

І. М. Бажан*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: igor23_81@ukr.net*

Результати експериментального дослідження сепарації зерна на плоскому коливальному решеті із зигзаговидним розташуванням отворів

Метою досліджень є підвищення ефективності попереднього та первинного решітного очищення зернового вороху, що отримуються після збирання врожаю комбайнами. Досягнення поставленої мети дозволить отримати якісне зерно для забезпечення як продовольчих потреб, так і подальшого використання для отримання насіннєвого матеріалу.

У статті викладені результати факторного експерименту з визначення ефективності сепарації зерна на дослідному решеті із зигзаговидним розташуванням отворів. Реалізуючи гіпотезу про можливість інтенсифікації внутрішньосферових процесів у оброблюваному зерновому матеріалі шляхом зміщення осей коливання і отворів решета, нами було виготовлено оригінальні решітні поверхні з продовгуватими отворами, розташованими зигзаговидно. Складено методику проведення і реалізовано факторний експеримент у вигляді центрального композиційного плану із зірковими точками. Після ранжування, було обрано найбільш впливові фактори на процес – питома подача $q_b(x_1)$, частота коливань $n(x_2)$ і кут відхилення осей отворів від осі решета $\beta(x_3)$. В результаті проведення експерименту встановлено, що найбільший вплив на якісні показники процесу мають питома подача та кут відхилення осей отворів від осі решета. Доведено, що найвищі показники ефективності сепарації $Y \approx 80\%$ досягаються при наступних параметрах: питома подача $q_b = 800 \dots 1150$ кг/м-год, частота коливань $n = 400 \dots 500$ кол./хв, кут відхилення осей отворів від осі решета $\beta \approx 10^\circ$.

зерно, решето, отвори, сепарація, ефективність

Постановка проблеми. Ключовими критеріями оцінки ефективності роботи зерноочисних машин є параметри технологічної ефективності – продуктивність, яка впливає на швидкість здійснення операції та ефект очистки (повнота розділення), що характеризує якість її виконання. Крім того, важливим показником ефективності роботи решітних сепараторів, який вказує на ступінь їх досконалості є показник питомої продуктивності (питома подача) на одиницю ширини, або площі решітної поверхні. Збільшення питомої подачі дозволяє підвищити продуктивність машини без зростання її габаритів, маси тощо, тобто інтенсифікувати процес сепарації.

Інтенсифікація процесу сепарації зерна на плоских коливальних решетах відомих сепараторів [1-6] відбувається шляхом активізації внутрішньосферових процесів у оброблюваному зерновому матеріалі під час виконання технологічного процесу, що забезпечує переміщення частинок, які підлягають просіюванню, у вертикальному та горизонтальному напрямках для створення умов проходження через отвори.

Активізація внутрішньосферових процесів може реалізуватися різними способами: створенням найбільш прийняттого кінематичного режиму коливань; використанням додаткових пристроїв-інтенсифікаторів; створенням умов невірноваженості, або нестійкої рівноваги часток на поверхні між отворами решіт (на поздовжніх перетинках); використанням ефекту зміщення осей коливання і отворів решета.

Перші два способи не можна визнати беззаперечно результативним, адже

кінематичний режим забезпечує активізацію внутрішньосферних процесів головним чином у вертикальному напрямку, тоді як активізуючі пристрої – у горизонтальному, причому останні додатково ускладнюють та підвищують вартість конструкції зерноочисного обладнання.

Третій спосіб активізації внутрішньосферних процесів, який реалізується шляхом використання запропонованого нами технічного рішення є гіпотезою, яка потребує перевірки, а процес – всебічного вивчення і проведення досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вирішенню питання інтенсифікації процесу сепарації зерна на решетах присвячено роботи багатьох вчених [1-20]. При цьому, розмаїття способів активізації внутрішньосферних процесів вказує на актуальність і невирішеність даної проблеми.

На створення найбільш прийняттого кінематичного режиму коливань – вібрацій було спрямовано зусилля Київської і Харківської шкіл решітної сепарації зернових матеріалів [1-5]. Авторами робіт наголошується, що підвищення частоти і зменшення амплітуди коливань дозволяє отримати необхідну віброгустину оброблюваного матеріалу для суттєвої активізації внутрішньосферних процесів і досягти при цьому значного приросту питомої подачі без зниження якості очищення зерна.

Однак, при цьому створюється нова проблема – суттєве збільшення забивання отворів решіт, яке окрім зниження якості сепарації, призводить ще й до пошкодження, або травмування зерна, знижуючи його цінність як сировини і як потенційного посівного матеріалу. Про масштабність даної проблеми говорять проведені глибокі дослідження, наведені в багатьох роботах О.І. Завгороднього і, зокрема, у його дисертаційному дослідженні [6].

Іншим шляхом активізації внутрішньосферних процесів є встановлення на решета додаткових пристроїв-сегрегаторів [7-14] – гребінок, рамок тощо, які при взаємодії з зерновим шаром розпушують його і перемішують, дозволяючи проходовим часткам з верхніх шарів потрапляти до отворів.

Недоліком даного рішення є зменшення площі живого перерізу решета, ускладнення конструкції додатковими компонентами, а також збільшення неврівноваженої маси, яка коливається і, як наслідок, може призводити до розбалансування механізму приводу при певних подачах.

Крім того, наведені вище способи дозволяють активізувати внутрішньосферні процеси, гарантовано інтенсифікуючи їх лише у поздовжній площині. При цьому зміщення та перемішування часток у поперечній площині носить випадковий характер і не дозволяє розкрити потенціали даних способів у повній мірі.

Певний крок до активізації внутрішньосферних процесів зроблено дослідниками [15-20] шляхом створення умов неврівноваженості, або нестійкої рівноваги часток на поверхні між отворами решіт. Цього ефекту вдалося досягнути шляхом створення конструкцій профільованих, пруткових (стрижневих), або струнних решіт [15-20].

Внаслідок того, що частинки, які знаходяться над перетинками, перебувають у неврівноваженому, або у стані нестабільної рівноваги, активно переміщуються у поперечному напрямку і швидко досягають отворів решета. Коливальний рух останнього [15, 16] активізує внутрішньосферні процеси у поздовжній площині. У випадку ж використання пасивних решіт з активним ротором [17-20], поздовжня активація непотрібна, оскільки останній забезпечує одношаровий рух зернового матеріалу.

Характерними недоліками наведеного способу активації внутрішньосферних процесів є підвищене забивання отворів, хоча і в меншій мірі, ніж у розглянутих вище.

Цікавий спосіб інтенсифікації процесу сепарації запропоновано авторським колективом під керівництвом М.В. Бакума [21]. Сутність способу полягає у наданні решітному полотну поперечних коливань, поряд з класичними – поздовжніми. При певних співвідношеннях амплітуд і частот поздовжніх та поперечних коливань,

безперечно відбудеться активізація внутрішньосарових процесів у згаданих площинах, що дозволить підвищити показники технологічної ефективності.

Недоліком запропонованого способу, на нашу думку є очевидна складність приводу такого решітного стану і надійність роботи, особливо в складі пересувних зерноочисних машин.

Більш простий спосіб активізації внутрішньосарових процесів запропоновано колективом вчених під керівництвом С.О. Харченка [22, 23], у якому активізація внутрішньосарових процесів досягається специфічними виштамповками та вирізами-канавками, які починаються у площині отворів і спрямовані у бік поздовжніх перетинок. Завдяки їх наявності, частки, що знаходяться над поздовжніми перетинками потрапляють до канавок і спрямовуються до отворів.

Даний спосіб дозволяє мінімізувати зміни конструкцій решітних сепараторів і механізмів їх приводу, оскільки удосконалення, що дає ефект – це лише решітне полотно. Недоліками даної конструкції є відносна складність виготовлення решета, оскільки штампування малих за розмірами вирізів-канавок вимагає прецизійної точності обладнання. Крім того, відсутні дані щодо надійності і довговічності таких решіт.

На основі аналізу наведених наукових праць, на кафедрі сільськогосподарського машинобудування Центральноукраїнського національного технічного університету розроблено [24, 25] і виготовлено решітні полотна (рис.1), які мають просту конструкцію і дозволяють активізувати внутрішньосарові процеси у зерновому матеріалі.

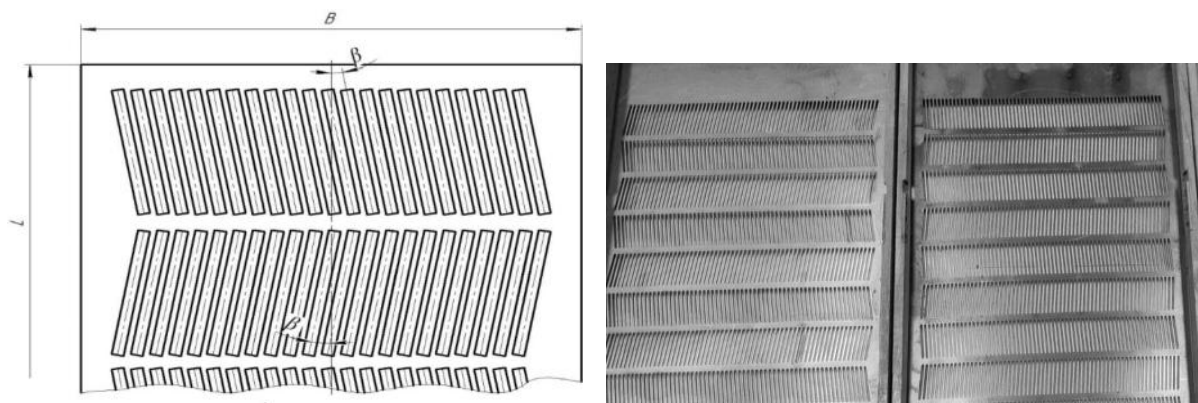


Рисунок 1 – Схема і загальний вигляд дослідних решітних полотен із зигзаговидними отворами
Джерело: розроблено із використанням [24, 25]

Характерною відмінністю оригінальних решіт від існуючих є відхилення осей отворів від осі решета, що дозволяє отримати певне поперечне відхилення від напрямку коливань. Використання таких отворів дозволяє всім часткам, що знаходяться в процесі обробки над поперечними перетинками потрапити до отворів, при цьому інтенсифікувати як поздовжнє, так і поперечне перемішування маси.

Дана конструкція є оригінальною, тому для підтвердження гіпотези про ефективність її роботи потребує проведення всебічного дослідження.

Постановка завдання. Основним завданням роботи є експериментальне виявлення залежності повноти розділення зернової маси на оригінальному решітному полотні коливального сепаратора від питомої подачі та основних конструктивних параметрів пристрою і підтвердження гіпотези про підвищення ефективності виділення домішок при зигзаговидному розташуванням отворів.

Виклад основного матеріалу. Удосконалення процесу сепарації зернових сумішей на плоских коливальних решетах ґрунтується на інтенсифікації внутрішньосарових процесів на етапі руху матеріалу по поверхні решета і розділення компонентів зерноsumіші на прохідну та непрохідну фракції. Основною задачею

експериментальних досліджень, що наведені в даній роботі є перевірка ефективності роботи плоских коливальних решіт із зигзагоподібним розташуванням отворів. Експериментальні дослідження по оцінці якості роботи плоских коливальних решіт проводилися із використанням лабораторного сепаратора Petkus Wutha K 294 A (рис. 2). Вибір зазначеного лабораторного сепаратора обумовлено тим, що саме він забезпечує можливість відтворення технологічних режимів, з якими працюють зерноочисні машини загального призначення в реальних умовах. Враховуючи те, що під час експериментів було заплановано оцінити вплив подачі, частоти коливань решета та кута відхилення осей отворів від осі решета, лабораторний сепаратор працював із одним встановленим решетом, розділяючи при цьому ворох на прохідну і непрохідну фракції.

Перед реалізацією експериментальних досліджень проводилася підготовка як експериментальної установки так і дослідних зразків. На початковому етапі робіт проведено калібрування сепаратора щодо продуктивності подачі зернового вороху на очищення, кута нахилу решітного стану, амплітуди та частоти коливання [25]. Для проведення досліджень використовували зерновий ворох озимої пшениці природної вологості врожаю 2025 року, який отримано після зернозбирального комбайна класичної схеми обмолоту. З метою виключення забивання отворів решіт та для підвищення однорідності і точності експериментів, з вороху попередньо видаляли частки, які застрягали в отворах при підготовці матеріалу до експериментальних досліджень. Це дозволило скоротити загальний час на проведення експериментів. Крім того, контролювали вміст прохідної фракції, що може досягати до 10% і є характерним для зернових матеріалів із якими працюють зерноочисні машини загального призначення.

Для вивчення впливу основних факторів на ефективність сепарації застосовувалась методика планування багатофакторного експерименту у вигляді центрального композиційного плану із зірковими точками [26], що було реалізовано в пакеті програм STATISTICA 12. Центральний композиційний план включає повний факторний експеримент, центральні точки та зіркові точки, що дозволяє дослідити нелінійні взаємодії між факторами. Повторюваність дослідів є трикратною, а для подальших розрахунків приймалося середнє значення, за умови якщо під час проведення досліджень різниця між результатами експериментів не перевищувала 10%. На основі аналізу теоретичних досліджень та попередніх експериментів обрано три фактори, рівні значимості яких представлені в таблиці 1. Серед найбільш впливових факторів виділено:

- питому подачу матеріалу q_b (x1), кг/(м·год), яка загалом визначає продуктивність сепаратора та характеризує інтенсивність навантаження на решітну поверхню;

- частоту коливань n (x2), кол/хв, що регулює вертикальну сегрегацію частинок і їх переміщення по решету;

- кут відхилення осей отворів від повздовжньої вісі решета β (x3), град – фактор, який визначає інтенсивність поперечного переміщення часток у площині решета.

В якості критерію оптимізації Y обрано повноту виділення домішок із зернового вороху, що в своїй сукупності і характеризує загальну якість процесу сепарації плоским решетом сепаратора. Відповідно до центрального композиційного плану проведено 16 експериментів, результати яких наведено в таблиці 2.

Після обробки експериментальних даних методами регресійного аналізу в програмі STATISTICA 12 отримано оцінки коефіцієнтів моделі та їх статистичну значущість у вигляді табличного результату (рис. 3), Парето-карту (рис. 4), графіки попарного впливу факторів на критерій оптимізації і лінії рівного виходу (рис. 5) та профілі бажаності факторів (рис. 6).

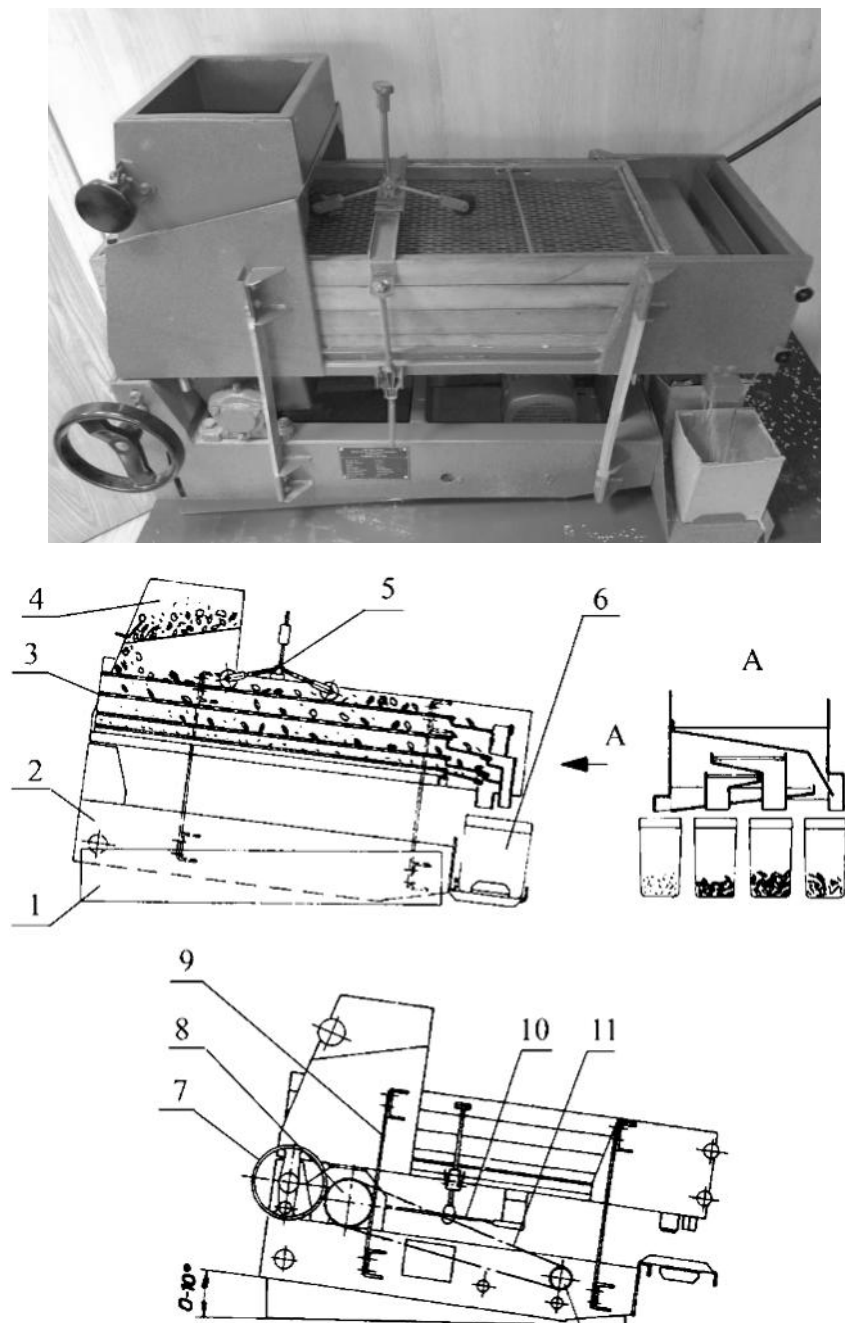


Рисунок 2 – Загальний вигляд та схема лабораторного сепаратора Petkus Wutha K 294 A:

- 1 – рама сепаратора; 2 – кузов; 3 – грохот; 4 – бункер-завантажувач;
- 5 – механічний струшувач-очисник решета; 6 – ємкості для розділених фракцій вороху;
- 7 – маховик регулювання кута нахилу кузова сепаратора; 8 – ексцентрик механізму приводу;
- 9 – підвіска грохота сепаратора; 10 – шатун; 11 – механізм приводу

Джерело: розроблено із використанням [1, 5, 26]

Таблиця 1 – Рівні варіювання факторів експериментальних досліджень

№ п.п.	Фактори		Рівні варіювання		Інтервал варіювання
	Найменування	Позначення	Нижній (-)	Верхній (+)	
1	Питоме подача q_b , кг/м·год.	x_1	800	1500	350
2	Частота коливань n , кол/хв	x_2	300	500	100
3	Кут відхилення осей отворів від осі решета β , град.	x_3	0	10	5

Джерело: розроблено автором

Аналіз наведених результатів (рис. 3, 4, 5, 6) дозволяє отримати статистичну модель яка у поліноміальному вигляді наступна:

$$Y = 60,525 - 7,054 \cdot x_1 + 3,824 \cdot x_2 + 5,596 \cdot x_3 + 0,824 \cdot x_1^2 + 1,363 \cdot x_2^2 + 2,97 \cdot x_3^2 - 0,417 \cdot x_1 x_2 + 1,95 \cdot x_1 x_3 - 0,595 \cdot x_2 x_3.$$

Таблиця 2 – Матриця та результати експериментальних досліджень

q_b , кг/м·год	n , кол/хв	β , град	Y , %
800	300	0	68,1
800	300	10	77,19
800	500	0	74,65
800	500	10	80,4
1500	300	0	51,97
1500	300	10	67,9
1500	500	0	55,89
1500	500	10	70,4
1150	400	5	64,2
600	400	5	70,1
1700	400	5	46,5
1150	200	5	52,1
1150	600	5	74,6
1150	400	0	51
1150	400	11	64
1150	400	5	64,2

Джерело: розроблено автором

Effect Estimates; Var.:Y; R-sqr=.81684; Adj.:.5421 (3-16-1.sta) 3 factors, 1 Blocks, 16 Runs; MS Residual=48,87478 DV: Y										
Factor	Effect	Std. Err.	t(6)	p	-95, % Cnf. Limit	+95, % Cnf. Limit	Coeff.	Std. Err. Coeff.	-95, % Cnf. Limit	+95, % Cnf. Limit
Mean/Interc.	60,5253	4,655869	12,99979	0,000013	49,1328	71,91784	60,52534	4,655869	49,1328	71,91784
(1) q_b , кг/м·год(L)	-14,1073	3,887101	-3,62926	0,010975	-23,6187	-4,59593	-7,05366	1,943550	-11,8094	-2,29796
q_b , кг/м·год(Q)	1,6471	4,860068	0,33889	0,746235	-10,2451	13,53921	0,82353	2,430034	-5,1226	6,76960
(2) n , кол/хв(L)	7,6475	3,495525	2,18780	0,071291	-0,9057	16,20074	3,82375	1,747762	-0,4529	8,10037
n , кол/хв(Q)	2,7270	3,191841	0,85435	0,425701	-5,0832	10,53711	1,36348	1,595921	-2,5416	5,26855
(3) β , град(L)	11,1912	4,238947	2,64008	0,038536	0,8188	21,56351	5,59559	2,119473	0,4094	10,78175
β , град(Q)	5,9418	6,837882	0,86896	0,418268	-10,7899	22,67353	2,97092	3,418941	-5,3949	11,33676
1L by 2L	-0,8350	4,943419	-0,16891	0,871417	-12,9311	11,26111	-0,41750	2,471709	-6,4656	5,63055
1L by 3L	3,9000	4,943419	0,78893	0,460182	-8,1961	15,99611	1,95000	2,471709	-4,0981	7,99805
2L by 3L	-1,1900	4,943419	-0,24072	0,817784	-13,2861	10,90611	-0,59500	2,471709	-6,6431	5,45305

Рисунок 3 – Табличний результат проведених експериментальних досліджень

Джерело: розроблено автором

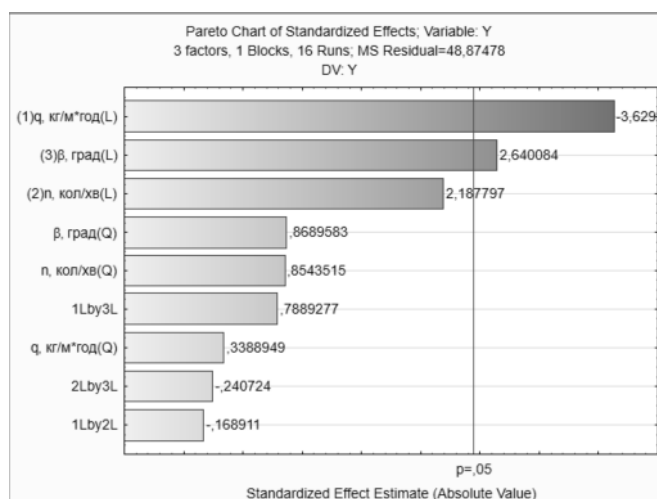
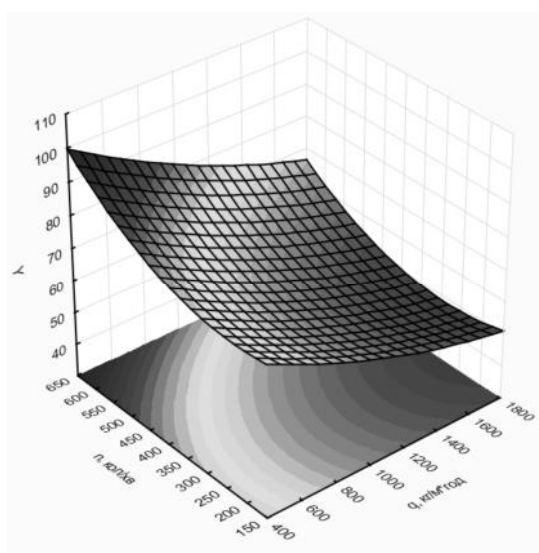
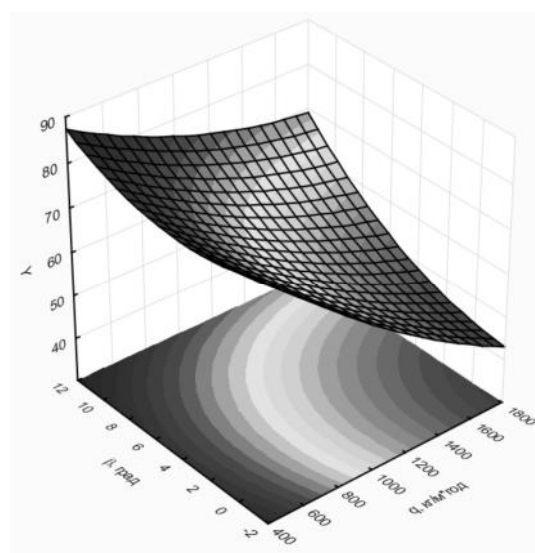


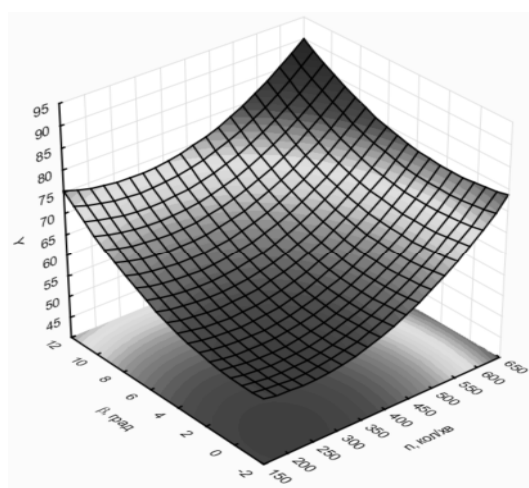
Рисунок 4 – Парето-карта (межа статистичного значення коефіцієнту математичного чекання)
Джерело: розроблено автором



а



б



в

Рисунок 5 – Графіки попарного впливу факторів на критерій оптимізації і лінії рівного виходу
Джерело: розроблено автором

В результаті проведення експерименту встановлено, що найбільший вплив на якісні показники процесу мають питома подача та кут відхилення осей отворів від осі решета (рис. 4, 6). Взаємодія між факторами не мала статистично значущого впливу, що підтверджує їхній домінуючий окремий ефект.

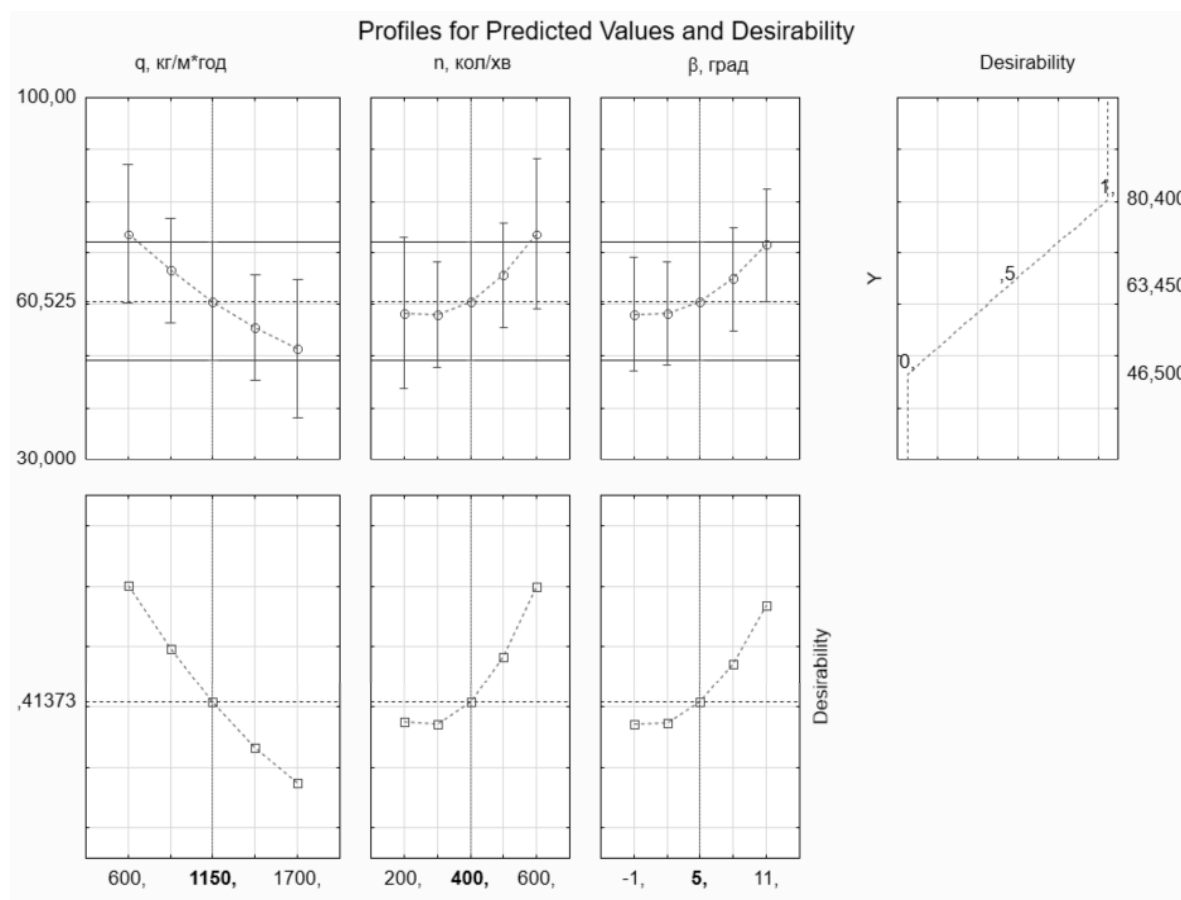


Рисунок 6 – Профілі бажаності факторів

Джерело: розроблено автором

Аналіз наведених результатів досліджень дозволяє відмітити: підвищення питомої подачі q_b призводить до зниження ефективності очищення Y , що є очікуваним результатом. Зі збільшенням подачі від 600 до 1700 кг/м³·год ефективність роботи решета знижувалася (рис. 5 а, б, 6). Це пояснюється перевантаженням робочої поверхні і зниженням селективності відбору зернової суміші. Найвищі значення Y (74...80%) досягаються при питомій подачі $q_b = 800...1150$ кг/м³·год, тоді як при $q_b = 1700$ кг/м³·год ефективність знижувалася до 46...52%.

Поряд з цим, підвищення частоти коливань n та кута відхилення осей отворів від осі решета β сприяють покращенню показника повноти виділення домішок. Зростання частоти від 200 до 600 кол/хв сприяє підвищенню ефективності (рис. 5 а, в). При цьому середні значення Y зростали від 52% (200 кол/хв) до 75% (500 кол/хв). Найбільш раціональним є діапазон 400...500 кол/хв, що забезпечує стабільно високі результати сепарації.

Зміна кута нахилу в діапазоні від 0° до 10° показала достатньо суттєвий вплив на критерій оптимізації (рис. 4). При $\beta \approx 10^\circ$ ефективність досягає максимальних значень (77...80%). При менших кутах (0...5°) ефективність була нижчою (64...70%).

Висновки. 1. З метою інтенсифікації роботи плоских коливальних решіт зерноочисних машин загального призначення найбільш доцільно забезпечити активізацію внутрішньосферних процесів компонентів зернової суміші, що розділяються, зокрема за рахунок виконання на робочій поверхні решіт продовговуватих отворів із зигзаговидним розташуванням.

2. Результати експериментальних досліджень підтверджують гіпотезу про ефективність використання зигзаговидного розташування отворів решета. При збільшенні кута відхилення від 0° до 10° повнота виділення домішок зростає в середньому на 8...16% залежно від інших умов експерименту.

3. Найвищі показники ефективності сепарації $Y \approx 80\%$ досягаються при наступних параметрах: питома подача $q_b = 800...1150$ кг/м·год, частота коливаний $n = 400...500$ кол./хв, кут відхилення осей отворів від осі решета $\beta \approx 10^\circ$.

Список літератури

1. Тищенко Л. М. Наукові основи процесів вібровідцентрового сепарування зернових сумішей : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Харків, 2004. 403 с.
2. Котов Б. І., Степаненко С. П., Пастушенко М. Г. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерноматеріалів. *Конструювання, виробництво та експлуатація с.-г. машин*. 2003. Вип. 33. С. 53–59.
3. Ольшанський В. П. Про рух неоднорідної дрібнозернистої суміші по плоскому віброрешету. *Інженерія переробних і харчових виробництв*. 2017. Т. 2, № 1. С. 17–22.
4. Bracasescu C., Gageanu I., Popescu S., Selvi K. C. Researches Concerning Impurities Separation Process from Mass of Cereal Seeds Using Vibrating Sieves in Air Flow Currents. *Engineering for Rural Development*. Jelgava, 2016. P. 364–370.
5. Богомоллов О. В. Аналіз конструкцій сепараторів для сепарації важкороздільних зернових сумішей. *Інженерія переробних і харчових виробництв*. 2017. № 1. С. 47–51.
6. Завгородній О. І. Наукові основи процесів очищення отворів решіт зерноочисних машин : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.11. Харків : Харк. держ. техн. ун-т с. г., 2001. 37 с.
7. Котов Б. І., Степаненко С. П., Калініченко Р. А. Теоретичне обґрунтування руху частинки зерна на вібропневморешеті при дії розпушувачих робочих органів. *Науковий вісник Національного аграрного університету*. 2007. Вип. 115. С. 112–117.
8. Степаненко С. П. Підвищення ефективності вібропневматичних сепараторів зерна : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Глеваха, 2008. 21 с.
9. Степаненко С. П. Аналіз взаємодії пасивного розпушувача із віброзрідженим зерновим шаром. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для с.-г. України: зб. наук. пр.* Дослідницьке, 2005. Вип. 8 (22), кн. 2. С. 290–297.
10. Степаненко С. П. Вплив параметрів пасивних розпушувачів на ефективність вібропневматичної сепарації зерна. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. 2006. Вип. 41. С. 153–160.
11. Stepanenko S. P., Kotov B. I. Theoretical Research of Separation Process Grain Mixtures. *Tekhnika Ta Energetika*. 2019. T. 10, № 4. P. 137–143.
12. Решето : пат. 82093 Україна : МПК B07B 1/00. № у 2012 14385 ; заявл. 17.12.2012 ; опубл. 25.07.2013, Бюл. № 14.
13. Решето з прямокутними отворами : пат. 55286 Україна : МПК B07B 1/00, A01B 76/00. № у 2010 06635 ; заявл. 31.05.2010 ; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23.
14. Тищенко Л. М., Ольшанський В. П., Харченко Ф. М., Харченко С. О. Моделювання динаміки зернової суміші при сепарації на рифленому решеті вібросепаратора. *Інженерія природокористування*. 2014. № 2 (2). С. 134–137.
15. Решето Фадєєва : пат. 37527 Україна : МПК B07B 1/46. № у 2008 09604 ; заявл. 22.07.2008 ; опубл. 25.11.2008, Бюл. № 22.
16. Васильковський О. М., Лещенко С. М., Мороз С. М., Нестеренко О. В. До створення концепції «ідеального» решета зернового сепаратора. *Конструювання, виробництво та експлуатація с.-г. машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 50. С. 52–58.
17. Васильковський О. М. Розробка конструкції та обґрунтування параметрів відцентрового решітного сепаратора зерна : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Кіровоград, 2001. 18 с.

18. Васильковський О. М., Мачок Ю. В. Аналіз способів інтенсифікації процесу сепарації зернових матеріалів на решетах. *Крамаровські читання: матеріали V Міжнар. наук.-техн. конф.* Київ : НУБіП України, 2018. С. 127–129.
19. Лузан П. Г., Васильковський О. М. Нові конструкції решіткових сепараторів. *Конструювання, виробництво та експлуатація с.-г. машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 1999. Вип. 27. С. 123–127.
20. Мороз С. М., Васильковський М. І., Васильковський О. М. Обґрунтування діаметрів стержнів пруткового решета. *Збірник наук. пр. КНТУ. Техніка в с.-г. виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* 2004. Вип. 14. С. 72–78.
21. Спосіб інтенсифікації сепарації насінневих сумішей на решетах з прямокутними отворами : пат. 84498 Україна : МПК B07B 1/00. № u 2013 04561 ; заявл. 11.04.2013 ; опубл. 25.10.2013, Бюл. № 20.
22. Спосіб інтенсифікації сепарації насінневих сумішей на плоских решетах : пат. 50874 Україна : МПК B07B 1/00. № u 2009 13683 ; заявл. 28.12.2009 ; опубл. 25.06.2010, Бюл. № 12.
23. Спосіб інтенсифікації сепарації насінневих сумішей на штампованих решетах : пат. 58042 Україна : МПК B07B 1/28. № u 2010 11203 ; заявл. 20.09.2010 ; опубл. 25.03.2011, Бюл. № 16.
24. Плоске решето : пат. 154304 Україна : МПК 01F12/00, B07B13/02. № u 2023 02258 ; заявл. 12.05.2023 ; опубл. 01.11.2023, Бюл. № 44.
25. 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 с.-г. машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2024. Вип. 54. С. 192–202.
26. Підручник дослідника : навч. посіб. для студентів агротехнічних спеціальностей / О. Васильковський, С. Лещенко, К. Васильковська, Д. Петренко. Харків : Мачулін, 2016. 204 с.

References

1. Tishchenko, L. M. (2004). *Scientific foundations of vibrocentrifugal separation processes of grain mixtures* (Candidate's thesis). Kharkiv [in Ukrainian].
2. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P., & Pastushenko, M. H. (2003). *Trends in the development of designs of machines and equipment for cleaning and sorting grain materials. Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, (33), 53–59 [in Ukrainian].
3. Olshanskyi, V. P. (2017). *On the movement of a heterogeneous fine-grained mixture on a flat vibrating sieve. Engineering of Processing and Food Productions*, 2(1), 17–22 [in Ukrainian].
4. Bracacescu, C., Gageanu, I., Popescu, S., & Selvi, K. C. (2016). Researches concerning impurities separation process from mass of cereal seeds using vibrating sieves in air flow currents. *Engineering for Rural Development*, Jelgava, 364–370.
5. Bohomolov, O. V. (2017). *Analysis of separator designs for separation of hard-to-separate grain mixtures. Engineering of Processing and Food Productions*, (1), 47–51 [in Ukrainian].
6. Zavhorodnii, O. I. (2001). *Scientific foundations of processes of cleaning sieve openings of grain cleaning machines* (Doctoral thesis). Kharkiv: Kharkiv State Technical University of Agriculture [in Ukrainian].
7. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P., & Kalinichenko, R. A. (2007). *Theoretical substantiation of grain particle movement on a vibropneumosieve under the action of loosening working bodies. Scientific Bulletin of the National Agrarian University*, (115), 112–117 [in Ukrainian].
8. Stepanenko, S. P. (2008). *Improving the efficiency of vibropneumatic grain separators* (Extended abstract of candidate's thesis). Hlevakha [in Ukrainian].
9. Stepanenko, S. P. (2005). *Analysis of the interaction of a passive loosener with a vibrofluidized grain layer. In Technical and technological aspects of development and testing of new equipment and technologies for agriculture of Ukraine* (Vol. 8/22, Book 2, pp. 290–297). Doslidnytske [in Ukrainian].
10. Stepanenko, S. P. (2006). *Influence of passive loosener parameters on the efficiency of vibropneumatic grain separation. Proceedings of Tavria State Agrotechnical Academy*, (41), 153–160 [in Ukrainian].
11. Stepanenko, S. P., & Kotov, B. I. (2019). Theoretical research of separation process grain mixtures. *Tekhnika Ta Energetika*, 10(4), 137–143.
12. *Resheto* [Sieve]: Patent 82093 Ukraine: IPC B07B 1/00. No. u 2012 14385; filed 17.12.2012; published 25.07.2013, Bulletin No. 14 [in Ukrainian].
13. *Resheto with rectangular holes*: Patent 55286 Ukraine: IPC B07B 1/00, A01B 76/00. No. u 2010 06635; filed 31.05.2010; published 10.12.2010, Bulletin No. 23 [in Ukrainian].
14. Tishchenko, L. M., Olshanskyi, V. P., Kharchenko, F. M., & Kharchenko, S. O. (2014). *Modeling the dynamics of grain mixture during separation on a corrugated sieve of a vibroseparator. Environmental Engineering*, 2(2), 134–137 [in Ukrainian].
15. *Fadeev's sieve*: Patent 37527 Ukraine: IPC B07B 1/46. No. u 2008 09604; filed 22.07.2008; published 25.11.2008, Bulletin No. 22 [in Ukrainian].

16. Vasylovskiy, O. M., Leshchenko, S. M., Moroz, S. M., & Nesterenko, O. V. (2020). *Towards the creation of the concept of an "ideal" sieve of a grain separator. Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, (50), 52–58 [in Ukrainian].
17. Vasylovskiy, O. M. (2001). *Development of design and substantiation of parameters of a centrifugal grain sieve separator* (Extended abstract of candidate's thesis). Kirovohrad [in Ukrainian].
18. Vasylovskiy, O. M., & Machok, Yu. V. (2018). *Analysis of methods for intensifying the separation process of grain materials on sieves*. In *Proceedings of the 5th International Scientific and Technical Conference "Kramarov Readings"* (pp. 127–129). Kyiv: NUBiP of Ukraine [in Ukrainian].
19. Luzan, P. H., & Vasylovskiy, O. M. (1999). *New designs of sieve separators. Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, (27), 123–127 [in Ukrainian].
20. Moroz, S. M., Vasylovskiy, M. I., & Vasylovskiy, O. M. (2004). *Substantiation of rod diameters of a bar sieve. Collection of Scientific Papers of KNTU. Engineering in Agricultural Production, Mechanical Engineering, Automation*, (14), 72–78 [in Ukrainian].
21. *Method of intensifying the separation of seed mixtures on sieves with rectangular holes*: Patent 84498 Ukraine: IPC B07B 1/00. No. u 2013 04561; filed 11.04.2013; published 25.10.2013, Bulletin No. 20 [in Ukrainian].
22. *Method of intensifying the separation of seed mixtures on flat sieves*: Patent 50874 Ukraine: IPC B07B 1/00. No. u 2009 13683; filed 28.12.2009; published 25.06.2010, Bulletin No. 12 [in Ukrainian].
23. *Method of intensifying the separation of seed mixtures on stamped sieves*: Patent 58042 Ukraine: IPC B07B 1/28. No. u 2010 11203; filed 20.09.2010; published 25.03.2011, Bulletin No. 16 [in Ukrainian].
24. *Flat sieve*: Patent 154304 Ukraine: IPC 01F12/00, B07B13/02. No. u 2023 02258; filed 12.05.2023; published 01.11.2023, Bulletin No. 44 [in Ukrainian].
25. Bazhan, I. M., Vasylovskiy, O. M., Leshchenko, S. M., & Amosov, V. V. (2024). *Intensification of the grain separation process on a flat oscillating sieve with zigzag hole arrangement. Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, (54), 192–202 [in Ukrainian].
26. Vasylovskiy, O., Leshchenko, S., Vasylovskaya, K., & Petrenko, D. (2016). *Researcher's textbook: Manual for students of agrotechnical specialties*. Kharkiv: Machulin [in Ukrainian].

Ihor Bazhan

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Results of the Experimental Study on Grain Separation Using a Flat Oscillating Sieve with Zigzag-Shaped Hole Arrangement

The aim of the research is to increase the efficiency of preliminary and primary screening of grain heaps obtained after harvesting by combines. Achieving this goal will allow obtaining high-quality grain to meet both food needs and further use for obtaining seed material.

The study presents the results of experimental research based on multifactor planning methodology in the form of a central composite design with star points, implemented in the STATISTICA 12 software package. Experimental tests were carried out on the Petkus Wutha K 294 A laboratory separator, which enabled simulation of operational conditions typical for industrial grain cleaning machines. The effects of specific feed rate (q_b), oscillation frequency (n), and the angle of deviation of hole axes from the sieve axis (β) on separation efficiency were examined. It was found that the most influential factors are feed rate and the deviation angle. Increasing β from 0° to 10° resulted in an average efficiency growth of 8...16%. The best separation results ($Y \approx 80\%$) were achieved at $q_b = 800...1150 \text{ kg/m}\cdot\text{h}$, $n = 400...500 \text{ oscillations/min}$, and $\beta \approx 10^\circ$. The experiments confirmed the hypothesis that the original sieve design with zigzag-arranged oblong holes activates intralayer processes in both longitudinal and transverse directions, leading to process intensification and improved cleaning performance.

The conclusions emphasize that intensification of intralayer processes on flat oscillating sieves is the key factor in improving separation efficiency. The zigzag arrangement of holes ensures a more uniform distribution of the grain layer, enhances impurity removal conditions, and reduces surface overloading. The experimental results are of practical importance for the improvement of grain cleaning machine designs and can be applied in the development of new sieve separators. The proposed technical solution combines simplicity of implementation with high efficiency, confirming its feasibility for industrial application.

grain, sieve, holes, separation, efficiency

Одержано (Received) 27.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 29.08.2025

Прийнято до друку (Approved) 19.09.2025