

УДК 631.362

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2019.49.67-74>

**О.М. Васильковський**, доц., канд. техн. наук, **С.М. Лещенко**, доц., канд. техн. наук, **С.М. Мороз**, доц., канд. техн. наук, **Д.І. Петренко**, доц., канд. техн. наук  
*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*  
*e-mail: olexa74@ukr.net*

## Експериментальні дослідження енергоємності роботи відцентрового прямооточного сепаратора зерна

У статті наведено результати експериментальних досліджень енергоємності роботи оригінального відцентрового прямооточного повітряно-решітного очисника зернового вороху, в основу якого покладено багатофункціональний робочий орган – лопатевий ротор. У попередніх дослідженнях нами встановлені основні закономірності зміни енергетики даного сепаратора при роботі в режимі холостого ходу. Проведена нова серія експериментальних досліджень дозволила отримати залежності повної потужності на привід лопатевого ротора та потужності, що витрачається на розгін і переміщення зерна по решету від основних конструктивних та технологічних параметрів відцентрового прямооточного сепаратора зерна.

**зерно, енергоємність, потужність, відцентровий прямооточний сепаратор, лопатевий ротор, показник кінематичного режиму, продуктивність, подача**

**А.М. Васильковский**, доц., канд. техн. наук, **С.Н. Лещенко**, доц., канд. техн. наук, **С.Н. Мороз**, доц., канд. техн. наук, **Д.И. Петренко**, доц., канд. техн. наук  
*Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Україна*

## Экспериментальные исследования энергоёмкости работы центробежного прямооточного сепаратора зерна

В статье приведены результаты экспериментальных исследований энергоёмкости работы оригинального центробежного прямооточного воздушно-решетного очистителя зернового вороха, в основу которого положен многофункциональный рабочий орган - лопастной ротор. В предыдущих исследованиях нами установлены основные закономерности изменения энергетики данного сепаратора при работе в режиме холостого хода. Проведенная новая серия экспериментальных исследований позволила получить зависимости полной мощности на привод лопастного ротора и мощности, расходуемой на разгон и перемещения зерна по решету от основных конструктивных и технологических параметров центробежного прямооточного сепаратора зерна.

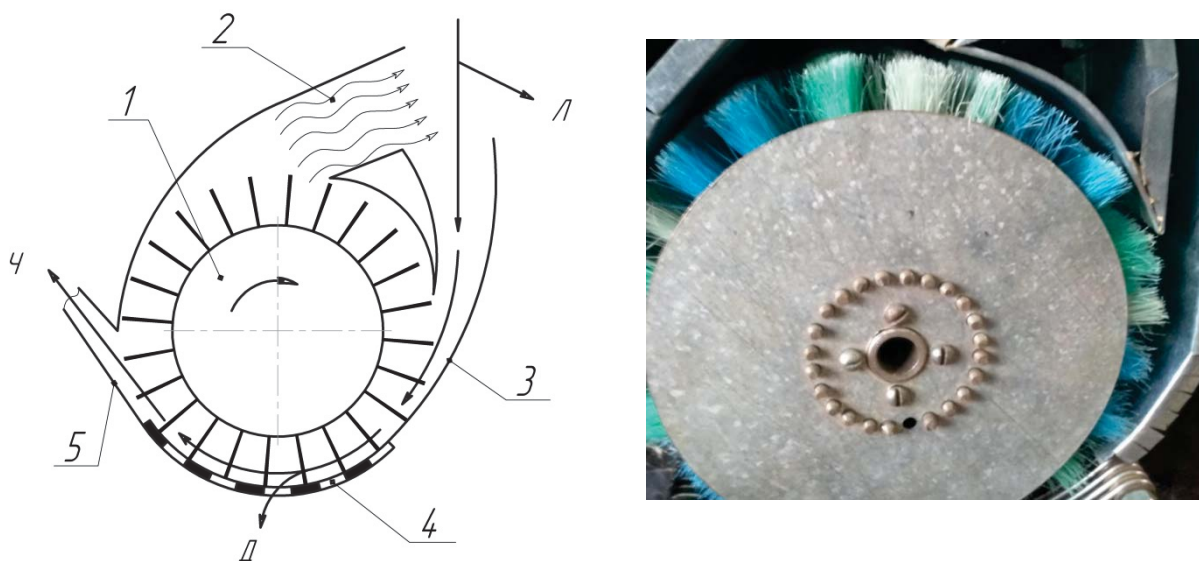
**зерно, энергоёмкость, мощность, центробежный прямооточный сепаратор, лопастной ротор, производительность, подача**

**Постановка проблеми.** Під час створення, удосконалення та проведення досліджень сільськогосподарських машин основна увага багатьох авторів приділяється встановленню і обґрунтуванню показників технологічної ефективності – продуктивності, якості тощо, які дійсно є первинними з позиції привабливості для потенційних покупців. При цьому такі показники як витрати потужності або питома енергоємність процесу часто залишаються поза увагою науковців.

Енергетичні характеристики – важлива складова експлуатаційної ефективності роботи сільськогосподарської техніки, зокрема, зерноочисних машин, яка впливає на собівартість готової продукції, а значить, і на її конкурентоздатність. Тому створення нових, або суттєве удосконалення відомих конструкцій кожного разу потребує проведення додаткових досліджень з метою отримання об'єктивних даних про енергетику для чіткого розуміння фізики процесів, що протікають на робочих органах і обґрунтування раціональних значень конструктивних та технологічних параметрів зерноочисних машин.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Створенню нових конструкцій, вдосконаленню та всебічному дослідженню робочих органів зернових сепараторів присвячено наукові роботи багатьох вітчизняних і закордонних вчених [1-9], при цьому основну увагу сконцентровано на забезпеченні високих показників технологічної ефективності. У деяких випадках це пояснюється достатнім ступенем вивченості основних енергетичних показників роботи зерноочисних машин [10-12], у інших – практично «нульовою» енергетикою процесу на робочих органах гравітаційних безприводних машин [13].

Працівниками кафедри сільськогосподарського машинобудування ЦНТУ розроблено і виготовлено конструкцію інерційного прямоточного сепаратора (рис.1), що забезпечує повітряне і решітне очищення зернових сумішей [14-16].



1- лопатевий ротор; 2- повітряний канал; 3- напрямник; 4- дуговидне підсівне решето;  
5- інерційний вивантажувач очищеного зерна; Л- легкі домішки; Д- дрібні домішки; Ч- очищене зерно  
Рисунок 1 – Схема і загальний вигляд дослідного пневморешітного сепаратора зерноочисної машини  
Джерело: розроблено авторами

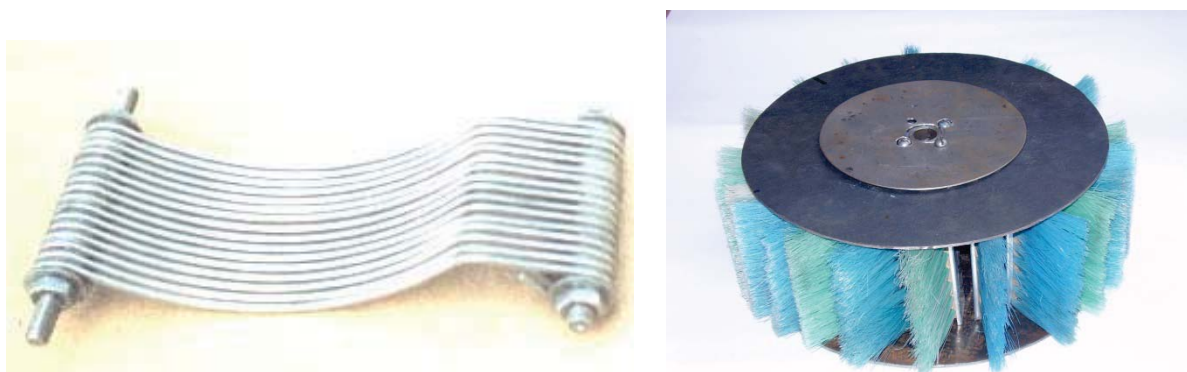


Рисунок 2 – Загальний вигляд дуговидного підсівного решета і лопатевого ротора дослідного пневморешітного сепаратора зерноочисної машини  
Джерело: розроблено авторами

Робота дослідного сепаратора здійснюється наступним чином. При обертанні ротора, завдяки наявності лопаток, створюється потужний повітряний потік, який використовується для видалення легких домішок на виході з каналу 2 ще під час подачі зернового вороху. Очищена від легких домішок маса спрямовується по напрямнику 3 до дуговидного підсівного решета 4, в процесі чого захоплюється лопатками ротора 1 і розганяється, розтягуючись в шар товщиною в «одне зерно». Виділення дрібних домішок на решеті відбувається під дією відцентрової сили при сприянні сили тяжіння часток. Очищене зерно виводиться з машини завдяки наявності значної початкової швидкості при сходженні з решета і потрібного кута встановлення вивантажувача 5. Очищення отворів решета від забивання здійснюється тими ж щітковими лопатками ротора

В результаті проведення патентного пошуку, аналогів її не виявлено ні в Україні, ні в світі. Під час проведення експериментальних досліджень нами були встановлені основні показники енергоємності роботи даного сепаратора в режимі холостого ходу (без подачі зернового вороху) [17].

**Постановка завдання.** З урахуванням викладеного вище, актуальною задачею на сьогодні є визначення загальної потужності на привід сепаратора, потужності, що витрачається безпосередньо на переміщення зерна по решету, а також встановлення їх залежностей від основних конструктивних параметрів лопатевого ротора та продуктивності машини.

**Виклад основного матеріалу.** Вирішення поставленого завдання здійснювали на лабораторному стенді, який повністю відтворює експериментальний сепаратор. Лопатевий ротор приводиться в дію від електродвигуна, посередництвом клинопасових передач і варіатора, яким встановлювали потрібну частоту його обертання. Вимірювання потужності на привід лопатевого ротора здійснювали вимірювали приладом К 50.

Серед найбільш впливових факторів на енергоємність процесу нами встановлено два:

- продуктивність сепаратора (подача зернового вороху) – основний технологічний показник;
- показник кінематичного режиму – комплексна конструктивна характеристика, яка одночасно враховує два параметри – радіус і кутову швидкість ротора:

$$K = \frac{\omega^2 R}{g},$$

де  $\omega$  – кутова швидкість лопатевого ротора, рад/с;

$R$  – радіус ротора, м;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

У дослідях використовували один і той же ворох пшениці масою 10кг. Засміченість дрібними домішками становила 5%. Вологість маси – 13,6%. Продуктивність (подачу) регулювали відповідним відкриттям заслінки на бункері з контролем секундоміром.

Діапазон варіювання продуктивності –  $q = 0,2 \dots 1,25$  кг/с., що відповідає питомим навантаженням на решето  $q_b = 2 \dots 12,5$  кг/м с і  $q_F = 10 \dots 62,5$  кг/м<sup>2</sup> с. Кількість рівнів варіювання (точок) – 7 ( $q = 0,2; 0,23; 0,28; 0,43; 0,58; 0,83; 1,25$  кг/с.).

Показник кінематичного режиму варіювали в діапазоні  $K 113 \dots 314$ . Для досягнення вказаних значень встановлювали кутову швидкість  $\omega$  ротора на чотирьох

рівнях – 94 рад/с, 115 рад/с, 136 рад/с та 157 рад/с при постійному радіусі ротора  $R = 0,125$  м. Всі досліді проводилися на роторі з кількістю щіткових лопаток – 24.

Обробка отриманих результатів експериментальних досліджень здійснювалась за загальноприйнятою методикою [18].

На рис. 3 наведено залежності витрат повної потужності на привід лопатевого ротора від подачі для чотирьох значень показника кінематичного режиму роботи .

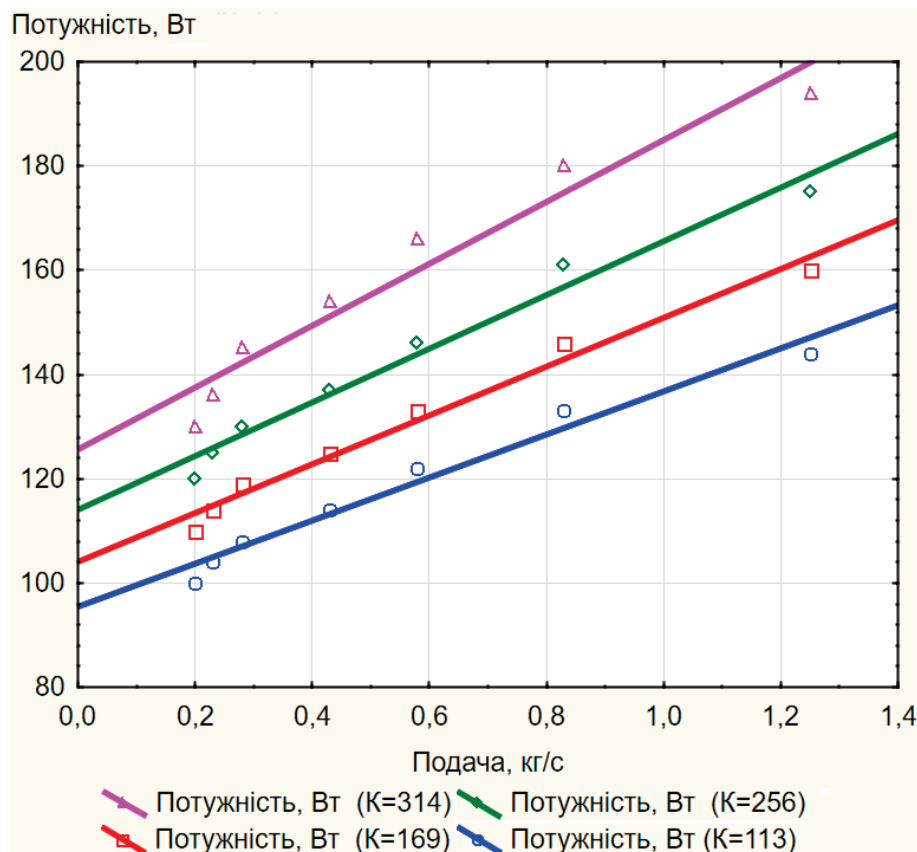


Рисунок 3 – Залежності витрат повної потужності на привід лопатевого ротора від подачі для різних значень показника кінематичного режиму

Джерело: розроблено авторами

Отримані дослідні дані достатньо адекватно можна описати лінійними поліномами

При апроксимації дослідних даних (рис. 3) з лінійним наближенням, емпіричні рівняння регресії матимуть вигляд:

- для кутової швидкості ротора  $\omega = 94$  рад/с (показник кінематичного режиму  $K=113$ ):

$$N_{\text{зар}}^{113} = 95,4 + 41,4 \cdot q ;$$

- для кутової швидкості ротора  $\omega = 115$  рад/с (показник кінематичного режиму  $K=113$ ):

$$N_{\text{зар}}^{169} = 104,2 + 46,8 \cdot q ;$$

- для кутової швидкості ротора  $\omega = 136$  рад/с (показник кінематичного режиму  $K=256$ ):

$$N_{\text{зар}}^{256} = 114,0 + 51,7 \cdot q;$$

- для кутової швидкості ротора  $\omega = 157$  рад/с (показник кінематичного режиму  $K=314$ ):

$$N_{\text{зар}}^{314} = 125,6 + 59,5 \cdot q;$$

Для встановлення потужності, що витрачається безпосередньо на переміщення зерна відніmemo від відповідних значень повної (рис. 3), значення потужностей холостого ходу, визначені нами раніше [17]. Отримані залежності наведено на рис. 4

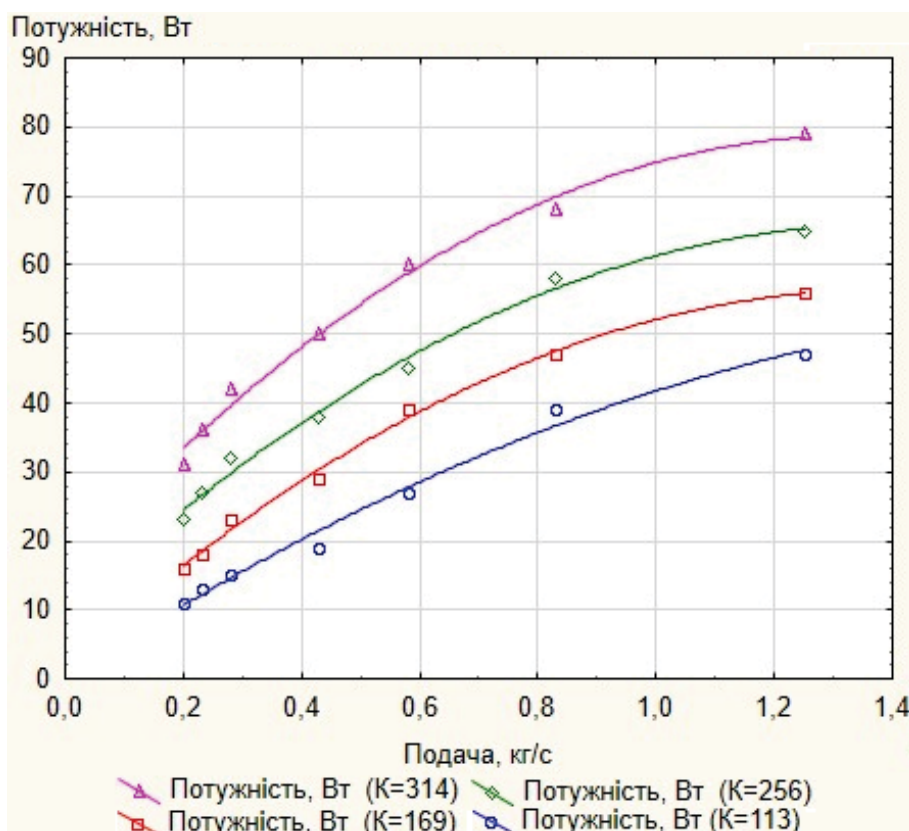


Рисунок 4 – Залежності витрат потужності на переміщення зерна по дугоподібному решету відцентрового прямоточного сепаратора зерна від подачі для різних значень показника кінематичного режиму

Джерело: розроблено авторами

Отримані залежності свідчать про нелінійний характер зміни потужності на переміщення при зростанні продуктивності. Емпіричні поліноми мають вигляд:

- для кутової швидкості ротора  $\omega = 94$  рад/с ( $K = 113$ ):

$$N_{\text{н}}^{113} = 56,4 \cdot q - 14,6 \cdot q^2;$$

- для кутової швидкості ротора  $\omega = 115$  рад/с ( $K=169$ ):

$$N_{\Pi}^{169} = 1,9 + 78,3 \cdot q - 28,0 \cdot q^2 ;$$

- для кутової швидкості ротора  $\omega = 136$  рад/с ( $K=256$ ):

$$N_{\Pi}^{256} = 9,4 + 80,8 \cdot q - 28,9 \cdot q^2 ;$$

- для кутової швидкості ротора  $\omega = 157$  рад/с ( $K=314$ ):

$$N_{\Pi}^{314} = 15,9 + 94,5 \cdot q - 35,6 \cdot q^2 .$$

Зменшення приросту потужності при пропорційному збільшенні подачі може свідчити про суттєве збільшення товщини шару зерна (понад 1 шар) на решеті і наявності внутрішньосарових відносних переміщень часток, коли задіяні коефіцієнти внутрішнього тертя, які мають менші значення ніж зовнішні. Перевірку висловленої гіпотези щодо наявності внутрішньосарових відносних переміщень часток можна перевірити шляхом проведення швидкісної відеозйомки. Крім того, опосередковано, підтвердженням може слугувати зменшення якості сепарації при збільшенні подачі.

**Висновки.** Шляхом реалізації експериментальних досліджень вдалося встановити наступне.

1. Повна потужність на привід лопатевого ротора пропорційна до подачі і знаходиться в діапазоні  $N_{зЛГ} = 100 \dots 194$  Вт при показниках кінематичного режиму  $K = 113 \dots 314$  на подачах  $q = 0,2 \dots 1,25$  кг/с, що відповідають питомим значенням  $q_b = 2 \dots 12,5$  кг/м с та  $q_F = 10 \dots 62,5$  кг/м<sup>2</sup> с.

2. Потужність, що витрачається безпосередньо на переміщення зерна по решету знаходиться в межах  $N_{\Pi} = 10 \dots 78$  Вт при зазначених вище режимах і подачах. При цьому характеризується зменшення її приросту при пропорційному збільшенні подачі свідчить про можливе суттєве збільшення товщини шару зерна на решеті і наявність внутрішньосарових відносних переміщень часток.

3. Перевірки гіпотези щодо наявності внутрішньосарових відносних переміщень часток вимагає проведення додаткових експериментів.

## Список літератури

1. Авдеев Н.Е., Чернухин Ю.В., Странадко О.Г. Поиск новых принципов сепарирования. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2012. (3). С. 24-26.
2. Васильковский М. И. Повышение эффективности сепарации зерна на быстровращающемся цилиндрическом решете: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: 05.20.01. Воронеж. 1987. 24 с.
3. Комаристов В. Ю., Петренко М. М. Довідник з механізації післязбиральної обробки зерна. Київ: Урожай, 1990. 194 с.
4. Котов Б. І., Степаненко С. П., Пастушенко М. Г. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерно матеріалів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2003. Вип. 33. С.53-59.
5. Півень М. В. Обоснование процесса сепарирования зерновых смесей плоскими вибрационными решетками. *Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture*. Lublin. 2015. Vol.17. №7. С. 163-169.
6. Тищенко Л. Н. та ін. Идентификация скорости прохождения частиц зерновой смеси через отверстия решет вибрационных зерновых сепараторов. *Восточноевропейский журнал передовых технологий*. 2016. Вып. 2(7). С. 63-69.
7. Бакум М. В., Кречот М. М., Абдуев М. М. Результати досліджень впливу регулювальних параметрів на ефективність розділення насінневої суміші редиски пневматичним сепаратором з нахиленим каналом. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Сер. Механізація та автоматизація виробничих процесів*. 2016. Вип.10 (2). С. 67-71.

8. Завгородний А. И., Монтасер Х. Определение рациональной интенсивности колебаний рабочих органов вибросепаратора зерновых смесей. *Инженерия природокористування*. 2015. Вип. 1(3). С. 34-39.
9. Stanger E.A. Grain - cleaning machinery . *Milling feed and fertiliser*. 1977. Vol. 160. № 8. P. 11-15.
10. Кожуховский И. Е. Зерноочистительные машины. Москва: Машиностроение, 1974. 200 с.
11. Гладков Н. Г. Зерноочистительные машины. 2-е изд. перераб. и доп. Москва: Машгиз, 1961. 368 с.
12. Тиц Э.Л. и др. Машины для послеуборочной поточной обработки семян. Москва: Машиностроение, 1967. 447 с.
13. Голячук С.С. Сепарування зернових мас з використанням сил гравітації. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. 2012. Вип. 39. С.27-33.
14. Повітряно-решітний сепаратор. пат. 85117 Україна: МПК (2006) B07B 13/08, B07B 7/00, B02B 3/00. №а200703659; заявл. 03.04.2007; опубл. 25.12.2008, Бюл. № 24.
15. Nesterenko O. V., Leshchenko S. M., Vasytkovskyi O. M., Petrenko D. I. Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding. *INMATEH. Agricultural Engineering*. Romania. Bucharest: INMA. Vol. 53. No3. 2017. P. 65-70.
16. Мороз С. М. Васильковський О. М., Філімоніхін Г. Б. Анісімов О. В. Енергетичний аналіз роботи завантажувальних транспортерів зерноочисних машин загального призначення. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2012. Вип. 42 (1). С. 106-116.
17. Васильковський О.М., Лещенко С.М., Мороз С.М., Петренко Д.І. Дослідження енергоємності холостого ходу відцентрового сепаратора зерна. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2018. Вип. 48. С. 176-183.
18. О. Васильковський, С. Лещенко, К. Васильковська, Д. Петренко. Підручник дослідника. Навчальний посібник для студентів агротехнічних спеціальностей. Харків: Мачулін, 2016. 204 с.

## Referencis

1. Avdeev, N.E., Chernuhin, Yu.V. & Stranadko, O.G. (2012). Poisk novyih printsipov separirovaniya [Search for new principles of separation]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy*. (3). 24-26. [in Russian].
2. Vasytkovskiy, M. I. (1987). Povyishenie effektivnosti separatsii zerna na bystrovraschayuschemsya tsilindricheskom reshete [Improving the efficiency of grain separation on a rapidly rotating cylindrical sieve]. avtoref. dis. na soiskanie nauch. stepeni kand. tehn. nauk. 05.20.01. Voronezh [in Russian].
3. Komaristov, V. Yu. & Petrenko, M. M. (1990). *Dovidnik z mehanizatsiyi pislyazbiralnoyi obrobki zerna [Handbook for mechanization of post-harvest grain processing]*. Kyiv: Urozhay [in Russian].
4. Kotov, B. I., Stepanenko S. P. & Pastushenko, M. H. (2003). Tendentsii rozvytku konstrukttsii mashyn ta obladnannya dlia ochyshchennia i sortuvannia zerno materialiv [Trends in the design of machinery and equipment for cleaning and sorting grain materials]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia s-h mashyn*, Vol. 33, 53-59 [in Ukrainian].
5. Piven, M.V. (2015.). Obosnovanye protsessa sepyaryrovaniya zernovykh smesei ploskymy vybratsyonnyimi reshetamy [Justification of the process of separation of grain mixtures with flat vibrating sieves]. *Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture*, Vol.17 (7), 163-169 [in Russian].
6. Tyshchenko, L.N. et al. (2016). Ydentyfikatsiia skorosty prokhozhdennia chastyts zernovoi smesy cherez otverstyiia reshet vybratsyonnykh zernovykh separatorov [Identification of the rate of passage of particles of the grain mixture through the openings of sieves of vibration grain separators]. *Vostochnoevropskyi zhurnal peredovykh tekhnolohiy*, Vol. 2 (7), 63-69 [in Russian].
7. Bakum, M.V., Kreko, M.M. & Abduiev, M.M. (2016). Rezultaty doslidzhen vplyvu rehuliuvalnykh parametriv na efektyvnist rozdilennia nasinnievoi sumishi redysky pnevmatychnym separatorom z nakhylenym kanalom [Results of research on the influence of the regulation parameters on the separation efficiency of the radish seed mixture by a pneumatic separator with a tilted channel]. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarynoho universytetu. Ser. Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychyykh protsesiv*, Vol. 10 (2), 67-71 [in Ukrainian].
8. Zavhorodnyi, A.Y. & Montaser Kh. (2015). Opredelenye ratsyonalnoi yntensyvnyosti kolebaniy rabochykh orhanov vybroseparatora zernovykh smesei [Determination of rational intensity of oscillations of working organs of vibroseparator of grain mixtures]. *Inzheneriia pryrodokorystuvannia*, Vol. 1(3), 34-39 [in Russian].
9. Stanger, E.A. (1977). Grain - cleaning machinery. *Milling feed and fertiliser*, Vol. 160. № 8. 11-15 [in English].

10. Kozhukhovskiy, Y.E. (1974). *Zernoochystitelnye mashyny [Grain Cleaning Machines]*. Moscow: Mashynostroenye [in Russian].
11. Hladkov, N.H. (1961). *Zernoochystitelnye mashyny [Grain Cleaning Machines]*. (2d ed.). Moscow: Mashhyz [in Russian].
12. Tits E.L. et al. (1967). *Mashyny dlya posleuborochnoy potochnoy obrabotki semyan [Machines for post-harvesting seed treatment]*. Moscow: Mashynostroenie [in Russian].
13. Holiachuk, S.Ie. (2012). Separuvannia zernovykh mas z vykorystanniam syl hravitatsii [Separation of grain masses using gravity forces]. *Mizhvuzivskiyi zbirnyk «Naukovi notatky», Vyp. 39, 27-33* [in Ukrainian].
14. Povitriano-reshitnyi separator [Air-lattice separator]. pat. 85117 Ukraina: MPK (2006) B07B 13/08, B07B 7/00, B02B 3/00. №a200703659; zaiavl. 03.04.2007; opubl. 25.12.2008, Biul. № 24 [in Ukrainian].
15. Nesterenko, O.V., Leshchenko, S.M., Vasylovskiy, O.M. & Petrenko, D.I. (2017). Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding. *INMATEH. Agricultural Engineering, Vol. 53 (3), 65-70* [in English].
16. Moroz, S.M., Vasylovskiy, O.M., Filimonikhin, H.B. & Anisimov, O.V. (2012). Enerhetychnyi analiz roboty zavantazhuvalnykh transporteriv zernoochysnykh mashyn zahalnoho pryznachennia. [Power analysis of the work of the loading conveyors of general cleaning machines]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn Zahalnodierzhavnyi mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk, Vol. 42 (1), 106-116* [in Ukrainian].
17. Vasilkovskiy, O.M., Leschenko, S.M., Moroz, S.M. & Petrenko, D.I. (2018). Doslidzhennya energoemnosti holostogo hodu vIdtsentrovogo separatora zerna. [Investigation of the idling power of the centrifugal grain separator]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn. Zahalnodierzhavnyi mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk, Vol. 48, 176-183* [in Ukrainian].
18. Vasylovskiy, O., Leshchenko, S., Vasylovska, K. & Petrenko, D. (2016). *Pidruchnyk doslidnyka. Navchalnyi posibnyk dlia studentiv ahrotekhnichnykh spetsialnostei [Tutorial of the researcher. A manual for students of agrotechnical specialties]*. Kharkiv: Machulin [in Ukrainian].

**Olexiy Vasylovskiy**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Sergiy Leshchenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Sergiy Moroz**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Dmytro Petrenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Investigation of the Energy Intensity of the Idle Speed of the Centrifugal Grain Separator**

The purpose of the work is an experimental study of the components of the power on the drive of the original centrifugal pneumatic grate grain separator, as well as to determine the dependence of power on the basic design parameters of the impeller rotor and machine performance. Obtaining these regularities allows the design of centrifugal direct-flow grain-cleaning machines of different performance and to predict their energy performance in advance.

The experiments were performed on a grain mixture of wheat with a moisture content of 13.6%. Contamination with small impurities was 5%. The main studies were performed on a laboratory stand that completely reproduces the experimental separator. The basis of the separator is the original arcuate sieve and the blade rotor - grain accelerator. The number of rotor blades was 24. Determination of power per drive was carried out using the device K-50. During the experiments, two factors were changed - productivity (flow) and the kinematic index, which is a complex indicator and takes into account the radius and angular velocity of the rotor blade. As a result of the experiment, the dependences of the full power consumption for the drive of the blade rotor on the feed were obtained for different values of the kinematic mode index. Taking into account the previous experiments on determining the idling power, we determined the dependence of the power costs for the movement of grain on the arcuate sieve of a centrifugal flow separator from the feed for different values of the kinematic mode index.

The total power on the drive of the rotor blade is proportional to the feed and is in the range of 100... 194 watts at kinematic indexes 113... 314 at feeds of 0.2... 1.25 kg / s. The power consumed to move the grain along the sieve is 10... 78 watts. In this case, there is a decrease in power gain with a proportional increase in flow, which can be explained by the movement of particles between layers. Additional tests are required to test the hypothesis of the relative movement of particles between layers.

**grain, power consumption, power, centrifugal flow separator, blade rotor, kinematic index, productivity, flow**

*Одержано (Received) 22.11.2019*

*Прорецензовано (Reviewed) 03.12.2019*

*Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019*