

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЧИСЕЛЬНОГО  
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СЕПАРАЦІЇ ВІДХОДІВ  
НАСІННЄВОЇ СУМІШІ СОНЯШНИКУ І  
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ**

Кудрявцев І.М.<sup>1</sup>, здобувач НС доктора філософії.

Кошулько В.С.<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,

Мельник М.М.<sup>2</sup>, технічний директор.

<sup>1</sup>Дніпровський державний аграрно-економічний університет,  
м. Дніпро, Україна.

<sup>2</sup>ТОВ НВО «Сортувальні машини», м. Дніпро, Україна.

**Постановка проблеми.** Відповідно до концепції циркулярної економіки (ЦЕ), до якої приєдналася Україна, рішення завдань полягає у сприянні зменшенню використання ресурсів та енергії через реалізацію інноваційних механізмів, таких як ресурсозаощадження та енергозбереження. В сьогоденних умовах, коли з'явилися нові виклики у вигляді необхідності відновлення та покращення екологічної ситуації та нагальної потреби у забезпеченні продовольчої безпеки України, додатковим ресурсом мають стати відходи сільського господарства.

В економічних умовах сьогодення найефективніший арсенал заходів пропонується у межах концепції Індустрія 4.0 (І 4.0) [1]. Циркулярна економіка спрямована на максимально ефективно використання ресурсів та мінімізацію відходів, забезпечуючи рівновагу в сферах виробництва, обігу та споживання. У свою чергу, Індустрія 4.0 використовує цифрові технології, щоб автоматизувати виробничі процеси та збільшити продуктивність діяльності. Концепція Індустрії 4.0 описує використання передових цифрових технологій, таких як Інтернет речей (ІоТ), робототехніка, штучний інтелект (ШІ) та інше для покращення виробничих та промислових процесів.

Олійножирова галузь України, найдинамічніша галузь переробної промисловості, яка генерує відходів до 22% від об'єму переробки насіння, стикається з проблемою відсутності засобів технологічного оснащення для переробки відходів олійної сировини. Згідно до досліджень, сміття насіння містить до 45% сировини, яка за морфологічними та біохімічними показниками може піддаватися переробці на харчові та кормові потреби, а із лушпиння соняшника можливо вилучити від 2 до 10% олійної домішки та повернути її до основного процесу.

Створення інноваційного обладнання для переробки відходів олійної сировини є нагальним завданням для агроінженерії.

**Основні матеріали дослідження.** Сортування зерна та відходів –

це різнопланова складна науково-технічна проблема, яка залежно від постановки завдання має різноманітні рішення. Даною проблемою займалися українські науковці: Загородній О. І. і Богомолів О. В., Козаченко О. В., Бакум М. В., Алієв Е. Б., Котов Б. І., Степаненко С. П. та інші. В їх працях використовуються різноманітні способи аеродинамічної сепарації.

Вимоги при постановці завдання щодо технічного рівня та якості засобів технологічного оснащення стрімко зростають, що вимагає від галузевого машинобудування адекватної реакції. Інновації обладнання вимагають застосування не тільки окремих інструментів із арсеналу Індустрії 4.0, але й комплексного підходу.

Перш за все, необхідним є дослідження показників, притаманних відходам, розробка технологічних схем обладнання з можливостями застосування фізичних принципів, які раніше не використовувалися у сортувальному обладнанні, пропозиції інноваційних рішень мехатроніки, вибір периферійних сенсорів та розробка програмного забезпечення, адаптація технологічних параметрів, інтеграція для застосування інструментарія IoT.

Спираючись на дослідження науковців та згідно даних (табл. 1), [2], найбільш прийнятним методом сортування сміття насіння та лушпиння соняшника може бути обраний аеродинамічний метод оскільки він дав найближче значення вмісту олійної/зернової домішки у порівнянні з результатами ручного сортування.

*Таблиця 1*

**Результати порівняльного сортування сміття насіння сільськогосподарських культур**

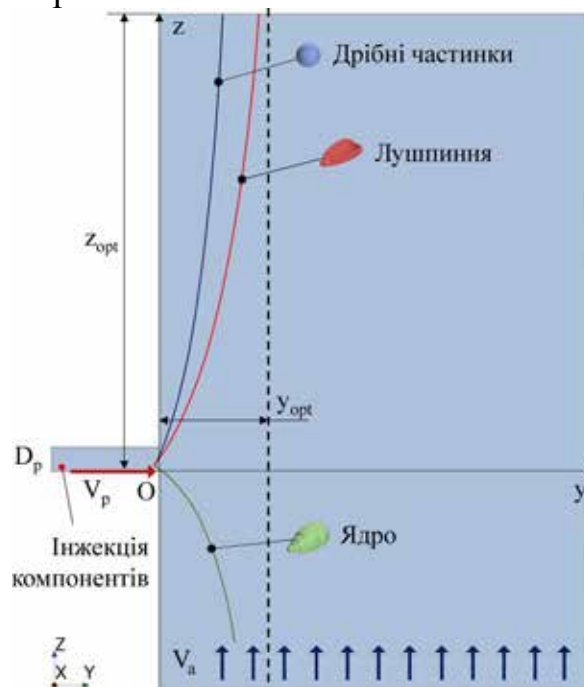
Спосіб сортування	Одиниця вимірювання	Показник вмісту зернової\олійної домішки		
		вміст у смітті зерна пшениці	вміст у смітті насіння соняшника	вміст у лушпинні насіння соняшника
Ручне сортування	%	25–40	35,0–45,0	5,0–10,0
Ситове сортування	%	3–4	1,5–2,0	1,5–2,0
Аеродинамічне сортування	%	21–30	40,0	4,0–9,0
Пневматичне сортування	%	Блокування фідера та злежування суміші		
Фотоелектронне сортування	%	Відмова обладнання		

За даними [2].

Решітний, фотоелектронний, пневматичний методи не можуть бути застосовані у конструкції сортувальної машини для відходів, крім того, із різновидів аеродинамічної сепарації найбільші переваги надає спосіб сортування у висхідному вертикальному повітряному потоці через спрямованість векторів сил, які діють на частинки суміші, вздовж однієї вертикальної осі. Це надає змогу симпліфікації на 2/3 системи керування сортуванням.

За обраним прототипом [3] визначена технологічна схема сортування та виконано чисельне моделювання процесу сепарації відходів насінневої суміші соняшнику у пневмосепаруючому каналі [4, 5].

В результаті першого етапу чисельного моделювання процесу сепарації компонентів відходів насінневої суміші соняшнику в пневмосепаруючому каналі отримані траєкторії руху її компонентів, які представлені на рис. 1.



**Рис. 1. Траєкторії руху компонентів відходів насінневої суміші соняшнику в пневмосепаруючому каналі (за даними [4]).**

Обробка результатів моделювання в програмному пакеті Wolfram Cloud дозволила розрахувати рівняння регресії другого порядку залежності горизонтальної відстані польоту компонентів (лущиння соняшника і дрібних частинок) від ефективного діаметра, швидкості подачі компонентів і швидкості повітряного потоку. З урахуванням прийнятих умов ефективності процесу сепарації визначено поперечний переріз пневмосепаруючого каналу – квадрат із стороною 220 мм.

В результаті другого етапу чисельного моделювання процесу взаємодії потоків відходів насінневої суміші і повітря в

пневмосепаруючому каналі з використанням програмного пакету Wolfram Cloud розраховано рівняння регресії другого порядку залежності вмісту ядра соняшника в області забірника ядра  $\eta_{k-k}$ , продуктивності процесу сепарації  $q$  і об'ємних витрат повітря (продуктивність генератора повітряного потоку)  $Q_a$  від висоту шару відходів насінневої суміші соняшника, що подається,  $h_p$  і швидкості повітряного потоку  $V_a$ . Враховуючи умову максимізації  $\eta_{k-k}$  і  $q$  при мінімальному значенні  $Q_a$  отримані раціональні значення факторів досліджень:  $h_p = 0,018$  м,  $V_a = 3,42$  м/с. При цьому  $\eta_{k-k} = 0,94$ ,  $q = 122,9$  кг/год,  $Q_a = 588$  м<sup>3</sup>/год.

Експериментальний зразок адаптивної сортувальної машини був досліджений в умовах діючого виробництва на одному із провідних підприємств олійножирової галузі України. Дослідний зразок був оснащений автоматичною системою керування, засобами IoT, дані процесу використовувалися у АСУТП підприємства та у підрозділах підприємства-виробника, що забезпечило оперативний доступ до бази даних засобу. Доведено, що при побудові довірчих інтервалів для експериментальних даних та теоретичної залежності, дані мають подібний характер, і умова ( $R_n = R_3$ ) виконується при схожих параметрах. Але теоретичні результати не потрапляють у межі інтервалів довіри, що підтверджує їх адекватність з довірчою ймовірністю 95%.

В умовах діючого виробництва було виконане додаткове дослідження, доведено, що теоретичні дослідження компонентів суміші проведені без врахування взаємного впливу компонентів суміші, яка набула нових якостей через явища емерджентності.

Так, лушпиння соняшника, сміття соняшника мають переважну кількість частинок повздовжніх розмірів, які мають розгалуження тіла частинок. У процесі генерації псевдорозрідженого шару частинки суміші вступають у зачеплення одне з одним, ущільнюються та утворюють конгломерати, тобто локальні ущільнення, що характеризується збільшенням внутрішнього опору суміші, збільшенням показника опору зсуванню, невизначеністю кута природного укосу та ін. Конгломерати перешкоджають стратифікації (розшаруванню) суміші, особливо частинок суміші невеликих розмірів, та як визначено дослідями, масова частка жиру та екстрактивних речовин в абсолютно сухій речовині складає майже 10% за рахунок щільної фракції розмірами 0,2-1,0 мм, яка залишаються у суміші та не відсортовуються, а це майже половина сировини, яку можливо використати для потреб виробництва.

Для подолання явищ емерджентності запропонована сепарація сипучої суміші у текучому двостадійному середовищі [6] з послідовним використанням віброінерційного та пневматичного способів генерації псевдорозріджених середовищ, використання у другій стадії способу завислого псевдорозрідженого шару, створення

псевдорозрідженого шару низької концентрації у другій стадії способу, що дає змогу додаткового виділення зернової або олійної домішки з розмірами більшими ніж частки аспіраційного виносу, але меншими ніж спроможність пневмосортувального способу видаляти частки розмірами 0,2-1,0мм.

Приведення суміші до початкових умов дослідження за рахунок додаткового способу живлення підтвердила отримані раціональні значення факторів досліджень:  $h_p = 0,018$  м,  $V_a = 3,42$  м/с. При цьому  $\eta_{k-k} = 0,94$ ,  $q = 122,9$  кг/год,  $Q_a = 588$  м<sup>3</sup>/год.

**Висновки.** Таким чином, дослідженнями доведено, що за умови додержання раціональних конструктивних та режимних параметрів адаптивного засобу для сортування відходів олійної сировини, мається можливість вилучення олійної домішки у кількості >95%.

Процес сортування потребує тонкого налаштування, комплексної автоматизації та адаптивності процесу.

#### **Список використаних джерел**

1. Гришова І.Ю., Яковенко А.О., Степанова М.М. Стійкість циркулярної економіки в контексті розвитку Індустрії 4.0. «Аграрні інновації», №26, 2024. С.167-174. ISSN 2709-4405. DOI <https://doi.org/10.32848/agraar.innov.2024.26.25>

2. Кудрявцев І.М., Луценко М.В., Чурсінов Ю.О. Техніко-економічне обґрунтування доцільності сортування відходів зернових та олійних культур. Наука, технології, інновації. - № 2 (22) 2022. С. 61-67.

3. Кудрявцев І.М., Бардадим О.В. Патент на корисну модель України №155711. МПК А01F 12/44 (2006.01), В07В 4/02 (2006.01). Сортувальний агрегат колонного типу для тонкого очищення насінневих матеріалів. Заявка № u2023 00562. Заявл. 15.02.2023, Опубл. 03.04.2024, Бюл.№14

4. Кудрявцев І.М. Чисельне моделювання процесу сепарації відходів насінневої суміші соняшнику в пневмосепаруючому каналі аеродинамічного сепаратора. Техніка, енергетика, транспорт АПК, № 2 (125) / 2024, с.47-55. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-2. <http://tetapk.vsau.org/uk/particles/chisel-ne-modelyuvannya-procesu-separaciyi-vidhodiv-nasinnyevoyi-sumishi-sonyashniku-v-pnevmoseparuyuchomu-kanali-aerodinamichnogo-separatora>.

5. Алієв Е. Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: Аграрна наука, 2023, 340 с. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9>.

6. Бардадим В.К., Кудрявцев І.М., Бардадим О.В., Ярошкін В.П., Мельник С.М., Мельник М.М. Патент на корисну модель України № 156504, МПК (2024.01). А01F 12/44 (2006/01), В07В 4/00. Спосіб сепарації сипучої суміші у текучому двостадійному середовищі. Заявник ТОВ НВО «Сортувальні машини», № u 2023 05759. Заявл. 29.11.2023. Опубл. 03.07.2024, Бюл. №27.