

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОГРАВІТАЦІЙНОГО РОЗДІЛЕННЯ ЗЕРНА

Степан Ковалишин, к. т. н., Олексій Швець, к. т. н.,  
Віктор Дадак, к. т. н., Вадим Пташник, к. т. н.  
Львівський національний аграрний університет,  
бул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н,  
Львівська обл., Україна,  
e-mail: opshvets@yahoo.com

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.019>

### Ковалишин С., Швець О., Дадак В., Пташник В. Дослідження процесу електрогравітаційного розділення зерна

Робота присвячена обґрунтуванню технологічних параметрів процесу електрогравітаційного розділення зерна.

У роботі наведено результати досліджень процесу електрогравітаційного сепарування зерна пшениці, ячменю та жита за допомогою камерного електрокоронного сепаратора, процес сепарування в якому здійснювався в горизонтальній площині на три фракції.

Оброблювані в процесі сепарування насіннєві суміші містили якісне зерно, щуплі, роздроблені та невимолочені зерна (відходи), частинки колосків і стебел, насіння бур'янів, інші домішки.

Ефективність сепарування оцінювали за допомогою визначення маси тисячі насінин кожної відсепарованої фракції, вмісту домішок у відсепарованому насінні та втрат основної культури у відходи. Регульованим параметром процесу була висока напруга електричного поля в міжелектродній зоні сепаратора.

У результаті досліджень встановлено, що максимальна маса тисячі насінин спостерігалась у фракції насіння з мінімальним кутом відхилення від вертикалі (приймач 1) за напруги на електродах у межах 15...20 кВ. Зменшення напруги призводить до зниження цього показника та збільшення домішок у відсепарованому зерні. Збільшення напруги на електродах понад 15 кВ призводить до зростання втрат основної культури у відходи.

У результаті досліджень було встановлено, що оптимальний режим роботи сепаратора під час сепарування насіння озимої пшениці досягається за напруги на коронувальному електроді  $U = 14...15$  кВ; для насіння ячменю втрати й засміченість не перевищують норми за напруги на коронувальному електроді  $U = 15$  кВ; оптимальний режим сепарування жита забезпечується за напруги на коронувальному електроді  $U = 13...14$  кВ.

**Ключові слова:** електрогравітаційне розділення зерна, камерний електрокоронний сепаратор, критерій подільності, маса тисячі насінин, домішки, втрати, якість розділення.

### Kovalyshyn S., Shvets O., Dadak V., Ptashnyk V. Research of electro-gravity separation of grain

The article is devoted to substantiation of technological parameters of the process of electrogravitational separation of grain. The results of studies of the process of electrogravitational separation of wheat, barley and rye grain with using a chamber electrocorona separator are presented in the article. The grain mix was separated in the horizontal plane into three fractions in the electrocorona separator.

The seed mixtures, subjected to separation process, contained high-quality grain, puny, crushed and threshed grains (wastes), parts of spikelets, stems and weed seeds, other impurities.

Separation efficiency was evaluated by determining the mass of thousands of seeds of each separated fraction, the content of impurities in the separated seeds, and the loss of the main crop to the waste. The high voltage of the electric field in the inter-electrode zone of the separator served as a regulated parameter of the process.

As a result of the studies, it has been found that the maximum mass of one thousand seeds is in the seed fraction in the 1 receiver (with a minimum of vertical deviation angle) at electrode voltages within 15...20 kV. The decrease in voltage leads to a decrease of this index and an increase in impurities in the separated grain. The voltage increasing up to 15 kV leads to an increased loss of the main crop to the waste.

Result of the researches demonstrate that the optimum mode of operation of the separator during the separation of winter wheat seeds is achieved at voltages at the corona electrode of  $U = 14...15$  kV; for barley seeds the losses and clogging do not exceed the norm of the voltage at the corona electrode of  $U = 15$  kV; optimum rye separation mode is ensured by the voltage at the corona electrode of  $U = 13...14$  kV.

**Key words:** grain electrogravitational separation, chamber electrocorona separator, the criterion of division, the mass of a thousand of seeds, impurities, losses, quality of separation.

**Постановка проблеми.** Післязбиральна обробка зерна є одним із найбільш енергоємних етапів виробництва. Вона може передбачати первинну, вторинну, а за потреби й додаткову

очистки та підсушування зерна до регламентованої вологості [3; 4; 13; 15]. Основні енергозатрати припадають на роботу насіннеочисних машин. Крім того, вони зростають в рази під час

багаторазового пропускання насінневих сумішей через машину.

З метою зменшення вартості виробництва та затрат на експлуатацію техніки в сучасному виробництві необхідно використовувати енергоощадні машини і технології, а також створювати нові енергоощадні сепаратори.

До таких машин, на нашу думку, належать сепаратори, в яких як робочий орган використовується електричне поле коронного розряду. У них розділення зернової суміші здійснюється за сукупністю фізико-механічних та електричних властивостей компонентів [1; 3; 5; 7–12; 14; 19].

Найбільш енергоощадним видом таких сепараторів є камерний електрокоронний сепаратор. У ньому розділення відбувається під дією гравітаційної сили та сили дії електричного поля коронного розряду, а затрати електроенергії спрямовані саме на його створення. Ще однією перевагою такого сепаратора є відсутність рухомих вузлів і деталей, що також зменшує його енергоємність та механічні втрати.

**Аналіз досліджень і публікацій.** До машин, які дають змогу зреалізувати спосіб електрогравітаційного сепарування насіння, належить коронний електросепаратор камерного типу. Принципова схема його роботи зображена на рис. 1.

У ньому рух компонентів зернової суміші, які в міжелектродному просторі поля коронного

розряду отримали певний заряд, визначається в основному взаємодією сил електричного поля  $F = Q \cdot E$  і сили тяжіння  $P = m \cdot g$ . Частинки суміші в міжелектродному просторі будуть падати вниз під дією сили  $P$  і змішуватися при цьому в бік осаджувального електрода під дією сили  $F$  [1; 5; 8; 16–18; 20] на деякий кут  $\alpha$ .

За заданої величини та конфігурації електричного поля траєкторія різних частинок визначається тільки її властивостями, що й створює можливість поділу [1; 5; 6; 13]. Критерій подільності виражається як функція кута  $\alpha$ :

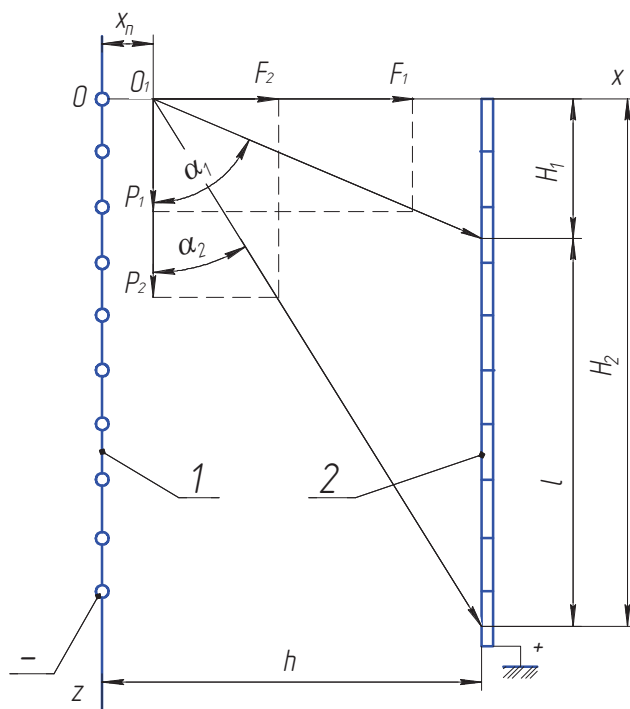
$$k = \tan \alpha . \quad (1)$$

Оптимальний кут відхилення, за даними [1], повинен бути в межах

$$30^\circ < \alpha_{\text{опт}} < 45^\circ .$$

Слід, однак, мати на увазі, що під час проектування камерних сепараторів краще використовувати не різницю в кутах відхилення частинок, а поділ у вертикальній або горизонтальній площині [1; 5].

За вертикальною схемою сепарування (див. рис. 1) можна отримати достатню чіткість розподілу, але при цьому спостерігається відбивання частинок від поверхні осаджувального електрода, що знижує чіткість розділення. Крім того, конструктивно досить важко здійснити відбір і транспортування частинок, розділених у вертикальній площині.



**Рис. 1.** Принципова схема камерного коронного сепаратора:

1 – коронувальний електрод; 2 – осаджувальний електрод; 0 – початкова координата; 0<sub>1</sub> – точка початку координат траєкторії частинки; x<sub>n</sub> – початкова координата частинки; h – відстань між електродами; P<sub>1</sub> і P<sub>2</sub> – гравітаційні складові першої і наступної частинок; F<sub>1</sub> і F<sub>2</sub> – сили електричного поля, які діють на першу і наступну частинки; H<sub>1</sub> і H<sub>2</sub> – шлях, який пройшли частинки по вертикалі; l – відстань між частинками

**Fig. 1.** Schematic diagram of a chamber corona separator:

1 – corona electrode; 2 – receiving electrode; 0 – initial coordinate; 0<sub>1</sub> – the point of start of the coordinates of a particle trajectory; x<sub>n</sub> – the initial coordinate of the particle; h – the distance between the electrodes; P<sub>1</sub> and P<sub>2</sub> – the gravitational components of the first and subsequent particles; F<sub>1</sub> and F<sub>2</sub> – the electric field force acting on the first and subsequent particles; H<sub>1</sub> and H<sub>2</sub> – the path that the particles passed vertically; l – the distance between the particles

При горизонтальній схемі сепарування чіткість розділення дещо менша, однак вплив відбивання мінімальний і продуктивність вища.

**Постановка завдання.** На сьогодні впровадження камерних електричних сепараторів у технологічні процеси обробки насіння гальмується недостатнім дослідженням їх роботи. Тому наше завдання – дослідити процес електрогравітаційного розділення зернових сумішей та обґрунтувати основні його технологічні параметри.

**Виклад основного матеріалу.** Для експериментальних досліджень процесу сепарування зерна в камерному електрокоронному сепараторі використовували насінневі суміші озимої пшениці, ячменю та жита, в яких були наявні такі їх компоненти:

- якісне зерно;
- щупле зерно;
- бите зерно;

- частинки колоска;
- насіння бур'янів;
- невимолочені насінини;
- частинки стебла.

Характеристика насінневих сумішей наведена в табл. 1.

Вологість насіння під час проведення експериментальних досліджень становила 15 % для насіння пшениці та жита і 16,5 % для насіння ячменю.

Для проведення експериментальних досліджень було розроблено експериментальну установку, принципова схема якої наведена на рис. 2.

Величину електричного поля регулювали за рахунок зміни вхідної напруги живлення джерела високої напруги.

Під час досліджень значення високої напруги, яку подавали на коронувальний електрод, змінювалось у проміжку від 0 до 25 кВ з кроком 5 кВ.

**Таблиця 1.** Характеристика насінневих сумішей

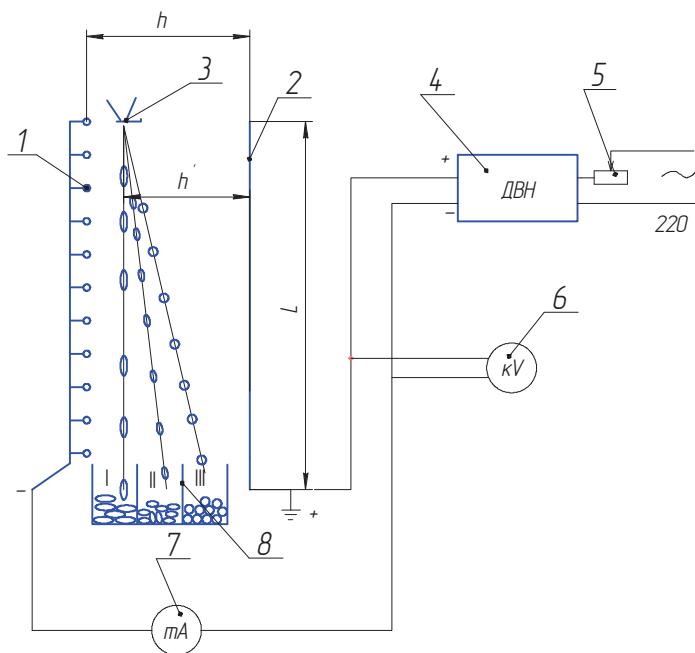
**Table 1.** Characteristics of seed mixtures

| Культура | Вміст домішок, % |            |                  |                  |                       |                 | Σ   |
|----------|------------------|------------|------------------|------------------|-----------------------|-----------------|-----|
|          | щупле зерно      | бите зерно | частинки колоска | насіння бур'янів | невимолочені насінини | частинки стебла |     |
| Пшениця  | 1,4              | 1,1        | 0,3              | 0,8              | 0,5                   | 1,3             | 5,4 |
| Ячмінь   | 1,3              | 0,9        | 0,5              | 1,7              | 0,6                   | 1,2             | 6,2 |
| Жито     | 1,5              | 1,3        | 0,4              | 0,5              | 0,8                   | 1,1             | 5,6 |

**Таблиця 2.** Середнє значення маси 1000 насінин відсепарованих фракцій зерна

**Table 2.** Average weight of 1000 seeds of separated grain fractions

| Напруга на коронувальному електроді, кВ | Маса 1000 насінин, г |           |           |
|-----------------------------------------|----------------------|-----------|-----------|
|                                         | Приймач 1            | Приймач 2 | Приймач 3 |
| Озима пшениця                           |                      |           |           |
| 5                                       | 33,33                | -         | -         |
| 10                                      | 37,63                | 32,17     | 20,60     |
| 15                                      | 38,90                | 33,90     | 23,33     |
| 20                                      | 39,10                | 34,83     | 25,33     |
| 25                                      | 39,27                | 36,93     | 28,33     |
| Ячмінь                                  |                      |           |           |
| 5                                       | 31,77                | -         | 11,50     |
| 10                                      | 34,70                | 30,53     | 17,30     |
| 15                                      | 37,90                | 32,63     | 22,03     |
| 20                                      | 38,80                | 33,97     | 26,17     |
| 25                                      | 38,83                | 36,73     | 29,77     |
| Жито                                    |                      |           |           |
| 5                                       | 25,63                | 20,07     | 13,33     |
| 10                                      | 28,13                | 25,17     | 16,73     |
| 15                                      | 29,43                | 26,83     | 18,80     |
| 20                                      | 30,57                | 28,97     | 22,90     |
| 25                                      | 30,93                | 30,80     | 28,30     |



**Рис. 2.** Принципова схема експериментальної установки:

- 1 – коронувальний електрод;
- 2 – осаджувальний електрод з приймачами насіння; 3 – дозувальний пристрій;
- 4 – джерело високої напруги (ДВН);
- 5 – регулятор напруги живлення ДВН;
- 6 – кіловольтметр С-96; 7 – міліамперметр;
- 8 – приймачі насіння;  $h$  – міжелектродна відстань;  $L$  – висота сепарувального каналу

**Fig. 2.** Schematic diagram of the experimental setup:

- 1 – corona electrode; 2 – receiving electrode with seed receivers; 3 – dosing device; 4 – high voltage source (HVS); 5 – regulator of a supply voltage of HVS;
- 6 – C-96 kilowatt-meter; 7 – milliammeter;
- 8 – seed receivers;  $h$  – distance between electrodes;  $L$  – the separation channel height

У результаті досліджень отримували три фракції насіння, в яких визначали вміст домішок та масу 1000 насінин фракції ( $m_{1000}$ ), як одного зі стандартизованих показників якості насіння. За результатами вимірювання маси тисячі насінин кожної з фракцій робили висновок про ефективність сепарування та якість відсепарованого насіння.

Результати досліджень наведені у табл. 2 та на рис. 3–5.

Аналізуючи отримані результати досліджень, бачимо, що за мінімальних значень напруженості електричного поля в міжелектродному просторі сепаратора для насіння пшениці розділення на фракції не спостерігається. Для насіння ячменю за мінімального значення  $U = 5$  кВ починають відділятися легкі домішки. Насіння жита також погано розділяється за таких умов.

Під час збільшення напруги на коронувальному електроді до максимального значення  $U = 25$  кВ маса тисячі насінин фракцій насіння злаків у відповідних приймачах зростає. Однак у діапазоні  $U = 20 \dots 25$  кВ різко зростає маса тисячі насінин у приймачі № 3. Це явище є небажаним, оскільки воно свідчить про потрапляння якісних насінин до фракції відходів з легкими домішками.

Зерно після обробки має відповідати за чистотою нормам обмежувальних або базисних кондицій. При цьому в обробленому матеріалі не повинно міститися більше ніж 3 % домішок [2].

З рис. 3 видно, що засміченість насіння досліджуваних культур не перевищує 3 % за напруги на

коронувальному електроді  $U \geq 15$  кВ. За подальшого збільшення напруги в першому приймачі домішки відсутні повністю, однак більшість якісного насіння потрапляє в другий приймач.

Згідно з вимогами [2], які ставляться до насіннеочисних машин, допустимі втрати основного зерна у відходи не повинні перевищувати 1,5 %, а в смітєві домішки – 0,5 % від маси зерна основної культури у вихідному матеріалі.

Втрати основної культури у відходи визначали за допомогою визначення відсотка якісного насіння в третьому приймачі насіння. Результати визначення втрат основної культури у відходи за різних режимів сепарування ілюструє рис. 4.

Аналізуючи рис. 4–5, можна стверджувати, що для всіх досліджуваних насінневих сумішей зі збільшенням напруги понад 14 кВ починають зростати втрати якісних насінин основної культури у відходи (приймач 2) та сміття (приймач 3). За досягнення напруги 20 кВ втрати починають зростати на 1,5...3 %.

Оптимальні режими роботи сепаратора визначали за допомогою аналізу результатів експериментальних досліджень маси тисячі насінин фракцій насіння досліджуваних культур та втрат основної культури за різних значень напруги на коронувальному електроді.

У результаті аналізу визначали значення регульованих параметрів процесу сепарування, за яких функція відгуку маси тисячі насінин набувала максимуму, а функції засміченості насіння та функції втрат – мінімального значення:

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= f(U) \Rightarrow \max \\ Y_2 &= f(U) \Rightarrow \max \\ Y_3 &= f(U) \Rightarrow \max \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де  $Y_1$  – маса тисячі насінин;  $Y_2$  – засміченість насіння;  $Y_3$  – втрати основної культури.

Оптимальним вважалось таке значення регульованого параметра процесу сепарування, а саме напруги на коронувальній електроді, за якого вміст засмічувача не перевищував вимог стандарту, а втрати основної культури у відходи – агротехнічних вимог до сепараторів.

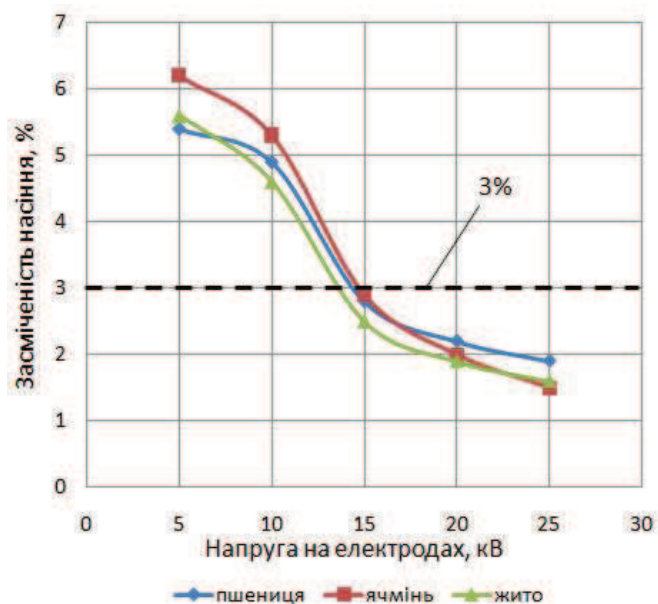


Рис. 3. Залежності засміченості насіння злаків за різних режимів сепарування

Fig. 3. Dependencies of the impurity content of cereal seeds under different modes of separation

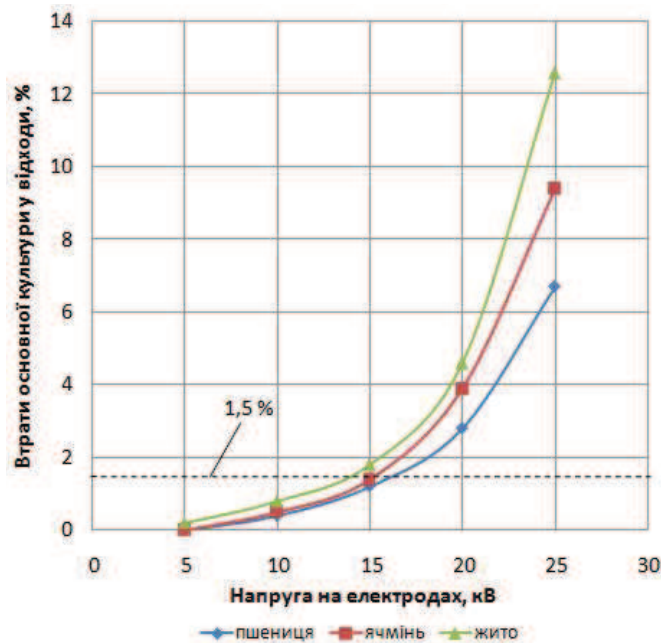


Рис. 4. Залежності втрат насіння основної культури у відходи (приймач 2)

Fig. 4. Dependence of loss of the main crop seed as waste (receiver 2)

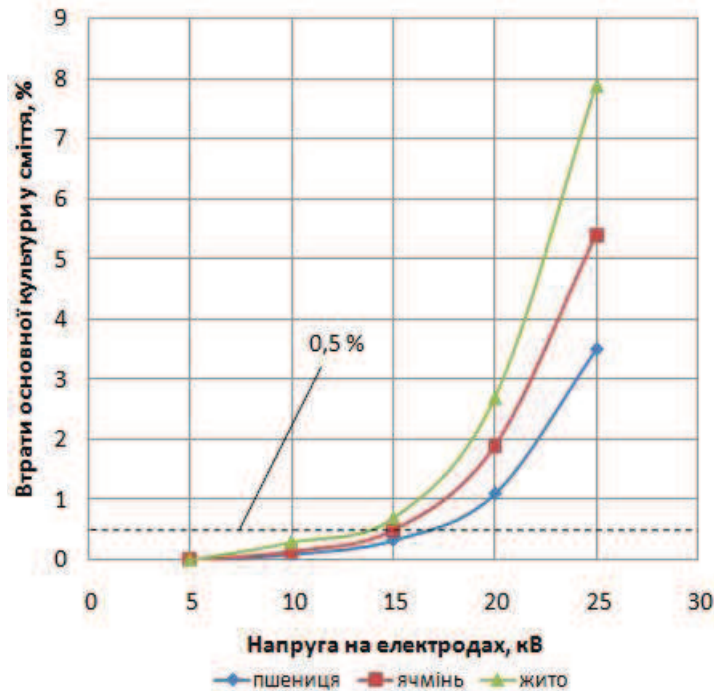


Рис. 5. Залежності втрат насіння основної культури у смітті (приймач 3)

Fig. 5. Dependence of loss of the main crop seed as refuse (receiver 3)

Аналізуючи табл. 2. та рис. 3–5, можна зробити висновок, що оптимальний режим роботи сепаратора під час сепарування насіння озимої пшениці досягається за напруги на коронувальному електроді  $U = 14 \dots 15$  кВ; для насіння ячменю втрати й засміченість не перевищують норми за напруги на коронувальному електроді  $U = 15$  кВ; оптимальний режим сепарування жита забезпечується за напруги на коронувальному електроді  $U = 13 \dots 14$  кВ.

### Висновки

1. Одним із найбільш енергоощадних методів сепарування зерна є електрогравітаційний метод, оскільки в ньому витрати електричної енергії спрямовані тільки на створення електричного поля коронного розряду.

2. Оптимальний режим роботи сепаратора досягається за напруги на коронувальному електроді:

- під час сепарування насіння озимої пшениці  $U = 14 \dots 15$  кВ;
- під час сепарування насіння ячменю  $U = 15$  кВ;
- під час сепарування насіння жита  $U = 13 \dots 14$  кВ.

3. Зменшення напруги призводить до зниження маси тисячі насінин відсепарованого

насіння та збільшення в ньому сторонніх домішок (бите та щупле зерно, легкі домішки бур'янів тощо). Збільшення напруги понад 15 кВ призводить до зростання втрат основної культури у відходи та сміття.

4. Наступним етапом майбутніх досліджень повинно стати обґрунтування розмірів сепарувального каналу та приймачів продуктів сепарування.

### Бібліографічний список

1. Басов А. М. Электрoзeрнoочиститeльнe мaшинy: тeорeя, кoнстpукциe и рaсчeт. Мoсквa: Мaшинoстpoенe, 1968. 203 с.
2. ДСТУ 7160:2010. Насіння овочевих, баштанних, кормових і пряно-ароматичних культур, сортові та посівні якості. Технічні умови. [Чинний від 2010-07-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2010. 16 с.
3. Ковалишин С. Й., Швець О. П. Застосування електричного поля коронного розряду під час передпосівної обробки насіння озимого ріпаку. *MOTROL Moto-ryzacia i energetyca rolnictwa*. 2011. № 13D. S. 276–283.
4. Ковалишин С. Й., Швець А. П. Результаты исследований процесса дополнительной очистки семян озимого рапса на электрофрикционном сепараторе. *Научные труды Русенского университета «Ангел Кънчев»*. Руссе, Болгария, 2012. 51. С. 56–60.
5. Паранюк В. О., Ковалишин С. Й., Швець О. П., Мельничук В. І. Фізичні основи технології сепарування

- насіння сільськогосподарських культур. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*: зб. наук. праць / УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого. Дослідницьке, 2007. Вип. 10 (24), кн. 1. С. 77–86.
6. Пристрій для обробки насіння: пат. 25302А Україна: МПК (2006) А01С 1/00. № 96051982; заявл. 21.05.1996; опубл. 25.12.1998, Бюл. № 6. 2 с.
7. Apparatus and Method for Triboelectrostatic Separation: United States of America Patent No. 5,938,041. 17.08.1999.
8. Berlage A. G., Bilsland D. M., Churchill D. B., Cooper T. M. Electrostatic separation to improve germination of carrot and celery seed. *Trans. ASAE*. 1990. 33(2). P. 597–600.
9. Dwari R. K., Hanumantha Rao K. Triboelectrostatic behaviour of high ashnon-coking Indian thermal coal. *Int. Miner. Process.* 2006. 81. P. 93–104.
10. Hemery Y., Holopainen U., Lampi A.-M. et al. Potential of dry fractionation of wheat bran for the development of food ingredients. Part 2: Electrostatic separation of particles. *Journal of Cereal Science*. 2011. 53. P. 9–18.
11. Hlavačova Z. Electrical properties of agricultural products. *Encyclopedia of Agrophysics* / eds.: J. Gliński, J. Horabik, J. Lipiec. Dordrecht-Heidelberg; London; New York: Springer Press, 2011.
12. Knoll F. S., Taylor J. B. Advances in Electrostatic Separation. SME Preprint, 1984. P. 84–71.
13. Kovalyshyn S., Dadak V., Konyk S. Intensification of the process of preparing small seed crop mixtures. Acta technologica agriculture. *The Scientific Journal for Agricultural Engineering*. 2015. 4. P. 108–112.
14. Kovalyshyn S., Shvets O., Grundas S., Tys J. Use of electro-separation method for improvement of the utility value of winter rapeseeds. *Int. J. Agrophysics*, 2013. 27. P. 419–424.
15. Kovalyshyn S., Shvets O. Study of efficiency of additional cleaning of rape seeds on the electrofrictional separator. VI International Scientific Congress a machinery. Vol. 1/3, June 2018. Proceedings. Vol. 1. Agricultural machines. Research and testing. New machine designs, 25.06 – 28.06. 2018. Burgas, Bulgaria, 2018. P. 13–15.
16. Manouchehri H. R., Hanumantha Rao K., Forsberg K. S. E. Review of electrical separation methods. Part 1: Fundamental aspects. *Miner. Metall. Process.* 2000. 17 (1). P. 23–36.
17. Manouchehri H. R., Hanumantha Rao K., Forsberg K. S. E. Review of electrical separation methods. Part 2: Practical consideration. *Miner. Metall. Process.* 2000. 17 (3). P. 139–166.
18. Mazumder M. K., Tennal K. B., Lindquist D. A. Triboelectric separation of coal from mineral impurities. *Electrostatic society of America 1995. Annual Meeting proceedings*. Laplacian press, Morgan Hill, CA, 1995. P. 59–70.
19. Messal S., Corondan R., Chetan I. et al. Electrostatic separator for micronized mixtures of metals and plastics originating from waste electric and electronic equipment. *Journal of Physics*. 2015. Vol. 646. P. 1–4.
20. Pandya T. S., Srinivasan R., Thompson C. P. Fiber Separation for Ground Corn Flour Using an Electrostatic Method. *Cereal Chemistry*. 2013. Vol. 90, No. 6. P. 535–539.

Стаття надійшла 25.09.2019