varphi$:

$$t = s / g = \frac{R\varphi}{\sqrt{[2gR(\sin \varphi - \mu \cdot \cos \varphi)]}}, \quad (4)$$

або

$$t = \varphi \sqrt{\frac{R}{2g(\sin \varphi - \mu \cdot \cos \varphi)}}. \quad (5)$$

Оцінимо сепараційну ефективність пруткових решіт. Для цього розглянемо частинку, яка рухається по решету, при цьому покладемо, що ξ є випадковою величиною до моменту проходження через щілину, а процес проходження є марківським процесом з неперервним часом.

Ймовірність того, що частинка не пройде за малий інтервал часу Δt :

$$P(\xi > t + \Delta t | \xi > t) = P(\xi > \Delta t) = 1 - \lambda \Delta t + o(\Delta t), \quad (6)$$

тоді:

$$P(\xi > t + \Delta t) = P(\xi > t) \cdot (1 - \lambda \Delta t). \quad (7)$$

Позначаючи $F(t) = P(\xi \leq t)$ – функцію розподілу:

$$F(t + \Delta t) - F(t) = \lambda(1 - F(t))\Delta t, \quad (8)$$

одержимо диференціального рівня:

$$\frac{dF}{dt} = \lambda(1-F), \quad (9)$$

розв'язок якого отримуємо з початкової умови $F(0) = 0$:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (10)$$

Таким чином, ймовірність того, що частинка розміром $d_{екв}$ пройде через щілину шириною b за час t , описується експоненціальним законом:

$$P(d_{екв}, b, t) = 1 - e^{-\lambda(d_{екв}, b)t}, \quad (11)$$

де $\lambda(d_{екв}, b)$ – інтенсивність сепарації, що залежить від групи $d_{екв} / b$.

Ймовірність контакту частинки з щілиною між прутками пропорційна площі поперечного перерізу відносного руху $S \sim d_{екв} \cdot b$, а її відносна швидкість становитиме $\mathcal{G}_{відн} = \mathcal{G} \sin(\beta)$. Отже ймовірність проходження частки за розміром:

$$\lambda \sim (d_{екв} \cdot b) \cdot (\mathcal{G} \sin(\beta)) \cdot (b / d_{екв})^2 = \frac{\mathcal{G} b \sin(\beta)}{d_{екв}}. \quad (12)$$

Таким чином, інтенсивність сепарації λ залежить від геометричних та кінематичних параметрів часток і решітної системи:

$$\lambda = \kappa_0 \cdot \left(\frac{b}{d_{екв}} \right)^2 \cdot \left(\frac{\mathcal{G}}{b} \right) \sin(\beta), \quad (13)$$

де κ_0 – безрозмірний коефіцієнт форми частини; β – кут між траєкторією частинки та площиною решета; b – ширина щілини між прутками решета; $d_{екв}$ – характерний розмір частинки.

Ефективність сепарації одного решета будемо оцінювати величиною E_1 , яка характеризує відношення маси виділеної фракції до маси цієї фракції у вихідній суміші.

Для відносної однорідності за розмірами фракцій зерноsumіші ефективність одного решета матиме значення [13, 14]:

$$E_1 = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (14)$$

Нехай після першого решета частка невиділеної фракції $q_1 = 1 - E_1$, тоді після другого решета частка невиділеної фракції від залишку також становитиме $(1 - E_1)$, тому загальна частка невиділеної фракції в цьому випадку:

$$q_2 = q_1(1 - E_1) = (1 - E_1)^2. \quad (15)$$

За індукцією, після n каскадів:

$$q_n = (1 - E_1)^n, \quad (16)$$

тобто для системи з n ідентичних послідовних каскадів з ефективністю E_1 загальна ефективність системи становитиме:

$$E(n) = 1 - (1 - E_1)^n. \quad (17)$$

Таким чином, функція $E(n)$ монотонно зростає за n та має межу:

$$\lim_{(n \rightarrow \infty)} E(n) = 1. \quad (18)$$

Асимптотично, при великих значеннях n :

$$E(n) \approx 1 - e^{-n \cdot \ln\left(\frac{1}{1-E_1}\right)}. \quad (19)$$

Приріст ефективності при додаванні n -го каскаду решіт становитиме:

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) = E_1 \cdot (1-E_1)^{n-1}, \quad (20)$$

і, відповідно, монотонно спадатиме зі зростанням n .

Аналіз питомої ефективності $\bar{E}(n)$ одного каскаду показує, що вона досягає максимуму при $n = 1$ та монотонно спадає, що пояснюється з наступних залежностей:

$$\bar{E}(n) = \left[1 - (1-E_1)^n / n \right]. \quad (21)$$

Знаходимо похідну по n (розглядаючи n як неперервну зміну):

$$\frac{d\bar{E}}{dn} = \frac{\left\{ -n \cdot (1-E_1)^n \cdot \ln(1-E_1) - \left[1 - (1-E_1)^n \right] \right\}}{n^2}. \quad (22)$$

Значення чисельника в точці $n = 1$ становитиме:

$$-(1-E_1) \cdot \ln(1-E_1) - E_1, \quad (23)$$

якщо $\ln(1-E_1) < 0$ при $E_1 > 0$, перший доданок матиме додатне значення.

При малих E_1 : $-(1-E_1) \cdot \ln(1-E_1) \approx E_1$, тому чисельник близький до нуля, але для $n > 1$ похідна стає від'ємною.

В свою чергу, приріст ефективності сепарації задовольняє геометричну прогресію:

$$\frac{\Delta E(n+1)}{\Delta E(n)} = 1 - E_1 = const < 1. \quad (24)$$

Проаналізуємо критерій оптимальності – критерій мінімальної ефективності. Для цього знайдемо мінімальне значення кількості каскадів решіт n , при якому $E(n) \geq E_{\min}$.

Виходячи з нерівності:

$$1 - (1-E_1)^n \geq E_{\min}, \quad (25)$$

логічним є твердження

$$n \cdot \ln(1-E_1) \leq \ln(1-E_{\min}). \quad (26)$$

Оскільки $\ln(1-E_1) < 0$:

$$n \geq \frac{\ln(1-E_{\min})}{\ln(1-E_1)}. \quad (27)$$

Таким чином, мінімальна кількість каскадів становитиме:

$$n = \left\lceil \frac{\ln(1 - E_{\min})}{\ln(1 - E_1)} \right\rceil, \quad (28)$$

де $\lceil \cdot \rceil$ – функція округлення вгору.

Введемо умову, за якої каскад решіт є ефективним за умови, якщо його додавання надає приріст ефективності, величина якого більша за граничне значення:

$$\Delta E(n) > \Delta E_{\text{гр}}. \quad (29)$$

Максимальна доцільна кількість каскадів при заданому $\Delta E_{\text{гр}}$:

$$n_{\max} = \left\lceil \frac{\ln(\Delta E_{\text{гр}} / E_1)}{\ln(1 - E_1)} \right\rceil + 1. \quad (30)$$

Наступним етапом є аналіз питомих енерговитрат відносно продуктивності, а саме:

$$W(n) = \frac{n \cdot P_0}{Q_0 \cdot (1 + \kappa_p(n-1))}, \quad (31)$$

де P_0 – номінальне навантаження одного каскаду; Q_0 – номінальна продуктивність; κ_p – коефіцієнт, що характеризує падіння продуктивності.

Таким чином, енергетичну ефективність можемо представити у вигляді відношення якості (ефективності) сепарації до енерговитрат:

$$\eta(n) = E(n) / W(n) = \frac{[1 - (1 - E_1)^n] \cdot Q_0}{n \cdot P_0 \cdot [1 + \kappa_p(n-1)]}, \quad (32)$$

при цьому вона має максимум при певному $n_{\text{опт}}$.

Цільовою функцією комплексного критерію якості є:

$$\Phi(n) = w_1 \cdot E(n) - w_2 \cdot n - w_3 \cdot W(n), \quad (33)$$

де w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти важливості критеріїв.

Основна оптимізаційна задача полягає в наступному:

$$n^* = \arg \max \Phi(n), \quad n \in N. \quad (34)$$

Алгоритм визначення оптимальної кількості каскадів наступний.

Визначення значення E_1 експериментально або за формулою:

$$E_1 = 1 - e^{-\kappa_0 t}. \quad (35)$$

Розрахунок n_{\min} за умовою $E(n) \geq E_{\min}$:

$$n_{\min} = \left\lceil \frac{\ln(1 - E_{\min})}{\ln(1 - E_1)} \right\rceil. \quad (36)$$

Перевірка закону спадання ефективності сепарації для $n = n_{\min}$ до $n_{\min} + 5$, якщо

$$\Delta E(n+1) < \Delta E_{\text{гр}} \Rightarrow n_{\text{опт}} = n. \quad (37)$$

Відносна зміна оптимальної кількості каскадів при зміні E_1 :

$$\frac{\partial n_{\min}}{\partial E_1} \cdot \frac{E_1}{n_{\min}} = - \frac{1}{[E_1 \cdot (1 - E_1) \cdot \ln(1 - E_1)]}. \quad (38)$$

Аналіз залежності сепараційної ефективності системи (рис. 4), дозволяє зробити наступні висновки.

Сумарна ефективність системи зростає експоненційно і досягає максимуму при шести каскадах решіт, що відповідає сумарній ефективності системи на рівні близько 99,59 %.

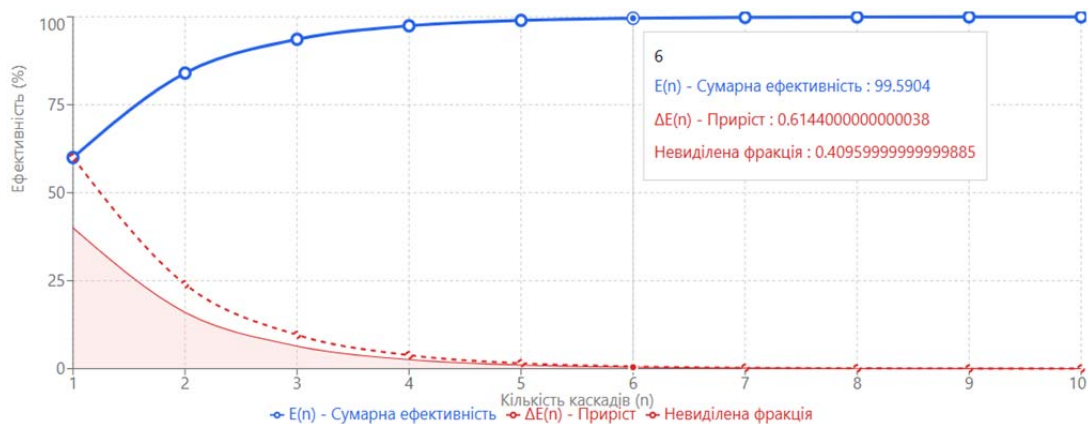


Рисунок 4 – Залежності сепараційної ефективності системи від кількості решітних каскадів з врахуванням умов: сепараційна ефективність колосового решета $E_{кол} = 60\%$, сепараційна ефективність підсівного решета $E_{нід} = 55\%$, мінімальні вимоги до ефективності сепарації $E_{min} = 99\%$.
Джерело: розроблено авторами

Подальше збільшення каскадів решіт є недоцільним з точки зору цільової функції комплексного критерію якості $\Phi(n)$, оскільки приріст ефективності становить менше 2% (рис. 5) з подальшим монотонним спаданням у $(1-E_1)$ разів. При цьому, загальна закономірність спадання ефективності після другого каскаду стабілізується і становить $q = 0,400$.

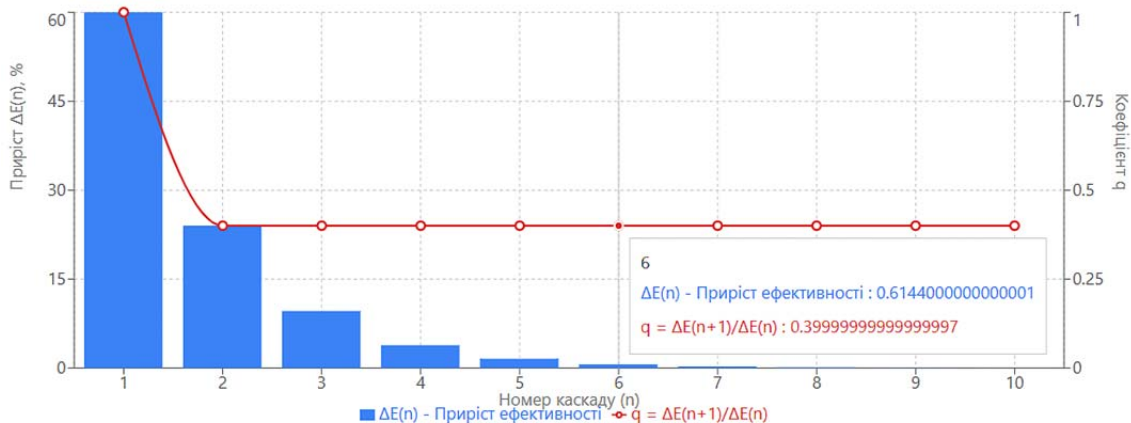


Рисунок 5 – Закономірність спадання ефективності сепарації
Джерело: розроблено авторами

Аналіз залежності загальної сепараційної ефективності системи від ефективності кожного її елемента (рис. 6) засвідчує, що зберігається загальна тенденція зростання ефективності, при цьому, при зростанні сепараційної спроможності решіт від 50 % до 75 % спостерігається зростання загальної ефективності. Так, при $E_1 = 50\% \dots 55\%$ потрібно 5...6 каскадів, при $E_1 = 70\% \dots 75\%$ достатньо 3...4. При застосуванні шести каскадів при змінні E_1 від 50 % до 75 % спостерігається зміна ефективності від 98,4 % до 100 % , що підтверджує необхідність використання високоефективних решіт з підвищеною сепараційною здатністю.

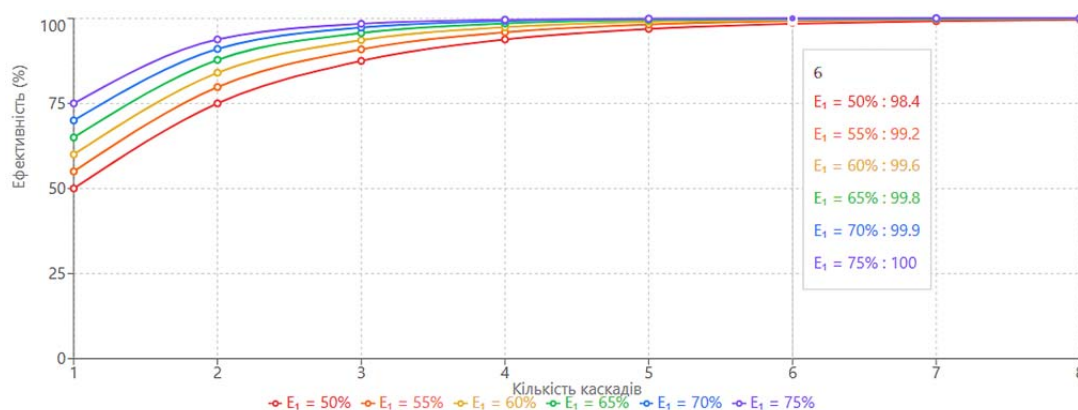


Рисунок 6 – Порівняльний аналіз загальної сепараційної ефективності від ефективності її елементів (решіт)

Джерело: розроблено авторами

Залежність енергетичної ефективності від ефективності системи $\eta(n) = E(n)/W(n)$ (рис. 7) демонструє спадання, досягаючи максимуму при $n = 2 \dots 4$, що обумовлено експоненційним зростанням питомих витрат. Для задоволення умов сепараційної ефективності вище 99 %, що досягається при шести каскадах решіт, енергетична ефективність системи становить 13,28. Таким чином досягається оптимум між якістю роботи системи і її питомими затратами.

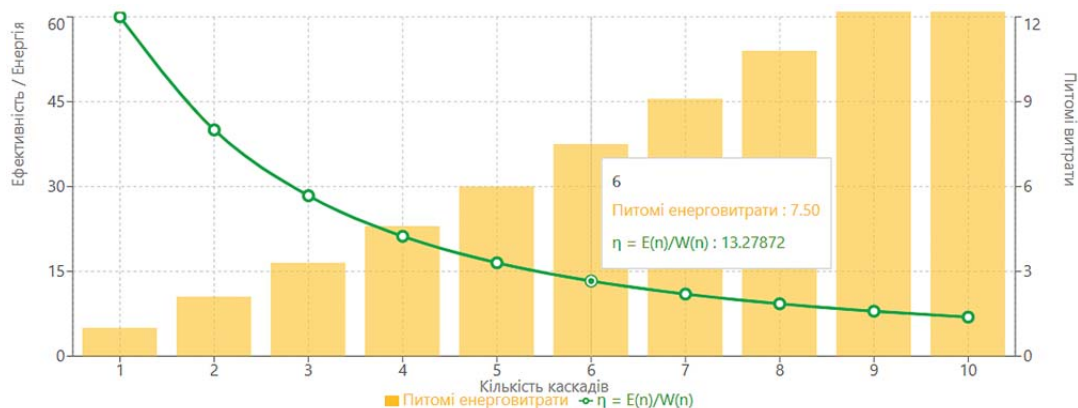


Рисунок 7 – Залежність енергетичної ефективності від ефективності системи

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Отже, критеріями вибору мінімальної кількості каскадів решіт є обмеження габаритів обладнання та його вартості, що обумовлюється залежністю $\Delta E(n_{\min} + 1) < 1\%$.

За умов високих вимог до якості кінцевого продукту (зерно найвищих класів) потрібно вибирати $(n_{\min} + 1)$. При цьому, питомі витрати на додаткові решітні каскади будуть відповідати умові $\Delta E(n_{\min} + 1) > 2\%$.

За результатами проведеного математичного аналізу встановлено, що раціональним є застосування 3...4 каскадів дугоподібних колосових решіт пруткового типу, що мають ефективність сепарації $E_1 = 0,60 \dots 0,70$, 4...5 каскадів дугоподібних підсвітих решіт пруткового типу при їх ефективності сепарації $E_2 = 0,50 \dots 0,60$, при цьому загальна система міститиме 7...9 каскадів, що забезпечить $E_{\text{заг}} > 90\%$.

Список літератури

1. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентилявання, охолодження) : колект. монографія / Котов Б. І. та ін.; Нац. акад. аграр. наук України, Нац. наук. центр "Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва". Київ; Ніжин : Лисенко М. М. [вид.], 2017. 551 с.
2. Золотарьов П. Г. Інженерія надійності в аграрній техніці. Київ: Агропром, 2020. 310 с.
3. Feng, Xin & Gong, Zhenping & Wang, Lijun & Yu, Yongtao & Liu, Tianhua & Song, Lianglai. (2021). Behavior of maize particle penetrating a sieve hole based on the particle centroid in an air-screen cleaning unit. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.02.035>.
4. Lijun Wang, Shuai Zhang, Yunpeng Gao, Tao Cui, Zhao Ma, Bo Wang. (2023). Investigation of maize grains penetrating holes on a novel screen based on CFD-DEM simulation. *Powder Technology*. Volume 419. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118332>.
5. Stepanenko, S. P., Kотов, B. I. Theoretical research of separation process grain mixtures. *Machinery & Energetics*. 2019. 10 (4). P. 137-143.
6. Патент №139435 Україна, МПК B07B1/00, B07B13/00. Сепаратор гравітаційно-каскадного типу / Дударев І.М.; Заявлено 20.05.2019; Опубл. 10.01.2020; Бюл. № 1.
7. Dudarev I., Zabrodotska L., Satsiuk V., Taraymovich I., Olkhovskiy V. Research on seed separation process on a gravity-cascade separator. *INMATEH – Agricultural engineering*. Vol. 62, No. 3. 2020. Pp. 173-180.
8. Розробка нової конструкції пневморешітної зерноочисної машини. Том 1. Обґрунтування параметрів транспортера-сепаратора : монографія / В. М. Сало, С. М. Мороз, О. М. Васильковський [та ін.] ; М-во освіти і науки України, Кіровоград. нац. техн. ун-т. Кіровоград : Лисенко В.Ф., 2014. 108 с.
9. Стаценко Д.І. Куянов Ю.Ю., Кошулько В.С., Олексієнко В.О. Сепарування зернових сумішей з використанням сил гравітації. Збірник наукових праць магістрантів та студентів. Мелітополь: ТДАТУ, 2019. С. 69-70.
10. Голячук С.Є. Сепарування зернових мас з використанням сил гравітації. Міжвузівський збірник "НАУКОВІ НОТАТКИ". Луцьк, 2012. Випуск №39. С. 27-33.
11. The mathematical modeling of changes in grain moisture and heat loss on adsorption drying from parameters of grain dryer / I.L. Rogovskii, S.P. Stepanenko, A.V. Novitskii, V.I. Rebenko. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 13. pp.1-7.
12. 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. Вип. 50, 2020. – Кропивницький: ЦНТУ. – С. 52-58. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.52-58>.
13. Васильковський О.М., Лещенко С.М., Петренко Д.І., Мороз С.М., Нестеренко О.В. Попередні дослідження пасивного струнного решета. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 2022 вип. 52. С. 73-80. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.73-80>.
14. Васильковський О. М. Розробка конструкції та обґрунтування параметрів відцентрового решітного сепаратора зерна: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Кіровоград, 2001. 18 с.
15. Лузан П.Г., Лузан О.Р., Петренко Д.І. Обґрунтування параметрів решета для сепарації зерна. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту. 2016. Вип. 29. С. 46-53.

References

1. Kотов, B. I., et al. (2017). *Modeling of technological processes in typical objects of post-harvest processing and grain storage (cleaning, separation, drying, active ventilation, cooling)*. National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. [in Ukrainian].
2. Zolotarov, P. H. (2020). *Reliability engineering in agricultural machinery*. Kyiv: Ahroprom. [in Ukrainian].
3. Feng, Xin & Gong, Zhenping & Wang, Lijun & Yu, Yongtao & Liu, Tianhua & Song, Lianglai. (2021). Behavior of maize particle penetrating a sieve hole based on the particle centroid in an air-screen cleaning unit. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.02.035>.
4. Lijun Wang, Shuai Zhang, Yunpeng Gao, Tao Cui, Zhao Ma, Bo Wang. (2023). Investigation of maize grains penetrating holes on a novel screen based on CFD-DEM simulation. *Powder Technology*. Volume 419. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118332>.
5. Stepanenko, S. P., & Kотов, B. I. (2019). Theoretical research of separation process grain mixtures. *Machinery & Energetics*. Kyiv, 10(4), 137-143.
6. Dudarev, I. M. (2020). *Gravity-cascade type separator* (Ukrainian Patent No. 139435). Ukrpatent. [in Ukrainian].

7. Dudarev, I., Zabrodotska, L., Satsiuk, V., Taraymovich, I., & Olkhovskiy, V. (2020). Research on seed separation process on a gravity-cascade separator. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 62(3), 173–180.
8. Salo, V. M., Moroz, S. M., Vasylovskiy, O. M., et al. (2014). *Development of a new design of a pneumatic-sieve grain cleaning machine. Vol. 1. Substantiation of the parameters of the conveyor-separator*. Kirovohrad: Lysenko V. F. [in Ukrainian].
9. Statsenko, D. I., Kuianov, Yu. Yu., Koshulko, V. S., & Oleksienko, V. O. (2019). Separation of grain mixtures using gravitational forces. *Zbirnyk naukovykh prats mahistrantiv ta studentiv*. Melitopol: TSATU, 69-70. [in Ukrainian].
10. Holachuk, S. Ye. (2012). Separation of grain masses using gravitational forces. *Mizhvuzivskiy zbirnyk "Naukovi notatky"*, (39), 27-33. Luts'k. [in Ukrainian].
11. Rogovskii, I. L., Stepanenko, S. P., Novitskii, A. V., & Rebenko, V. I. (2020). The mathematical modeling of changes in grain moisture and heat loss on adsorption drying from parameters of grain dryer. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 13, 1-7.
12. Vasylovskiy, O. M., Leshchenko, S. M., Moroz, S. M., Nesterenko, O. V., & Molokost, L. A. (2020). To the creation of the concept of an "ideal" sieve of a grain separator. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, (50), 52-58. [in Ukrainian] <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.52-58>.
13. Vasylovskiy, O. M., Leshchenko, S. M., Petrenko, D. I., Moroz, S. M., & Nesterenko, O. V. (2022). Preliminary studies of passive string sieve. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, (52), 73-80. [in Ukrainian] <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.73-80>.
14. Luzan, P. H., Luzan, O. R., & Petrenko, D. I. (2016). Substantiation of the parameters of the sieve for grain separation. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia*, (29), 46–53. Kirovohrad: KNTU. [in Ukrainian].

Dmytro Petrenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhii Leshchenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vasyl Salo**, Prof., Dr. Tech. Sci., **Dmytro Nedelsky**

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Efficiency Analysis of a cAscade Sieve Separator for Grain Mixtures

The study aims to investigate the technological process and substantiate the parameters of a gravity-cascade sieve separator equipped with arc-shaped rod-profile sieves to improve the post-harvest grain processing efficiency.

The research is based on mathematical modeling of grain mixture separation processes. The kinematic characteristics of particle motion along arc-shaped sieves were analyzed considering gravitational, frictional, and centrifugal forces. The separation efficiency was evaluated using a Markov process model with continuous time to determine the probability of particles passing through the sieve gaps.

Mathematical analysis established the rational number of sieve stages required to maximize separation quality while minimizing resource consumption. It was determined that the total system efficiency increases exponentially, reaching a maximum of approximately 99,59% at six stages. Further increasing the number of stages is impractical as the efficiency increment drops below 2%. For highly efficient sieves ($E = 0,60 \dots 0,70$), 3...4 stages are sufficient, while for lower efficiency sieves ($E = 0,50 \dots 0,60$), 4...5 stages are required.

The study substantiates that the optimal configuration for a gravity-cascade separator includes 7...9 stages in total (3...4 scalping and 4...5 sifting sieves), ensuring an overall efficiency $E > 90\%$. This configuration achieves the best balance between separation quality, specific energy consumption, and equipment compactness.

gravity-cascade separator, separation efficiency, arc-shaped sieve, rod profile, mathematical modeling

Одержано (Received) 07.01.2026

Прорецензовано (Reviewed) 22.01.2026

Прийнято до друку (Approved) 27.01.2026