

УДК 631.362.3:633.1

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.265-271](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.265-271)

С. О. Харченко¹, доц., д-р техн. наук, О. І. Біловод¹, доц., канд. техн. наук,
Ф. М. Харченко², доц., канд. техн. наук, А. М. Стельмах², В. В. Тіманов¹, А. І. Чигрин¹

¹ Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна

² Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

e-mail: kharchenko_mtf@ukr.net

Методи визначення показників надійності рифлених перфорованих просіювальних поверхонь

У статті представлено методи аналізу показників надійності перфорованих просіювальних поверхонь з різними типами отворів, що застосовуються для сепарації сипких матеріалів. Досліджено вплив параметрів базових решіт з продовгуватими отворами, запропонованих з продовгуватими отворами та об'ємними рифлями. Визначено узагальнені вирази для ідентифікації зношення решета, які враховують геометричні характеристики отворів, властивості матеріалу решета та умови експлуатації у вигляді зовнішнього навантаження. Також ідентифіковано значущі показники надійності - коефіцієнт зношування для різних типів решет. Визначено вплив технологічних умов та конструктивних параметрів на залишковий ресурс решета. Результати показують, що використання об'ємних рифлів здатне зменшити зношення та поліпшити довговічність решет. Представлено залежності динаміки зношування та порівняльний аналіз для двох типів сипких матеріалів: пшениці та кукурудзи. Запропоновані методи дозволяють здійснювати інженерну оптимізацію решіт на етапі проектування, їх експлуатаційної діагностики.

решето, концентрація напружень, ресурс, швидкість зношування, надійність

Постановка проблеми. Перфоровані поверхні є основним робочим органом в обладнанні для очищення, сортування та калібрування сипких матеріалів за розміром у сільському господарстві та харчовій промисловості [1, 2]. Отвори заданого розміру та форми на решеті дозволяють поділити компоненти сипкого матеріалу за розмірами. Використання інноваційних форм отворів [3, 4] дозволяє суттєво інтенсифікувати процес сепарування сипких матеріалів та збільшити технологічні показники (продуктивність та повноту поділу) сепарувальних машин. Проте питання надійності подібних решет розглянуто недостатньо, що обмежує широке практичне використання новацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час експлуатації решета зазнають постійного контакту та абразивного навантаження від зернових сипких матеріалів [5, 6]. Найбільш поширеними є базові решета з круглими, трикутними або продовгуватими отворами [1, 7, 8]. Проте подібна геометрія з використанням кутових форм (прямокутник або трикутник) утворює концентрацію напружень, що призводить до передчасного руйнування через втому. Другим негативним фактором є абразивні властивості сипкого матеріалу, який протягом експлуатації зменшує товщину, та, відповідно жорсткість конструкції [6]. Це призводить до появи деформацій у вигляді тріщин між отворами та інтенсивному зниженню якості поділу компонентів. Поява тріщин є граничним технологічним показником якості роботи перфорованих просіювальних поверхонь [6].

Присутня вібрація на решетах інтенсифікує сегрегацію компонентів в середині шару, поліпшує динамічні характеристики сипкого матеріалу, проте також утворює негативні дії щодо надійності решета [1]. Наявні вимушені та власні коливання решет з базовими та інноваційним отворами/рифлями були досліджені в роботах [9, 10]. Авторами відмічено, що використання решет з отворами складної геометрії/рифлями

дозволяє зменшити локальні напруження, підвищити жорсткість і продовжити ресурс елементів. Зміна концентраторів напруження в області отворів була досліджена в [11] для базових трикутних форм та трипелюсткових епіциклоїдних. Частково подібні висновки прослідковуються в роботах [6, 12], які відзначають впливовість геометрії отворів у забезпеченні надійності та зносостійкості решіт.

Постановка завдання. Метою цієї праці є розробка методики оцінки надійності перфорованих просіювальних поверхонь з визначенням показників швидкості зношування, залишкового ресурсу в залежності від типу отворів/рифлів, властивостей сипких матеріалів.

Виклад основного матеріалу. Методика досліджень включала аналіз впливових факторів, аналітичне визначення показників надійності решет, чисельний прорахунок даних з урахуванням різних типів отворів, властивостей сипких матеріалів, аналіз результатів.

Для досліджень обрано наступні типи перфорованих просіювальних поверхонь: базові з продовгуватими отворами, запропоновані з продовгуватими отворами і рифлями (табл. 1, рис. 1).

Таблиця 1 – Параметри дослідних решет

Тип решета	Форма отвору	Розміри отворів*	Номінальна товщина, мм	Матеріал
Базове	продовгувате	b=5мм, l=32мм	1.0	Сталь DC01
Запропоноване рифлене		b=5мм, l=32мм		

* b – ширина, l – довжина

Джерело: розроблено авторами

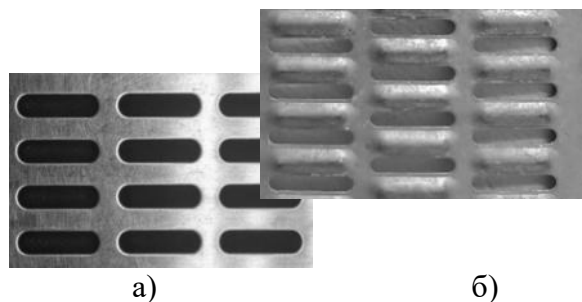


Рисунок 1 – Дослідні решета з продовгуватими отворами (а) та з продовгуватими отворами та рифлями (б)

Джерело: розроблено авторами

В якості сипкого матеріалу використано зернову суміш пшениці/кукурудзи. Сипкий матеріал має масу, яка утворює певний тиск на поверхню та є зовнішнім навантаженням. Питоме навантаження поряд з абразивними властивостями матеріалу призводять до зношення решета. Для визначення питомого навантаження (P_a) використали товщину шару та щільність матеріалу.

Визначення величини зношення решета. Зношення решета відбувається за його товщиною, яка в процесі експлуатації зменшується. Для ідентифікації величини зносу та коефіцієнтів зношування застосовано експериментальні дослідження. В процесі експлуатації решет через кожні 2000 годин за допомогою мікрометр Mitutoyo 389-351-30 Digital Micrometer Deep Throat 1 Inch Spc визначали зміну їх товщини від номінальної (табл.1). Даний мікрометр дозволяє проводити вимірювання товщини перфорованої поверхні на відстані 300 мм від краю. Після вимірювання товщини в 40 точках (по 10 точок з кожної сторони решета) проводили усереднення значень.

Знос решета за товщиною визначається через відповідний вираз [6, 13]:

$$\Delta h(t) = \frac{C p v t}{\sigma}, \quad (1)$$

де: Δh – зменшення товщини решета, м; C – коефіцієнт зношування, що враховує особливості конструкції решета та умови експлуатації; p – контактний тиск на перфоровану поверхню від сипкого матеріалу, Па; v – відносна швидкість руху сипкого матеріалу по решету, приймаємо $v=0.025$ м/с; t – час експлуатації, с; σ – граничне напруження матеріалу решета, приймаємо границю текучості для сталі $\sigma = 2,1 \times 10^8$ Па.

Чисельний розв'язок даного рівняння потребує розуміння всіх величин. Коефіцієнт зношування C комплексно враховує площу контакту між сипким матеріалом та поверхнею решета, його кут атаки, мікронерівності поверхні решета та його структурність [14]. Для ідентифікації даного коефіцієнта проведемо експериментальне визначення величини зносу решета за товщиною та інших складових рівняння (1).

Тоді, при відомих параметрах можна знайти коефіцієнт зношування:

$$C = \frac{\Delta h \sigma}{p v t}. \quad (2)$$

Оцінка ресурсу решета. Граничний ресурс експлуатації залежить від величини критичної товщини решета. Для врахування впливу конструктивних параметрів треба додати до розрахунку величину, яка буде комплексно враховувати рівень та особливості перфорації поверхні. Таким параметром ε може бути кількість суцільної (неперфорованої у вигляді перегородок) поверхні до так званого «живого» перетину решета:

$$\varepsilon = 1 - \frac{A_{\text{отв}}}{A_p}, \quad (3)$$

де $A_{\text{отв}}$ - площа отворів на решеті, A_p – площа решета.

Крім того треба ввести додатково коефіцієнт, який буде враховувати складність отворів та рифленість поверхні, яким може бути коефіцієнт складності конструкції β .

Тоді з урахуванням фундаментальних виразів [6, 15] та запропонованих положень граничний ресурс може бути розрахований за виразом:

$$t_e = \frac{\Delta h \sigma \varepsilon}{C \beta p v}. \quad (4)$$

Коефіцієнт β може бути визначений за виразом:

$$\beta = \delta_\phi + \delta_p + \delta_a, \quad (5)$$

де δ_ϕ – поправка, що враховує форму отвору; δ_p – поправка, що враховує рельєфність; δ_a – поправка, що враховує анізотропію стирання.

Також для оцінки надійності конструкції, яка підлягає зношенню, доцільно використовувати показник швидкості/інтенсивності [13, 14]:

$$v(t) = \frac{\Delta h}{t}. \quad (6)$$

Це відносний показник значно полегшує наліз надійності конструкції.

В результаті експериментів встановлені щільність та коефіцієнти тертя сипких матеріалів пшениці/кукурудзи, а також визначено питоме навантаження решета (табл.2).

Таблиця 2 – Властивості дослідних сипких матеріалів

Сипкий матеріал	Коефіцієнт тертя	Висота шару, мм	Щільність, кг/м ³	Розподілене навантаження, Па
пшениця	0,4	30	780	250
кукурудза	0,34		750	192

Джерело: розроблено авторами

Експериментальне вимірювання зношення решет протягом його експлуатації дозволило отримати відповідні дані щодо зміни товщини (табл.3).

Таблиця 3 – Експлуатаційне зменшення товщини решет (Δh , мкм)

Час експлуатації, годин	Базове решето		Запропоноване рифлене решето	
	Сипкий матеріал		Сипкий матеріал	
	пшениця	кукурудза	пшениця	кукурудза
0	0	0	0	0
2000	70	65	48	41
4000	140	130	114	104
6000	220	195	195	180
8000	320	295	275	245

Джерело: розроблено авторами

Експлуатація базових решет після 8000 годин призводила до появи перших деформацій у вигляді тріщин. З урахуванням отриманих даних (табл.2, 3) проведемо визначення коефіцієнту зношення для решет різних типів використавши рівняння (1). Результати представлені в табл.4.

Таблиця 4 – Значення коефіцієнту зношення C решет

Час експлуатації, годин	Базове решето		Запропоноване рифлене решето	
	Сипкий матеріал		Сипкий матеріал	
	пшениця	кукурудза	пшениця	кукурудза
8000	0,00037	0,00045	0,00032	0,00037

Джерело: розроблено авторами

Аналіз даних (табл.4) свідчить про відмінність значень коефіцієнту для базових та запропонованих решет. При числових обчисленнях за аналітичним виразом (1) відмінність значень зношення за товщиною решета не перевищує 3%. Отримана методика визначення коефіцієнта зношення може бути використана для аналізу впливу параметрів отворів та властивостей сипких матеріалів на надійність решета.

Для дослідних решет за виразом (3) також були встановлені рівні перфорації поверхні:

- $\varepsilon = 0,47$ – для базових решет,

- $\varepsilon = 0,73$ – для запропонованих рифлених решет.

Використавши ці данні, данні табл.2-4 за виразом (4) проведено визначення ресурсу решет різних типів до появи деформацій. Слід зауважити, що значення поправочного коефіцієнта впливає на величину ресурсу решета. Проведемо розрахунки для різних значень коефіцієнта $\beta=0,4-0,7$. Результати внесено до табл.5.

Таблиця 5 – Граничний ресурс (годин) решет різних типів

Поправочний коефіцієнт β	Базове решето		Запропоноване рифлене решето	
	Сипкий матеріал		Сипкий матеріал	
	пшениця	кукурудза	пшениця	кукурудза
0,4	9484,7	9361	14638	14685,9
0,5	7587,7	7488,8	11710,4	11748,8
0,6	6323,1	6240,7	9758,7	9790,7
0,7	5419,8	5349,2	8364,6	8391,9

Джерело: розроблено авторами

З урахуванням появи перших деформацій після 8000 годин експлуатації для базових решіт значення поправочного коефіцієнту знаходиться в діапазоні 0,4-0,5. Прийнявши подібний діапазон значень для рифленого решета прогнозований ресурс складе 11,7-14,6 тис.год, що більше на 50-54%. Проте такий підхід є орієнтовний, а для точності потрібно провести додаткові уточнюючі дослідження з ідентифікації значень даного коефіцієнта для решет з отворами складної геометрії або рифлених.

Також за виразом (6) визначено швидкість зношування решет при роботі з сипкими матеріалами пшениця/кукурудза (табл.6).

Таблиця 6 – Швидкість зношування решет (мкм/година)

Тип решета	Сипкий матеріал	
	пшениця	кукурудза
базове	0,04	0,037
запропоноване	0,034	0,03

Джерело: розроблено авторами

Встановлено, що швидкість зношення запропонованого рифленого решета нижча на 17,6-23% порівняно з базовою конструкцією.

Використання різних сипких матеріалів здатне змінювати показники ресурсу решета. Зношення за товщиною решета (табл.3) відбувалося інтенсивніше при пшениці, а величина зносу була більша на 7,6-8,4% при базових решетах та на 12,2-17,1% при запропонованих рифлених решетах. Це пояснюється відмінними властивостями сипких матеріалів.

Перспективами досліджень в даному напрямку є врахування ефектів втоми матеріалу з урахуванням особливості конструкції решет, термопружного навантаження, багат шарових покриттів та різних матеріалів. Збільшити точність розрахунків можливо за рахунок використання методів кінцево-елементного аналізу (FEM) та дискретно-елементного моделювання (DEM), які дозволять ідентифікувати локальні деформації, визначати концентратори напружень з високою точністю.

Висновки. В результаті досліджень розроблено методику щодо визначення показників надійності перфорованих просіювальних поверхонь.

Досліджено вплив конструктивних параметрів решет у вигляді базових продовгуватих форм отворів та наявності рифлів на показники ресурсу.

Встановлено, що наявність рифлів на решетах поліпшує ресурс на 50-54% порівняно з базовими решетами.

Зміна властивостей сипкого матеріалу також відзначається на показниках надійності решет. Маємо інтенсивний знос при використанні сипкого матеріалу пшениці по відношенню до матеріалу кукурудзи.

Встановлені значення ресурсу решет для сипкого матеріалу пшениці/кукурудзи склали ($\beta=0,45$): базового з продовгуватими отворами – 8536,2/8424,9 год., запропоноване рифлене – 13174,2/13217,4 год.

Отримана методика дозволяє прогнозувати довговічність решет на етапі їх проектування та експлуатаційної діагностики, що сприяє підвищенню ефективності сепарувального обладнання.

Список літератури

1. Ольшанський В. П. та ін. Теорія сепарування зерна : монографія. Харків : ХНТУСГ, 2017. 802 с.
2. Сало В. М. та ін. Розробка нової конструкції пневморешітної зерноочисної машини : монографія. Кіровоград : Лисенко В. Ф., 2014. 107 с.

3. Shchur T., Bredykhin V., Tikhonov S., Makarenko O., Mezentsev 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.
4. 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.
5. Морозовська З. А. Основні види пошкоджень деталей решітних зернодробарок. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. 2014. Вип. 196, ч. I. С. 283–286.
6. Федченко З. А. Обґрунтування параметрів сепаруючих решіт молоткових зернових дробарок : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Тернопіль : Терноп. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя, 2017. 182 с.
7. Подпратов Г. І. Технологія обробки, переробки зерна та виготовлення хлібопекарської продукції. Київ : НАУ, 2000. 126 с.
8. Дацишин О. В. та ін. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв. Вінниця : Нова Книга, 2009. 488 с.
9. Kharchenko S., Samborski S., Kloda L. et al. Combined method of identification of free oscillations of perforated rifflated plates. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. P. 23992. DOI: 10.1038/s41598-025-06614-5.
10. Kharchenko S., Samborski S., Kharchenko F., Pašnik J. Numerical study of the natural oscillations of perforated vibrating surfaces with holes of complex geometry. *Advances in Science and Technology Research Journal (ASTRJ)*. 2023. Vol. 17 (6). P. 73–87.
11. Kharchenko S. et al. Influence of physical and constructive parameters on durability of sieves of grain cleaning machines. *Advances in Science and Technology Research Journal (ASTRJ)*. 2022. Vol. 16. P. 156–165. DOI: 10.12913/22998624/156128.
12. Гарт Е. Л., Терьохін Б. І. Концентрація напружень в однорідній пластині з круговим отвором, підкріпленням включенням із функціонально-градієнтного матеріалу. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні (ITMM'2021)*. 2021. С. 110–115. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.0138.
13. Ventsel E., Krauthammer T. Thin Plates and Shells: Theory, Analysis, and Applications. New York : Marcel Dekker, 2001. 651 p.
14. Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. Theory of Plates and Shells. New York : McGraw-Hill Book Company, 1959. 591 p.
15. Канарчук В. Є. та ін. Надійність машин. К.: Либідь, 2003. 424 с.

References

1. Olshanskyi, V. P., et al. (2017). *Theory of grain separation: Monograph*. Kharkiv: KhNTU of Agriculture, 802 p. [in Ukrainian].
2. Salo, V. M., et al. (2014). *Development of a new design of a pneumatic-sieve grain cleaning machine: Monograph*. Kirovohrad: Lysenko V. F., 107 p. [in Ukrainian].
3. Shchur, T., Bredykhin, V., Tikhonov, S., Makarenko, O., Mezentsev, V., & Kruszelnicka, W. (2024). Evaluation of maize seed sieving performance using sieves with Cassini oval shape openings. *Journal of Agricultural Engineering*, 5(62), 666–673.
4. 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*, 2(7), 63–69. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65920>
5. Morozovska, Z. A. (2014). *Main types of damage of sieve-type grain crushers. Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: Engineering and Energy of Agro-Industrial Complex*, 196(I), 283–286 [in Ukrainian].
6. Fedchenko, Z. A. (2017). *Substantiation of parameters of separating sieves of hammer grain crushers* (Candidate's thesis). Ternopil: Ternopil National Technical University named after I. Puliui, 182 p. [in Ukrainian].
7. Podpryotov, H. I. (2000). *Technology of grain processing, reprocessing and bakery production*. Kyiv: NAU, 126 p. [in Ukrainian].
8. Datsyshyn, O. V., et al. (2009). *Technological equipment for grain processing and oil production*. Vinnytsia: Nova Knyha, 488 p. [in Ukrainian].
9. Kharchenko, S., Samborski, S., Kloda, L., et al. (2025). Combined method of identification of free oscillations of perforated rifflated plates. *Scientific Reports*, 15, 23992. doi.org/10.1038/s41598-025-06614-5
10. Kharchenko, S., Samborski, S., Kharchenko, F., & Pašnik, J. (2023). Numerical study of the natural oscillations of perforated vibrating surfaces with holes of complex geometry. *Advances in Science and Technology Research Journal (ASTRJ)*, 17(6), 73–87.

11. Kharchenko, S., et al. (2022). Influence of physical and constructive parameters on durability of sieves of grain cleaning machines. *Advances in Science and Technology Research Journal (ASTRJ)*, 16, 156–165. <https://doi.org/10.12913/22998624/156128>
12. Hart, E. L., & Terokhin, B. I. (2021). *Stress concentration in a homogeneous plate with a circular hole reinforced with a functionally graded material inclusion. Information Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering (ITMM'2021)*, 110–115. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.0138> [in Ukrainian].
13. Ventsel, E., & Krauthammer, T. (2001). *Thin plates and shells: Theory, analysis, and applications*. New York: Marcel Dekker.
14. Timoshenko, S., & Woinowsky-Krieger, S. (1959). *Theory of plates and shells*. New York: McGraw-Hill Book Company.
15. Kanarchuk, V. Ye., et al. (2003). *Reliability of machines*. Kyiv: Lybid, 424 p. [in Ukrainian].

Serhii Kharchenko¹, Assoc. Prof., DSc., **Oleksandra Bilovod**¹, Prof., PhD,
Farida Kharchenko², Assoc. Prof., PhD, **Andrii Stelmakh**², **Volodymyr Timanov**¹, **Anton Chyhrn**¹

¹*Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine*

²*Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine*

Methods for Determining the Reliability Indicators of Corrugated Perforated Sifting Surfaces

The primary objective of this study is to investigate and substantiate methods for analysing the reliability indicators of perforated sifting surfaces with different hole geometries applied in the separation of loose granular materials. Particular attention is given to the relationship between structural parameters of the sieve, the operating environment, and the mechanisms of wear that determine the service life of such components. The research is aimed at establishing analytical dependencies that link the geometry of perforated openings, material properties, and loading conditions with the degradation processes that occur during prolonged operation. In this context, the study addresses the fundamental engineering problem of extending the durability and operational stability of perforated sieves, which are widely employed in agricultural and industrial separation systems.

The work presents a systematic analysis of basic flat sieves with elongated holes and modified surfaces with elongated holes reinforced by volumetric riffles. For both configurations, the influence of geometric characteristics, loading regimes, and external operational conditions on the wear dynamics was examined. Generalised analytical expressions for determining sieve wear were derived, taking into account structural dimensions, material resistance, and stress distribution caused by distributed loads from granular flow. Experimental investigations were carried out for two representative types of loose materials, wheat and corn, in order to validate the theoretical findings. A comparative assessment of wear coefficients was performed, demonstrating clear differences in degradation behaviour between the analysed sieve designs. Furthermore, the introduction of volumetric riffles was shown to effectively reduce localised stress concentrations, delay the onset of crack propagation, and extend the residual life of the sieve. The proposed methodological approach also provides opportunities for engineering optimisation at the design stage as well as for diagnostic assessment of sieve condition during operation.

The conclusions highlight that the integration of volumetric riffles into the design of perforated sieves significantly enhances their wear resistance and prolongs operational reliability under varying technological conditions. The research outcomes confirm the effectiveness of the developed analytical expressions in predicting sieve degradation and allow engineers to perform comparative evaluations of durability for different structural modifications. The obtained dependencies for wear dynamics of sieves operating with wheat and corn illustrate the practical applicability of the method and demonstrate its potential for improving the performance of industrial and agricultural screening systems. Overall, the findings contribute to advancing the scientific basis for the rational design of perforated sifting surfaces and open up perspectives for further optimisation of their geometrical configurations in order to ensure increased efficiency, reduced maintenance costs, and improved sustainability of technological processes involving loose material separation.

sieve, stress concentration, resource, wear rate, reliability

Одержано (Received) 22.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 12.09.2025

Прийнято до друку (Approved) 19.09.2025