

**Швець О.П.**

к.т.н., доцент

Коруняк П.С.

к.т.н., доцент

Баранович С.М.

к.т.н., доцент

Березовецький С.А.

к.т.н., доцент

**Львівський національний
університет
природокористування****Shvets O.**

Ph.D., Associate Professor

Koruniak P.

Ph.D., Associate Professor

Baranovych S.

Ph.D., Associate Professor

Berezovetskyi S.

Ph.D., Associate Professor

**Lviv Nacional
Environmental University****УДК 621-752****DOI: 10.37128/2306-8744-2022-3-5****ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОГО
СЕПАРАТОРА**

Вібраційне сепарування на решетах є одним з найбільш поширених способів сепарування сипких матеріалів, і насіння сільськогосподарських культур зокрема. Вібраційні сепаратори мають ряд переваг, оскільки дозволяють поєднувати процеси транспортування та сепарування матеріалу. На жаль, у конструкціях існуючих насінноочисних машин цього типу, з точки зору конструктивних параметрів робочого органу, налаштування і режиму роботи, важко покращити показник повноти розділення зернових сумішей на фракції. Тому виникає необхідність пошуку способів інтенсифікації даного процесу, розробки та дослідження роботи технічних засобів для їх реалізації.

Одним зі шляхів покращення умов проходження компонентів зернових сумішей крізь отвори решіт є створення над ними електричного поля. Теоретично існує деяке початкове значення напруженості електричного поля, за якого насінина почне орієнтуватись в ньому. Оптимальним буде таке значення напруженості, за якого ступінь орієнтування насінин на коливному в повздовжньому напрямку решеті буде максимальною (коли їх повздовжня вісь буде перпендикулярною до решета).

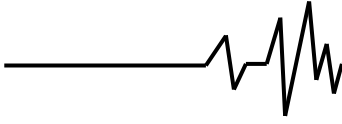
В роботі описані результати дослідження процесу сепарування насіння зернових культур на вібраційному сепараторі та обґрунтовано оптимальні значення напруженості електричного поля E , за якої вдається досягнути максимального ефекту орієнтування насінин на решеті.

Результати експериментальних досліджень показали, що вплив електричного поля на насінини різних культур є неоднаковим. Найменше він проявляється на насінні пшениці, оскільки кількість зорієнтованих в електричному полі насінин становив біля 35 %. Для насіння ячменю значення досліджуваного показника складало 48 %. Максимальний відсоток зорієнтованих насінин вівса за максимальної напруженості електричного поля над решетом 6,67 кВ/см становив біля 53 % насінин.

Встановлено, що орієнтація насінин на решеті впливає на інтенсивність його просіювання крізь отвори. За умови максимального орієнтування показник просіювання пшениці зріс на 20...23 %, ячменю – на 26...30 %, вівса – на 47 %.

Ключові слова: вібрації, вібраційний сепаратор, електричне поле, насіння зернових культур, сепарування, ефективність просіювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання ефектів, які спричинені вібрацією, значно полегшує реалізацію фізичних процесів у віброкিপлячому шарі і сприяє інтенсифікації технологічних процесів. Вплив вібрації на процес розділення суміші на фракції може ефективно застосовуватись практично в усіх



видах сепарування: на суцільній площині; на перфорованих деках (ситих, решетах); у повітряному і рідинному середовищах. Вібрацію застосовують для виділення із суміші рідкої фази, очистки від домішок і включень, знепилування тощо.

Одним з найрозповсюдженіших видів сепарування є вібраційне сепарування у повітряному середовищі, яке, як правило, проводиться на перфорованих деках і на суцільних площинах, що знаходяться під заданим кутом нахилу до горизонту для конкретно взятого матеріалу.

Сепарування на ситах з використанням коливань відоме з давніх часів. Роль вібрації в реалізації цього процесу має велике значення і обумовлена наступними факторами.

1. Вібрація перетворює сили сухого тертя, які характерні у взаємодії частинок сипкої суміші, у сили в'язкого тертя, в результаті чого створюються умови прояву відмінностей параметрів розділення частинок суміші, які у статичі не проявляються.

2. Під час вібрування, крім перетворення сил тертя, діють рушійні вібраційні сили, які також сприяють підвищенню інтенсивності процесу розділення. Ці сили забезпечують транспортування як вихідної суміші вздовж робочої поверхні, так і продуктів розділення до відповідних приймачів.

3. Вібрація є важливим елементом процесу просіювання, оскільки забезпечує інтенсивний рух частинки відносно отвору сита, що збільшує ймовірність проходження її через нього.

4. Частинки сипкого матеріалу з різними властивостями і розмірами рухаються по вібрувальній поверхні за різними траєкторіями, що лежить в основі методу безситового розділення суміші.

У процесі проектування і вдосконалення засобів вібраційного розділення сипкої суміші необхідно враховувати, що вібрація не лише пришвидшує робочий процес розділення, але і сприяє вібраційному переміщенню. Цьому питанню присвячено багато досліджень і публікацій [1, 2, 3, 10].

Під час вібраційного сепарування сумішей сипких матеріалів можна розв'язувати ще наступні технологічні задачі: очистка сировини від домішок, підготовка її до наступних технологічних операцій, фракціонування і сортування. У більшості процесів вібраційного сепарування параметри розділення суміші можуть чіткіше проявлятися у певних поєднаннях; один з

них виділяють як основний, а інші називають супутніми.

Найбільш поширеними у с.г. виробництві з поміж вібраційних є решітні зерноочисні машини, на яких зерно розділяють на фракції за геометричними параметрами, а саме шириною і товщиною. В конструкціях цих машин застосовують решета з круглими, прямокутними та іншими отворами [1]. Одним з основних параметрів, які визначають ефективність роботи решета, є повнота розділення, яка встановлюється як відношення маси частинок, що фактично проходять через решето, до маси таких частинок, які містяться у вихідному матеріалі [5].

Використання вібраційних сепараторів з електромагнітним приводом можна реалізувати як направлені гармонійні коливання так і незалежні, а весь робочий процес автоматизувати.

Для вібраційних решітних (ситових) машин характерні декілька режимів вібраційного переміщення [7, 8]. Необхідно зазначити, що у відривному режимі (з підкиданням) із збільшенням швидкості ефективність процесу зменшується. Це відбувається не лише через збільшення нормальної складової амплітуди коливань і зменшення часу контакту із ситом, але і внаслідок відбивання частинок догори від кромки отвору, що характерно для руху тонкого шару. Із збільшенням товщини шару до оптимального ефективність просіювання збільшується, тому що верхні шари перешкоджають відриву частинок з нижніх шарів. Якщо товщина шару більша від оптимальної, ефективність просіювання зменшується через збільшення сил тертя між частинками у нижньому шарі, прилеглому до площини.

Крім того, досліджуючи процес вібраційного сепарування сипких матеріалів необхідно мати на увазі, що швидкість переміщення матеріалу залежить від частоти та амплітуди коливань, кута вібрації, коефіцієнта тертя, фізико-механічних властивостей компонентів матеріалу тощо.

У сучасних ситових машинах використовуються прямолінійні, кругові та еліптичні коливання з частотою від 3,3 до 25 Гц (200...1500 кол/хв.), амплітудою – від 1 до 20 мм та пришвидшенням – від 1 до 7g.

Електромагнітний привід вібраційного сепаратора уможливує реалізувати вимушені коливання системи з частотою 100, 50, 25 Гц. На вибір її величини впливають як маса так і довжина решета сепаратора [7].

За результати досліджень встановлено, що одним з основних чинників



гарантованого просіювання є орієнтування частинки (зернини) відносно отвору. Цю задачу можна вирішити використовуючи електростатичне поле [6, 9].

У цьому випадку умова орієнтування насінини має вигляд [11]:

$$M_e + M_{F1} \pm M_{Fi} > M_{Fg} + M_{F2} \quad (1)$$

де M_e – обертовий момент електричного поля;

M_{F1} – момент сили взаємодії поля із зарядженою насінинною;

M_{Fi} – змінний момент сили інерції руху насінини;

M_{Fg} – моментів сили ваги насінини;

M_{F2} – момент сили взаємодії зарядженої насінини з поверхнею решета.

На рис. 1 показана взаємодія сил і моментів, які діють на заряджену насінинну.

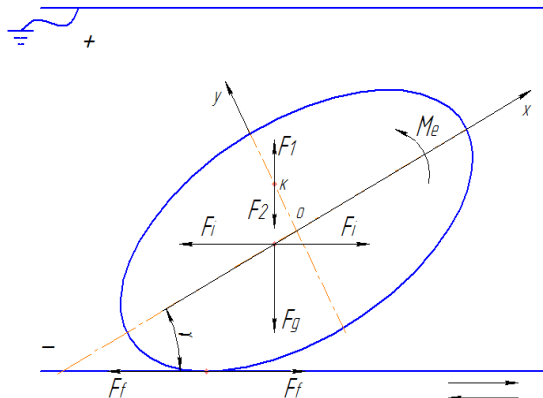


Рис. 1 – Схема сил і моментів, які діють на заряджену насінинну зі зміщеним центром тяжіння, яка знаходиться на коливній в електричному полі площині

Продовгувата еліптична насінинна може орієнтуватися в електричному полі, оскільки вона має початковий кут нахилу γ_0 . Тому буде існувати і початкове значення напруженості електричного поля $E > 0$. Щоб зорієнтувати насінини з γ_{min} необхідне більше напруження поля, ніж для частинок з γ_{max} . В кожен коливний цикл момент інерції допомагає орієнтуванню насінин в

електричному полі або протидіє йому, причому час таких дій буде рівним. В роботі [11] встановлено, що якщо орієнтування насінини почалось за протидіючого моменту сили інерції, то воно продовжується і протягом наступного періоду. Таким чином, в початковий період ступінь орієнтування насінини на коливному в повздовжньому напрямку решеті е визначатається кутом γ_0 . Для повного орієнтування насінин (коли їх повздовжня вісь повинна бути перпендикулярна до решета) з меншим кутом γ_0 необхідна більша напруженість поля.

Постановка завдання. Дослідити робочий процес сепарування зернових культур на вібрувальній площині, розміщеній в електрично полі, та встановити його вплив на показник просіюваності.

Виклад основного матеріалу. Як показали результати проведених експериментів, під час вібраційного сепарування, як у відривному так і безвідривному режимах, не завжди вдається досягти 100 %-го просіювання частинок через отвори (показник просіювання) решета. Це пояснюється траєкторією їх руху відносно отвору, орієнтуванням на площині, а також динамічною взаємодією із кромкою отвору (ударом). Тому у даній роботі запропоновано поєднати позитивні сторони робочого процесу сепарування у вібраційному полі з електричним. Запропоновано помістити зернову суміш на вібрувальній площині в електричне поле [9].

На рис. 2 показаний лабораторний вірець вібраційного електросепаратора. За його основу було взято двомасний вібротранспортер з електромагнітним приводом і налаштований на динамічну рівновагу [7, 8].

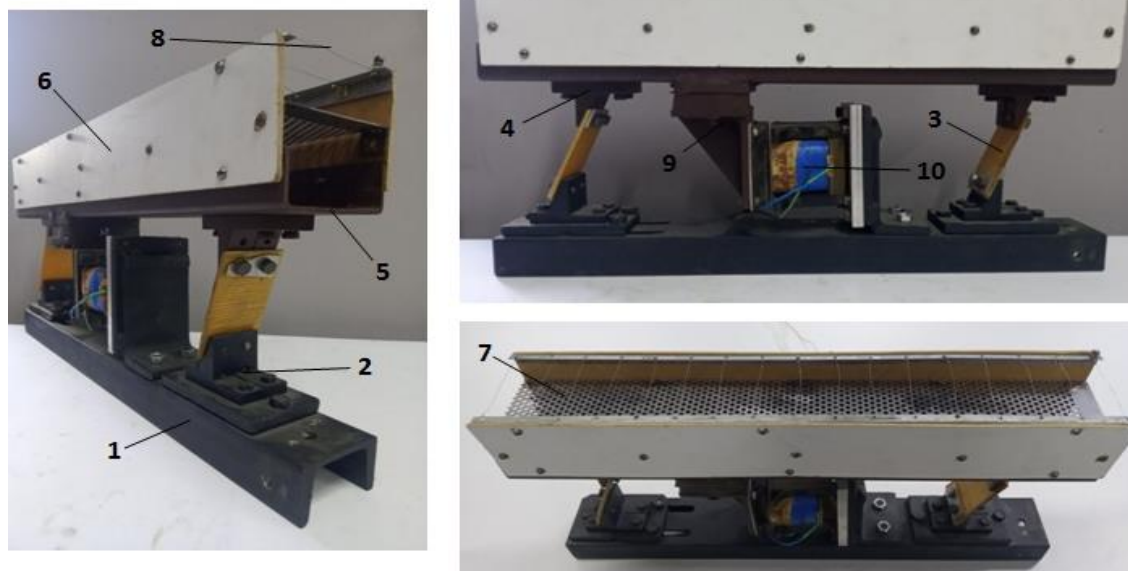
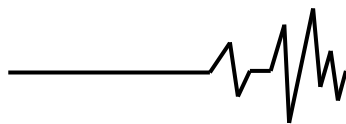


Рис. 2 – Лабораторний взірець вібраційного електросепаратора
1 – реактивна маса; 2, 4 – кронштейн; 3 – плоскі пружини; 5 – лоток;
6 – боковина; 7 – решето; 8 – електрод; 9 – якір електромагнітного вібратора;
10 – статор електромагнітного вібратора з котушкою

Для реалізації робочого процесу розділення зерна на його робочій масі (лотку) змонтовано систему електродів. Створення за їх допомогою в робочій зоні сепаратора електромагнітного поля впливатиме на орієнтування насінин на решеті, що в значній мірі поліпшить умови їх западання у його отвори.

Сепарувальний робочий орган разом із електродами, решетом і лотком для транспортування фракції зернової суміші, яка пройшла крізь отвори (прохід) через плоскі пружини 3 за допомогою кронштейнів 2 і 4 кріпляться до реактивної маси 1.

Сепарувальний робочий орган складається з діелектричних боковин 6, закріплених на стінках лотка 5. В середній його частині до боковин 6 прикріплене плоске решето 7 з круглими отворами. Зверху на відстані 30 мм над решетом встановлені з кроком 30 мм електроди 8 із сталюго дроту діаметром 0,3 мм. Довжина сепарувального вузла становить 500 мм, а ширина встановленого в ньому решета 7 – 80 мм. Використання решета з круглими отворами пояснюється тим, що необхідно було встановити оптимальні значення напруженості поля, за яких максимальна кількість насінин зорієнтуються своєю довшою віссю перпендикулярно до площини решета, а отже зможуть пройти крізь його отвори.

Коливання сепаратора генеруються за допомогою електромагнітного вібропривода, якір 9 якого закріплюється

знизу до лотка 5 робочого органу, а статор 10 – до реактивної маси 1.

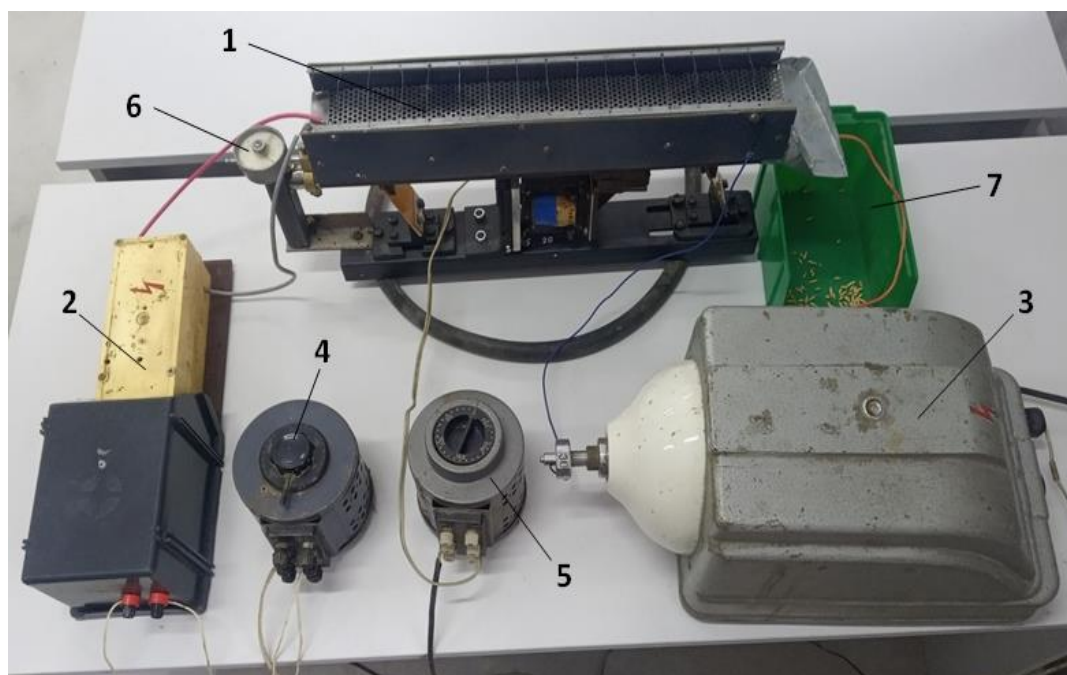
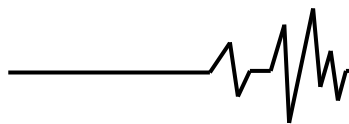
Вся конструкція пристрою встановлюється на основу (раму) за допомогою амортизаторів (на рис. не показано).

Сепаратор працює наступним чином. Напруга живлення змінного струму від електромережі подається на котушку 6 статора електромагніта через однопівперіодний випрямляч. Під час роботи у ньому виникає змінне магнітне поле, яке генерує збурювальне зусилля з частотою 50 Гц. Налаштування вібросепаратора на білярезонансний режим роботи забезпечує коливання робочого органу з необхідною амплітудою і незначним споживанням електроенергії.

Вібротранспортування прохідної і східної фракцій сепарованого матеріалу здійснюється завдяки встановленню пружин 3 під заданим кутом. Величина його обумовлюється рекомендаціями вібропереміщення для сепарування.

Експериментальні дослідження полягали у дослідженні процесу розділення насіння зернових культур на вібраційному електросепараторі з метою визначення оптимальних параметрів електричного поля та вібраційного режиму, за яких орієнтування насінин, а отже і повнота їх просіювання, будуть максимальними.

Для виконання експериментальних досліджень процесу розділення зерна на вібраційному електросепараторі використовувалась лабораторна експериментальна установка (рис. 3).



**Рис. 3 – Загальний вигляд дослідної лабораторної установки
1 – вібраційний електросепаратор; 2 – джерело високої напруги;
3 – кіловольтметр; 4, 5 – трансформатор-реостан; 6 – індикатор для вимірювання
амплітуди коливань; 7 – приймач продуктів сепарування**

Для досліджень використовували насіння пшениці, ячменю і вівса. Ці види культур були вибрані з точки зору того, що їх насінини мають еліптичну форму, однак відрізняються за коефіцієнтом еліптичності, а отже будуть по різному поводитись в електричному полі.

Орієнтування насінин на решеті вібраційного сепаратора під впливом електричного поля визначали за напруженості останнього в межах $E = 0 \dots 6,67$ кВ/см. До уваги брались тільки ті насінини, які змінили своє початкове положення або повністю зорієнтувались довгою віссю перпендикулярно до площини решета.

Під час досліджень було встановлено, що вплив електричного поля на насінини досліджуваних с.г. культур є неоднаковим. Найменше він проявляється на насінні пшениці, оскільки за максимального значення напруженості поля кількість зорієнтованих насінин (коефіцієнт орієнтування) становив біля 35 %. Для насіння ячменю цей показник був більшим, ніж у попередньому досліді в середньому на 12 %, а максимальне його значення склало 48 %. Найбільший ефект орієнтування насінин довгою віссю перпендикулярно до площини решета проявляється під час проведення досліджень з насінням вівса. Максимальний відсоток зорієнтованих насінин вівса за максимальної напруженості

електричного поля над решетом $6,67$ кВ/см становив 53 %.

Максимальне значення напруженості електричного поля в робочій зоні сепаратора дозволяє досягти максимального орієнтування насінин довгою віссю перпендикулярно до площини решета та вздовж осі його отворів. Однак, такі значення напруженості можуть призводити до ефекту утримування насінин в «підвішеному» стані і створення так званого псевдокиплячого стану насінневої суміші на поверхні решета. Це в свою чергу буде перешкоджати просіюванню насінин крізь отвори, що є небажаним для сепарування. Тому наступним етапом досліджень було визначення сукупного впливу напруженості електричного поля та параметрів процесу вібротранспортування насіння по решету на ефективність його просіювання та роботу сепаратора в цілому.

Оптимальні параметри роботи досліджуваного сепаратора під час сепарування зерна визначались за залежностями вмісту прохідної фракції у сході насіння від параметрів процесу транспортування по решету, а саме амплітуди коливання сепарувального вузла A за різних значень напруженості електричного поля E в зоні сепарування.

Амплітуда коливань сепарувального вузла задавалась в межах $A = 0,5 \dots 2$ мм. При $A < 1,5$ мм насінини рухаються без



відриву від поверхні решета з проковзуванням. Таке значення даного параметра дозволяє переміщуватись матеріалу по поверхні решета постійно контактуючи з ним. Це, в свою чергу, дозволяє насінинам отримувати максимальний заряд під впливом електричного поля високої напруженості.

Отримані результати досліджень ще раз підтвердили, що електричне поле по різному впливає на орієнтування зерна різних культур на поверхні решета сепаратора. Зі збільшенням напруженості поля відсоток зорієнтованих насінин зростає, що в свою чергу, вплинуло на інтенсивність їх просіювання крізь отвори решета. Так, під час сепарування зерна пшениці у вібро-електричному режимі за умови збільшення напруженості електричного поля до максимального значення показник просіювання зріс на 20...23 %, а вміст прохідної фракції у східній фракції, в порівнянні з вібраційним режимом, зменшувався до 36 %. Під час сепарування ячменю просіюваність зросла на 26...30 %, а вміст прохідної фракції у східній не перевищував 28 %. Під час обробки насіння вівса були отримані найкращий ефект сукупної дії вібраційного і електричного полів. Ефективність його просіювання крізь отвори решета зросла майже на 47 %, а засмічення східної фракції прохідною не перевищувало 22 %.

Під час проведення багатофакторного експерименту встановлено, що ефект орієнтування краще проявляється для насінин з більшою еліпсністю (зерна вівса) і менше для округліших насінин (зерно пшениці).

Значення амплітуди коливання сепарувального решета також впливає на інтенсивність його просіювання та вміст прохідної фракції у сході насіння. Для зерен пшениці і ячменю зі збільшенням амплітуди коливання ефект просіювання зростає. Це можна пояснити тим, що обертальний момент інерції, який отримували насінини мав більші значення за максимальних амплітуд і допомагав насінині повернутись довгою віссю перпендикулярно до площини решета.

Що стосується впливу параметрів вібрації решета на процес сепарування вівса, то під час експериментальних досліджень встановлено, що зі збільшенням амплітуди понад 1,2 мм просіюваність зменшувалась і прохідна фракція насіння потрапляла у східну. Це можна пояснити тим, що хоч максимальне значення напруженості електричного поля в робочій

зоні сепаратора дозволяє отримати максимальне орієнтування насінин довгою віссю перпендикулярно до площини решета, однак це може призводити до ефекту утримування насінин в «підвішеному» стані і створення так званого «псевдокиплячого» стану насінневої суміші на поверхні решета. Це перешкоджає просіюванню насінин крізь отвори, що є небажаним для сепарування.

Також в результаті досліджень було встановлено, що застосування електричного поля у вібраційному сепараторі дозволяє збільшити продуктивність його роботи. Свідченням цього стало зменшення питомого навантаження решета (шлях просіювання) вздовж напрямку транспортування на 18...25 %.

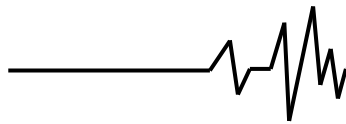
Висновок. На підставі одержаних результатів встановлено, що використання електричного поля суттєво покращує робочий процес сепарування. Порівняльна характеристика двох робочих процесів (з електричним полем і без нього) вказує, що за напруженості електричного поля в робочій зоні сепарування $E = 5...6,5$ кВ/см вдається суттєво збільшити показник просіюваності насінин крізь отвори решета.

Орієнтування насінин на сепарувальній площині під час її руху у безвідривному режимі ($A = 1...1,5$ мм) під дією електричного поля високої напруженості забезпечує краще їх проходження крізь отвори решета та зменшення засмічення східної фракції прохідною.

В процесі вібро-електричного сепарування значно скорочується шлях просіювання (питоме навантаження решета), а це в свою чергу уможливорює зменшити необхідні геометричні розміри робочого органу машини, а отже і її загальну металомісткість.

Список використаних джерел

1. Гортинский В.В., Демский А.Б., Боринский М.А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. Москва: Колос, 1980. 304 с.
2. Гусев В. А., Дударев І. М., Токарчук М. В. Обзор конструкций сепараторов сипких матеріалів. *Сільськогосподарські машини: зб. наук. Статей*. Луцьк: Луцький НТУ, 2019. Вип. 42. С. 20-28.
3. Заїка П. М. Теорія сільськогосподарських машин. Очистка і сортування насіння. Харків: Око, 2006. Т. 3. 408 с.



4. Захаров Д.О. Електрофізичні методи обробки сільськогосподарської продукції. *Методичні рекомендації. Навчальне видання.* Миколаївський НАУ, 2017. 39 с.

5. Коруняк П.С., Керницький І.С. Вібраційні машини у виробничих процесах і технологіях: навчальний посібник. Львів: Сполом, 2019. 436 с.

6. Повидайло В.О. Вібраційні процеси та обладнання. Львів: НУ "Львівська політехніка", 2004. 248 с.

7. Швець О.П. Спосіб інтенсифікації процесу розділення зерна на решетах. *Вчені ЛНАУ виробництва: Каталог інноваційних розробок.* 2020, Вип. XX. – Львів: ЛНАУ. С. 53.

8. Шенбор В.С. Беспалов А.Л. Деякі результати створення і дослідження вібраційних конвеєрів-сепараторів. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: Український міжвідомчий наук.-техн. зб.* Львів, 2005. Вип. 39. С. 39 - 44.

References

1. Gortinskiy V.V., Demskiy A.B., Borinskiy M.A. (1980). *Processy separirovaniya na zernopererabatyvayuzchih predpriyatiyah.* Moskva: Kolos.

2. Husiev, V. A., Dudariiev I. M., & Tokarchuk M. V. (2019). *Ohliad konstruktsii separatoriv syppykh materialiv. Silskohospodarski mashyny: zb. nauk. statei,* 42, 20-28.

3. Zaika, P. M. (2006). *Teoriia silskohospodarskykh mashyn. Ochystka i sortuvannia nasinnia.* Kharkiv: Oho.

4. Zakharov D.O. (2017). *Elektrofizychni metody obrobky silskohospodarskoi produktsii. Metodichni rekomendatsii. Navchalne vydannia.* MNAU.

5. Koruniak P.S, Kernytsky I.S. (2019). *Vibraciini mashyny u vyrobnychyh procesah i tehnologiyah. Navchalnyy posibnyk.* Lviv: Spolom.

6. Povydaylo V.O. (2004). *Vibratsiini protsesy ta obladnannia.* Lviv: NU "Lvivska politekhnikha".

7. Shvets O.P. (2020). *Sposib intensyfikatsii protsesu rozdilennia zerna na reshetakh. Vcheni Lvivskoho natsionalnogo ahrarnoho universytetu vyrobnytstvu: Katalog innovatsiinykh rozrobok.* 20, 53.

8. Shenbor V.S., Bepalov A.L. (2005). *Deyaki rezultaty stvorennia i doslidzhennia vibraciynykh konveyeriv-separatoriv. Avtomatyzaciya vyrobnychyh*

procesiv u mashynobuduvanni ta prykladobuduvanni. 39, 39-44.

INCREASE OF WORK EFFICIENCY OF THE VIBRATING SEPARATOR

Annotation. Vibrating separation on sieves is one of the most common ways of loose materials separating, and seeds of agricultural crops in particular. Vibrating separators have a number of advantages, as they allow combining the processes of transportation and material separation. In the designs of the existing seed cleaning machines of this type, from the point of view of the design parameters of the working body, setting and mode of operation, it is difficult to improve the indicator of the completeness of the separation of grain mixtures into fractions. Therefore, there is a need to find ways to intensify this process, to develop and study the operation of technical means for their implementation.

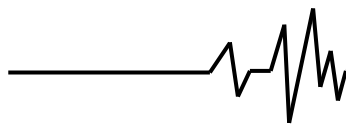
One of the ways to improve the conditions for the movement of components of grain mixtures through the holes of the sieves is to create an electric field above them. Theoretically, there is a certain initial value of the intensity of the electric field, at which the seed will start to orient itself in it. The optimal tension value will be the one at which the degree of orientation of the seeds on the oscillating sieve in the longitudinal direction will be maximum (when their longitudinal axis will be perpendicular to the sieve).

The paper describes the results of the process study of separating seeds of cereal crops on a vibrating electric separator and substantiates the optimal values of the electric field intensity E, which can achieve the maximum effect of seed orientation on the sieve.

The results of experimental studies showed that the effect of the electric field on the seeds of different crops is not the same. It reveals itself the least on wheat seeds, since the quantity of seeds oriented in the electric field was about 35%. For barley seeds, the value of the studied indicator was 48%. The maximum percentage of oriented oat seeds was about 53% at the maximum intensity of the electric field of 6.67 kV/cm over the sieve.

It was revealed that the orientation of the seeds on the sieve affects the intensity of its sieving through the holes. Under conditions of maximum orientation, the index of sifting of wheat seed increased by 20...23%, barley seed - by 26...30%, oats seed - by 47%.

Keywords: vibrations, vibrating electric separator, electric field, cereal seeds, separation, sieving efficiency.



ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Швець Олексій Петрович – кандидат технічних наук, в.о. доцента кафедри машинобудування Львівського національного університету природокористування (вул. Шевченка, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл. Україна, 80381, e-mail: shvets2882@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8988-9410>).

Коруняк Петро Степанович – кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування Львівського національного університету природокористування (вул. Шевченка, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл. Україна, 80381, e-mail: petrokoruniak@gmail.com).

Баранович Сергій Миколайович – кандидат технічних наук, в.о. доцента кафедри машинобудування Львівського національного університету природокористування (вул. Шевченка, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл. Україна, 80381, e-mail: baranovich1977@ukr.net).

Березовецький Сергій Андрійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування Львівського національного університету природокористування (вул. Шевченка, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл. Україна, 80381, e-mail: siko@email.ua).

Oleksiy Shvets - candidate of technical sciences, acting Associate Professor of the Mechanical Engineering Department of the Lviv National Environmental University (1 V. Velykoho Street, Dublyany, Lviv District, Lviv Region, Ukraine, 80381, e-mail: shvets2882@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8988-9410>).

Petro Koruniak - candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Mechanical Engineering of the Lviv National Environmental University (1 V. Velykoho Street, Dublyany, Lviv District, Lviv Region, Ukraine, 80381, e-mail: petrokoruniak@gmail.com).

Serhiy Baranovych – candidate of technical sciences, acting Associate Professor of the Mechanical Engineering Department of the Lviv National Environmental University (1 Shevchenka Street, Dublyany, Lviv District, Lviv Region, Ukraine, 80381, e-mail: baranovich1977@ukr.net).

Serhiy Berezovetskyi – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Mechanical Engineering of the Lviv National Environmental University (1 Shevchenka Street, Dublyany, Lviv District, Lviv Region, Ukraine, 80381, e-mail: siko@email.ua).