

УДК 631.362.3

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ РОБОТИ ІНЕРЦІЙНОЇ ПНЕВМАТИЧНОЇ ЗЕРНООЧИСНОЇ МАШИНИ

Петренко Д.І., к.т.н., доц.,  
Васильковський О.М., к.т.н., доц.,  
Лещенко С.М., к.т.н., доц.,  
Нестеренко О.В., ас.  
*Кіровоградський національний технічний університет*  
м. Кіровоград, Україна  
Тел. +380663460725  
e-mail petrenko.dimitriy@gmail.com

**Анотація.** Визначено, що для інтенсифікації пневмосепаруючих пристроїв виникає необхідність створення умови для більш ефективної взаємодії повітря з зерновим матеріалом. Цієї мети можна досягти як за рахунок раціонального способу введення матеріалу до пневмосепаруючих каналів, так і за рахунок вирівнювання повітряного потоку по перерізу каналу. Застосування ж багатофункціональних робочих органів, які здатні виконувати кілька операцій одночасно дає змогу значно знизити габаритні параметри сепаратора, його масу та енергоємність технологічного процесу. Виходячи з наведеного вище, запропоновано нову схему інерційної пневматичної зерноочисної машини (ПЗМ) з однократним очищенням зернової маси повітряним потоком. За результатами проведених досліджень обґрунтовано конструктивне рішення, параметри та режими роботи запропонованого інерційного повітряно-решітного сепаратора.

**Ключові слова:** очищення зерна, інерційна пневматична зерноочисна машина, лопатевий ротор.

**Постановка проблеми.** Останнім часом все більшого значення в собівартості виробництва сільськогосподарських культур відіграє підготовка якісного посівного матеріалу. Однією з найбільш трудомістких і вартісних операцій при цьому є очищення зерна від домішок та доведення його до базисних кондицій [1].

Очищення зернових сумішей здійснюється головним чином з застосуванням, переважно, плоскорешітних зерноочисних машин, які характеризуються низькими показниками питомої продуктивності сепарації, оскільки розділення зернового матеріалу здійснюється на решетах під дією гравітаційних сил. Крім того ці машини є достатньо великогабаритними і мають високу вартість, що робить їх практично недоступними для малих фермерських господарств [2, 3].

Аналіз апріорної інформації вказує на те, що розділення зернових сумішей в інерційному силовому полі дозволяє суттєво підвищити питому продуктивність решітних сепараторів [3, 4]. В ході вивчення питання підвищення питомої продуктивності сепарації існуючими технічними засобами встановлено, що їх більшість не відповідає умовам простоти конструкції і надійності роботи. Для усунення цих недоліків і вирішення задачі по створенню вітчизняних зерноочисних машин на базі високоефективних решітних сепараторів, необхідно продовжувати їх дослідження і вдосконалення.

**Аналіз останніх досліджень.** До сепараторів, які характеризуються використанням разом з гравітаційними, інерційних сил для інтенсифікації процесу сепарації, відносяться

---

\* Публікується по рекомендації: д.т.н., проф. Михайлова Є.В.

віброцентрифуги з вертикальною або похилою віссю обертання та швидкохідні циліндричні решета, що мають вертикальну, горизонтальну або похилу вісь обертання, оснащені активними чи пасивними пристроями для підвищення ефективності сепарації [3, 4]. Вони мають пристрої для очищення робочих отворів від забивання. Особливістю роботи вказаних машин являється те, що технологічний процес протікає на їх робочих органах при значеннях показника кінематичного режиму:  $k \gg 1$ . Швидкохідні циліндричні решітні сепаратори з внутрішніми пристроями дозволяють збільшити питому продуктивність сепарації за рахунок зменшення протяжності фази відносного спокою шару зерна на поверхні та збільшення сили його тиску на решето.

Машини даного типу, в яких використовуються відцентрові сили інерції, мають показники питомої продуктивності в кілька раз вищі ніж гравітаційні, при аналогічних показниках повноти виділення. Однак інтенсифікація процесу призвела також і до негативних наслідків. Одним з основних негативних явищ, що стримує широке застосування вказаних робочих органів є травмування зерна зерноприймальниками, очищувачами робочих отворів, власне циліндром, що обертається та ін. Крім цього недоліку, притаманного всім сепараторам, є недолік характерний тільки для віброцентрифуг – наявність вібраційного руху у частин, що мають значну масу, в результаті якого виникають неврівноважені сили інерції, які передаються на корпус і слугують джерелами додаткових напружень у вузлах машини.

Практично безмежні можливості інтенсифікації процесу сепарації мають робочі органи наступного покоління [5 - 8]. До них відносяться центрифуги з конічним ротором, лопатеві та конічно-лопатеві центрифуги. Вони забезпечують великі значення питомої продуктивності при задовільній якості обробки. Однак складність конструкцій та травмування зерна об перетинки (на пробивних решетах) або об стінки приймальних пристроїв при сході з решета, стримують їх широке застосування.

Авторами [5-7, 9] було сформульовано основні вимоги до ефективного сепаратора – можливості надання продукту необмеженої швидкості пересування по решету, підвищення ймовірності попадання прохідних часток в отвори розділюючої поверхні, ефективного вирішення проблеми забивання робочих отворів решета, використання всіх складових силового поля, в якому знаходяться частинки продукту, та ін.

*Основна частина.* З метою підвищення ефективності функціонування і усунення недоліків відомих на сьогоднішній день конструкцій зерноочисних машин на кафедрі сільськогосподарського машинобудування Кіровоградського національного технічного університету запропоновано нову схему інерційної пневматичної зерноочисної машини з однократним очищенням зерна повітряним потоком [10].

Зерноочисна машина (рис. 1) складається з бункера 1, регулятора подачі 2, колосового решета 3, повітряного каналу 4, кожухів 5 та 8, лопатевого ротора 6, підсівного решета 7 та відвантажувального рукава 9.

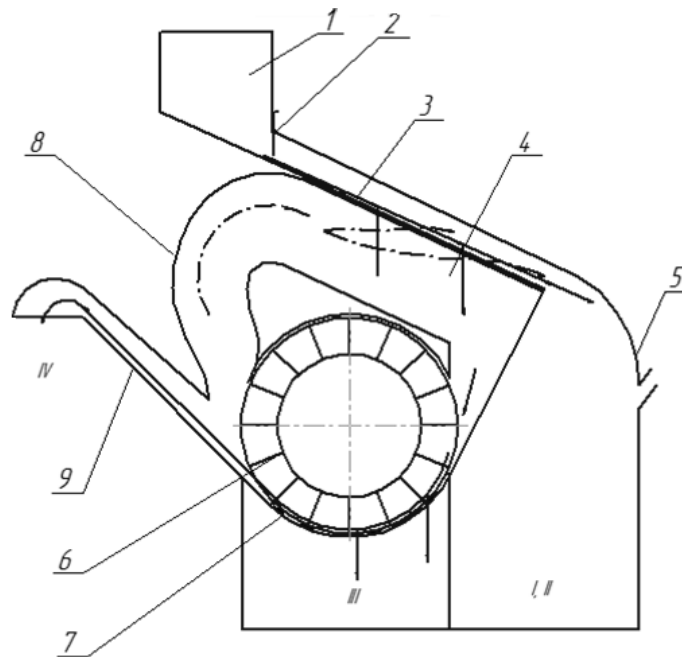


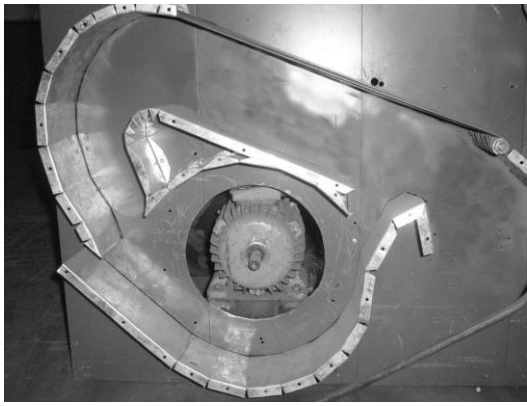
Рисунок 1 – Принципова схема інерційної пневматичної ЗОМ.

1- бункер; 2- регулятор подачі; 3- колосове решето; 4- повітряний канал; 5, 8- кожухи; 6- лопатевий ротор; 7- підсівне решето; 9- відвантажувальний рукав; I, II- крупні та легкі домішки; III- дрібні домішки; IV- очищене зерно.

Технологічний процес роботи запропонованої машини полягає в наступному: при відкритті регулятора подачі, зерновий ворох переміщується до колосового решета, рухаючись по якому піддається дії повітряного потоку, що створюється лопатевим ротором. При цьому крупні домішки, що не просіваються крізь колосове решето сходять з нього і з'єднуються з легкими домішками, які видуваються повітрям. Зерно основної культури разом з дрібними домішками просіявшись крізь колосове решето спрямовуються до лопатевого ротора, який захоплює порцію зернового вороху і прискорює її. Під час руху матеріалу по решету частинки, що мають розміри менші ніж робочі канали просіваються і потрапляють до приймальника дрібної фракції. Очищена від дрібних домішок маса йде сходом з решета і виводиться з сепаратора через рукав без застосування додаткових пристроїв. Окремі елементи зерноочисної машини – лопатевий ротор, колосове решето вже пройшли експериментальну перевірку в різних конструктивних рішеннях і ефективність їх роботи фактично підтверджена.

Таким чином, основною задачею, що постає в даній роботі – поєднання у єдине вказаних основних елементів і узгодження показників їх технологічної ефективності для отримання максимального технологічного, експлуатаційного та економічного ефектів. Для проведення експериментальних досліджень було розроблено та виготовлено експериментальну установку (рис.2).

Регулювання, які передбачені в експериментальній установці. Подача зернового матеріалу регулюється дозуючим пристроєм, який розміщений у вихідного вікна бункера. Швидкість повітря в повітряному каналі змінюється залежно від обертів лопатевого ротора.



а)



б)

Рисунок 2 – Фото експериментальної установки (а) та лопатевого ротора і підсівного решета (б).

Максимальну ефективність процесу очистки зернового матеріалу можна досягти при раціональних співвідношеннях конструктивних параметрів розробленого сепаратора між собою, чого неможливо досягти при окремому вивченні їх впливу. З метою встановлення їх взаємного впливу застосовували методику математичного планування експерименту, задачею якої є одержання статистичної математичної моделі об'єкту досліджень у вигляді рівняння регресії.

Попередні пошукові експериментальні дослідження дозволили визначити фактори, що мають значний вплив на процес сепарації: середня швидкість повітряного потоку  $U$ , питома зернове навантаження на одиницю довжини каналу  $q_B$ , швидкість введення зернового матеріалу  $V_0$ , частота обертання лопатевого ротора  $n$ . Зазначимо, що оскільки повітряний потік створюється багатофункціональним робочим органом – лопатевим ротором, фактори «швидкість повітряного потоку» та «частота обертання ротора» є взаємозалежними. Тому, з огляду на технологічні особливості роботи сепаратора, за фактор впливу вибираємо тільки частоту обертання лопатевого ротору  $n$ . Параметричні обмеження, які являють собою рівні варіювання факторів наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Рівні варіювання факторів

№ п.п.	Фактори		Рівні варіювання		Інтервал варіювання
	Найменування	Позначення	Верхній (+)	Нижній (-)	
1	Питома зернове навантаження $q_B$ , кг/дм·год.	$x_1$	1800	600	600
2	Початкова швидкість введення зернового матеріалу $V_0$ , м/с	$x_2$	0,9	0,3	0,3
3	Частота обертання лопатевого ротора $n$ , об/хв.	$x_3$	1200	800	200

Критеріями оптимізації для процесу очистки є: ефект очистки  $\eta$ , % ( $Y_1 = \eta$ ) та чіткість сепарації  $z$ , % ( $Y_2 = z$ ).

Метою серії дослідів була реалізація матриці центрального композиційного плану  $2^3$ +зіркові точки, результатом яких було встановлення впливу параметрів ( $q$ ,  $V_0$ ,  $n$ ) на очищення зерна запропонованим сепаратором (табл. 2).

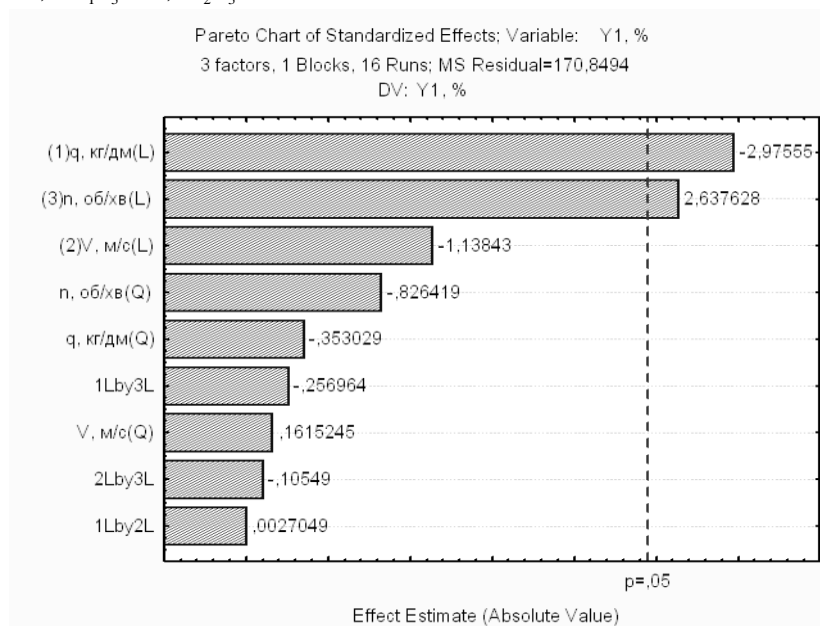
Таблиця 2 – Результати реалізації матриці планування експерименту  $2^3$  + зіркові точки

Номер досліджу	$q$ , кг/дм·год	$V_0$ , м/с	$n$ , об/хв	$\eta$ , %	$z$ , %
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$Y_1$	$Y_2$
1	3	4	5	6	7
1	600	0,3	800	67,5	7,8
2	600	0,3	1200	79,4	11,5
3	600	0,9	800	61	6,6
4	600	0,9	1200	70,8	10
5	1800	0,3	800	58	8,5
6	1800	0,3	1200	65	14
7	1800	0,9	800	51,4	6,8
8	1800	0,9	1200	56,6	9
9	190,924	0,6	1000	86,5	5,2
10	2209,076	0,6	1000	29,4	11
11	1200	0,095462	1000	71,6	8
12	1200	1,104538	1000	56,8	6,4
13	1200	0,6	663,641	24,4	1,2
14	1200	0,6	1336,359	80	18,8
15	1200	0,6	1000	65	6,5
16	1200	0,6	1000	67,5	7,2

Для обробки експериментальних даних застосовували пакет прикладних програм STATISTICA 10.0 [11], в результаті чого проведено побудову статистичних математичних моделей для ефекту очистки  $\eta$  ( $Y_1$ ) та чіткості сепарації  $z$  ( $Y_2$ ) при кодованих значеннях фактора.

$$Y_1 = \eta = 65,662 - 21,049x_1 - 8,053x_2 + 18,658x_3 - 3,032x_1^2 + 1,387x_2^2 - 7,098x_3^2 + 0,025x_1x_2 - 2,375x_1x_3 - 0,975x_2x_3$$

$$Y_2 = z = 6,778 + 1,78x_1 - 1,771x_2 + 6,502x_3 + 1,231x_1^2 + 0,595x_2^2 + 2,575x_3^2 - x_1x_2 + 0,15x_1x_3 - 0,9x_2x_3$$

Рисунок 3 – Стандартизована Парето-карта для ефекту очистки  $Y_1(\eta)$

Провівши аналіз Парето-карти для ефекту очистки  $\eta$  (рис.1) можна зробити висновок, що параметри  $x_1$ ,  $x_3$  мають найбільш значний вплив на критерій оптимізації  $Y_1(\eta)$ . Аналіз графіків поверхонь та ліній рівного виходу для ефекту очистки  $\eta$  (рис. 4) дозволяє відмітити, що необхідний ефект очистки досягається при наступних значеннях чинників:  $x_1 \rightarrow q = 1000 \dots 1200$  кг/дм·год;  $x_2 \rightarrow V_0 = 0,2 \dots 0,5$  м/с;  $x_3 \rightarrow n = 1200 \dots 1400$  об/хв.

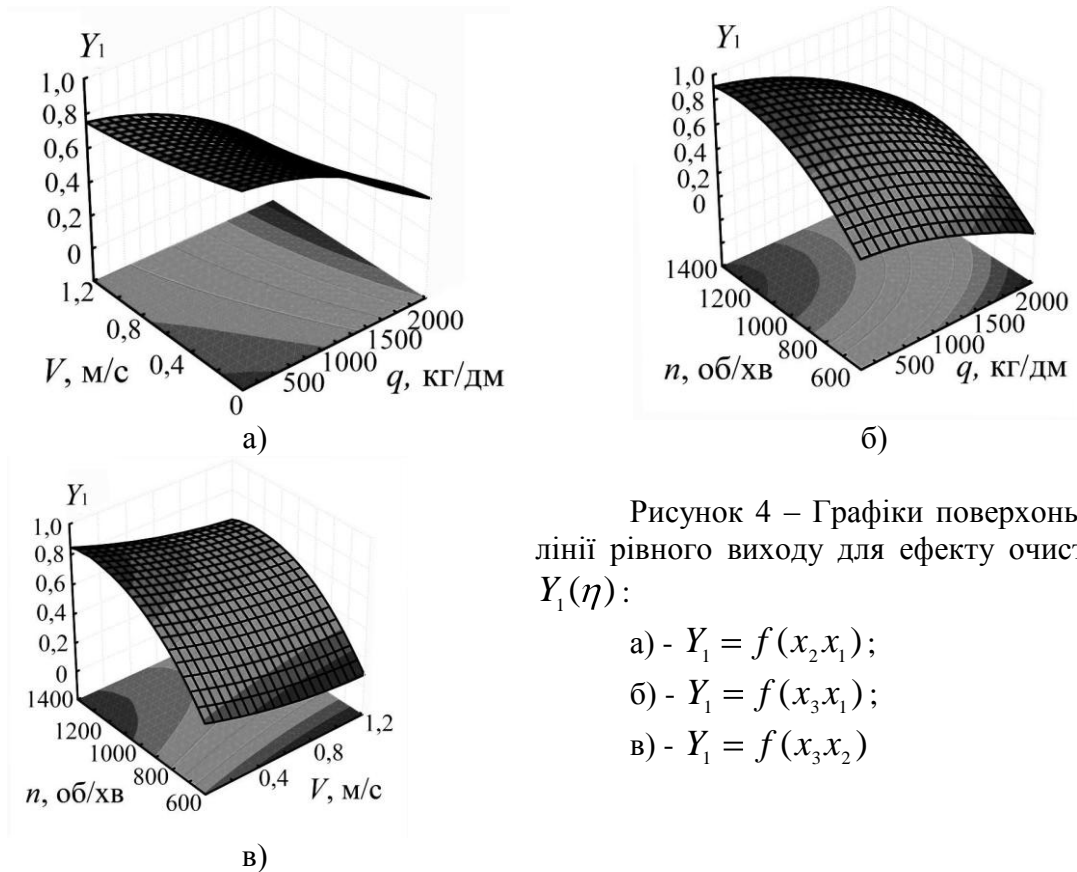


Рисунок 4 – Графіки поверхонь та ліній рівного виходу для ефекту очистки  $Y_1(\eta)$ :

а) -  $Y_1 = f(x_2, x_1)$ ;

б) -  $Y_1 = f(x_3, x_1)$ ;

в) -  $Y_1 = f(x_3, x_2)$

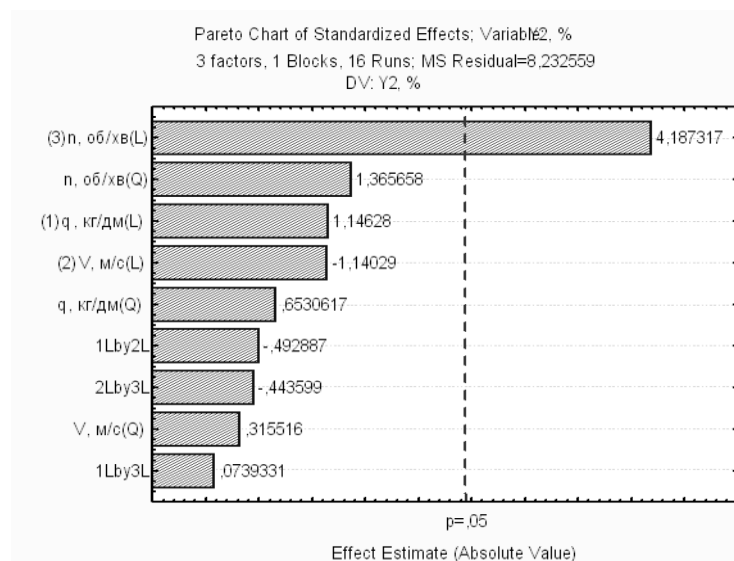


Рисунок 5 – Стандартизована Парето-карта для чіткості сепарації  $z$

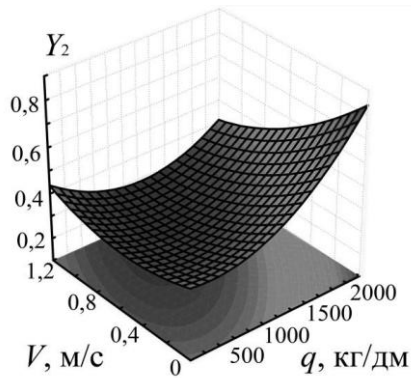
Проаналізувавши Парето-карту для чіткості сепарації (рис 5), відмічаємо максимальний вплив на критерій оптимізації  $Y_2$  параметру  $x_3$ , який напряму пов'язаний

зі швидкістю повітряного потоку. Аналіз графіків поверхонь та ліній рівного виходу для чіткості сепарації (рис. 6) дозволяє відмітити, що найменші втрати повноцінного зерна досягається при наступних значеннях чинників:

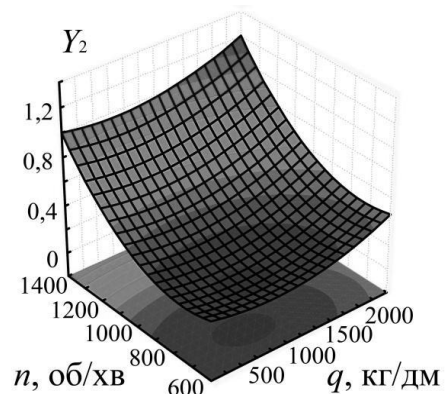
$$x_1 \rightarrow q = 500 \dots 800 \text{ кг/дм}\cdot\text{год};$$

$$x_2 \rightarrow V_0 = 0,8 \dots 1,2 \text{ м/с};$$

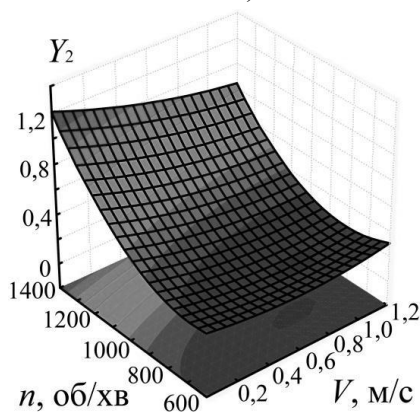
$$x_3 \rightarrow n = 600 \dots 800 \text{ об/хв}$$



а)



б)



в)

Рисунок 6 – Графіки поверхонь та ліній рівного виходу для чіткості сепарації  $Y_2(z)$  :

$$а) - Y_2 = f(x_2, x_1);$$

$$б) - Y_2 = f(x_3, x_1);$$

$$в) - Y_2 = f(x_3, x_2).$$

Враховуючи обернено-пропорційний зв'язок критеріїв оптимізації  $Y_1(\eta)$  та  $Y_2(z)$  досягнення їх максимальних значень одночасно неможливе, що показує різниця в раціональних значеннях насамперед параметру  $x_3(n)$ , тому приймають необхідне значення цього параметру виходячи з кінцевого результату процесу очищення, а саме який ефект очистки необхідно досягти і скільки повноцінного зерна може бути у відходах в залежності від того проводиться попереднє, первинне чи вторинне очищення.

*Висновки.* Аналіз результатів досліджень роботи запропонованої інерційної пневматичної ЗОМ дозволяє зробити наступні висновки:

– чим менше значення параметру  $x_1(q)$  тим вищі значення критеріїв оптимізації можна отримати, але цей параметр має прямий зв'язок з продуктивністю машини, раціональні значення  $q = 900 - 1100$  кг/дм·год;

– параметр  $x_2(V_0)$  теж має прямий зв'язок з продуктивністю машини і виходячи з сумісного аналізу критеріїв оптимізації  $Y_1(\eta)$  та  $Y_2(z)$  лежить в межах  $V_0 = 0,3 - 0,5$  м/с;

– на ефект очистки та чіткість сепарації впливає і частота обертання лопатевого ротора  $x_3(n)$ , раціональні значення якої  $n = 900 - 1200$  об/хв.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Педак І.С. Якість продукції – найважливіший фактор конкуренції / І.С. Педак, Т.Ю. Краснокутська // Держава та регіони. – 2005. – № 4. – С. 195-198.
2. Нестеренко О.В. Перспективний напрямок інтенсифікації повітряної сепарації зерна / О.В. Нестеренко, О.М. Васильковський, С.М. Лещенко, Д.І. Петренко, Д.В. Богатирьов // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Вип.25. Ч.1 – Кіровоград: КНТУ, 2012 – С. 49-53.
3. Ямпілов С. С. Технологии и технические средства для очистки зерна с использованием сил гравитации / С. С. Ямпілов, Ж. Б. Цыбенков. – Улан-Удэ : Изд-во ВСГТУ, 2006. – 167 с.
4. Тищенко Л. Н. Тенденции совершенствования вибропневматических центрифуг для разделения зерновых смесей / Л. Н. Тищенко, В. В. Бредихин // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Кіровоград. – 2001. – Вип. 31. – С. 92–96.
5. Лещенко С.М. Обґрунтування алгоритму функціонування інерційно-прямоточних зерноочисних машин / С.М. Лещенко, О.М. Васильковський, М.І. Васильковський, Д.І. Петренко // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Вип.24. Ч.1 – Кіровоград: КНТУ, 2011 – С. 176-181.
6. Лузан П.Г. Нові конструкції решіткових сепараторів / П. Г. Лузан, О. М. Васильковський // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – 1999. – Вип. 27. – С. 123–127.
7. Лещенко С.М. Обґрунтування параметрів пневмосепаруючої системи інерційного прямоточного сепаратора зерна : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.11 «Машини та засоби механізації сільськогосподарського виробництва» / С. М. Лещенко. – Кіровоград, 2010. – 21 с.
8. Котов Б.І. Інтенсифікація вібропневматичного розділення зернових матеріалів на решетах / Б. І. Котов, С. П. Степаненко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Кіровоград. – 2005. – Вип. 35. – С. 209–214.
9. Васильковський О.М. Підвищення ефективності повітряного очищення зерна / О. М. Васильковський, Д. І. Петренко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник КНТУ. – Кіровоград. – 2005. – Вип. 35. – С. 286–288.
10. Пат. 74642 Україна, МПК: В02С 23/00. Інерційний повітряно-решітний сепаратор / Петренко Д.І., Васильковський О.М., Васильковський М.І., Лещенко С.М., Непик О.В.; заявник та патентовласник Кіровоградський національний технічний університет. – №u201203308; заявл. 20.03.12; опубл. 12.11.12, Бюл. №21.
11. Боровиков В.П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA / В.П. Боровиков. – М.: Горячая линия - Телеком, 2013. – 288 с.

## BIBLIOGRAPHY

1. Pedak I.S. Production quality – the most important factor in competition / I.S. Pedak, T.Yu. Krasnokutska // Derzhava ta rehiony. – 2005. – No 4. – S. 195-198.
2. Nesterenko O.V. Perspective direction in air grain separation intensification / O.V. Nesterenko, O.M. Vasylykovskiy, S.M. Leshchenko, D.I. Petrenko, D.V. Bohatyrov // Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia. Vyp.25. Ch.1 – Kirovohrad: KNTU, 2012 – S. 49-53.



3. Yampylov S. S. Technologies and technical means for grain cleaning using gravitation forces / S. S. Yampylov, Zh. B. Tsybenov. – Ulan-Ude : Yzd-vo VSHTU, 2006. – 167 s.
4. Tyshchenko L.N. Tendencies for improving vibropneumatic centrifuges for grain mixtures separation / L. N. Tyshchenko, V. V. Bredykhyn // *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn : Zahalnodержavnyi mizhvidomchyi naukovotekhnichniy zbirnyk*. – Kirovohrad. – 2001. – Vyp. 31. – S. 92–96.
5. Leshchenko S.M. The algorithm substantiation for inertial uniflow grain cleaning machines functioning / S.M. Leshchenko, O.M. Vasytkovskiy, M.I. Vasytkovskiy, D.I. Petrenko // *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia*. Vyp.24. Ch.1 – Kirovohrad: KNTU, 2011 – S. 176-181.
6. Luzan P.G. new constructions of grid separators / P. G. Luzan, O. M. Vasytkovskiy // *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn : Zahalnodержavnyi mizhvidomchyi naukovotekhnichniy zbirnyk*. – 1999. – Vyp. 27. – S. 123–127.
7. Leshchenko S.M. Parameters substantiation for inertial uniflow grain cleaning separator: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk : spets. 05.05.11 «Mashyny ta zasoby mekhanizatsii silskohospodarskoho vyrobnytstva» / S. M. Leshchenko. – Kirovohrad, 2010. – 21 s.
8. Kotov B.I. Vibropneumatic grain materials separation on sieves intensifying / B. I. Kotov, S. P. Stepanenko // *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn : Zahalnodержavnyi mizhvidomchyi naukovotekhnichniy zbirnyk*. – Kirovohrad. – 2005. – Vyp. 35. – S. 209–214.
9. Vasytkovskiy O.M. Increasing the efficiency of grain air cleaning / O. M. Vasytkovskiy, D. I. Petrenko // *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn : Zahalnodержavnyi mizhvidomchyi naukovotekhnichniy zbirnyk KNTU*. – Kirovohrad. – 2005. – Vyp. 35. – S. 286–288.
10. Pat. 74642 Ukraina, MPK: B02C 23/00. Intensive air- sieve separator / Petrenko D.I., Vasytkovskiy O.M., Vasytkovskiy M.I., Leshchenko S.M., Nepyk O.V.; zaiavnyk ta patentovlasnyk Kirovohradskiy natsionalnyi tekhnichniy universytet. – #u201203308; zaiavl. 20.03.12; opubl. 12.11.12, Biul. No 21.
11. Borovykov V.P. Popular introduction into modern data analysis in STATISTICA / V.P. Borovykov. – M.: Horiachaia lynyia - Telekom, 2013. – 288 s.

## RESEARCHING THE QUALITY OF INERTIAL PNEUMATIC GRAIN CLEANING MACHINE OPERATION

Petrenko D.I., Vasilkovskiy O.M., Leshchenko S.M., Nesterenko A.V.

### *Summary*

It was determined that for the intensification of pneumo-separation devices to create conditions for more effective interaction of air from the grain material, which can be achieved both by rational method of input material in pneumo-separation channel, and by smoothing the flow of air through the channel cross section. The use of multi-working, able to perform multiple operations simultaneously will significantly reduce the dimensions of the separator, mass and energy of the process. Based on the above the new scheme inertial pneumatic grain cleaning machines with single grain cleaning air stream has been proposed. According to the results of the research it was substantiated the design parameters and operating modes of the proposed air-sieve inertial separator.

**Key words:** grain cleaning, inertial pneumatic grain cleaning machine, blade rotor.