УДК 631.561.6 https://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2025-2-37(51)-13

НАУКОВО-ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ СЕПАРАЦІЇ ВИСОКООЛІЙНИХ ВІДХОДІВ СОНЯШНИКА

Мельник С., аспірант
e-mail: stealths1978@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8151-223X
Кошулько В., канд. техн. наук, доцент,
e-mail: koshulko.v.s@dsau.dp.ua, https://orcid.org/0000-0002-1139-5074
Кудрявцев І., Ph.D.,
e-mail: kudravcevigor898@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9939-7014
Дніпровський державний аграрно-економічний університет
Бардадим О.,
e-mail: alik777bar@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8594-5059
Мельник М.,
e-mail: mykhaylo.melnyk@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2252-2235
ТОВ НВО «Сортувальні машини»

Анотація

Мета. *Науково-технічне обґрунтування вибору ефективних методів сепарації високоолійних відходів переробки соняшника з урахуванням їхніх фізико-механічних властивостей, підвищеної вологості та морфометричної схожості компонентів.*

Методи. *Проведено порівняльні експериментальні дослідження із застосуванням 11 типів лабораторного сортувального обладнання, що реалізують геометричні, гравітаційні, оптичні, магнітні та аеродинамічні принципи розділення. Використано модельну суміш відходів насіння соняшника із заданим вмістом олійної домішки (41%) та контрольованою вологістю 9,0 ± 0,2%. Ефективність оцінювалася за зміною частки олійної домішки до і після сепарації, а також аналізувалися фізичні механізми обмеження процесу.*

Результати. *Установлено, що традиційні геометричні, морфометричні й оптичні методи практично не забезпечують вилучення олійної фракції через адгезійні явища, конгломерацію часток і близькість їхніх фізичних параметрів. Часткову ефективність засвідчили гравітаційні та барабанні системи, однак рівень очищення залишався недостатнім. Найвищі результати досягнуто при застосуванні пневматичних та аеродинамічних методів, особливо в умовах керованого повітряного потоку та псевдозрідження шару. Мінімальний залишковий вміст домішки (8,54%) отримано на денсиметричній колоні, що підтверджує визначальну роль аеродинамічних характеристик частинок у процесі розділення.*

Висновки. *Для ефективної сепарації високоолійних відходів соняшника доцільно використовувати системи, базовані на взаємодії частинок із повітряним потоком, які забезпечують руйнування адгезійних зв'язків і стратифікацію суміші за густиною та парусністю. Виявлено критичний вплив вологості та конгломерації часток на якість процесу. Отримані результати можуть бути використані для розробки спеціалізованих лабораторних аналізаторів і вдосконалення технологій переробки відходів олійно-жирової галузі.*

Ключові слова: *сепарація, відходи соняшника, олійна домішка, аеродинамічне сортування, пневматична сепарація, псевдозрідження, лабораторне обладнання, конгломерація часток, вологість сировини.*

Вступ. Сучасна агроінженерія стикається з критичним завданням підвищення ефективності переробки біомаси. Відходи переробки соняшника (ворох, лушпиння, дрібні фракції ядра) традиційно розглядалися як побічний продукт низької

вартості, що використовується переважно для спалювання [Коломієць та ін., 2018; Shaukat, et al., 2021; Гапонич та ін., 2023; Havrysh et al., 2023]. Однак детальний аналіз складу цих відходів свідчить про наявність значної кількості олійної фракції – цілих і битих ядер, які не були вилучені на етапах первинного очищення та шеретування [Geletukha et al., 2020]. Втрата цієї фракції не лише знижує загальний вихід олії, але й ускладнює подальшу переробку лушпиння, наприклад, у паливні пелети через надлишковий вміст олії, що впливає на роботу прес-грануляторів [Чурсінов та ін., 2022].

Існуючі технологічні лінії на олійноекстракційних заводах здебільшого базуються на класичній «геометричній парадигмі» сепарації. Вона передбачає використання решітних сепараторів (скальператорів, решітних сепараторів) і трієрів, які ефективно працюють із сухим, сипучим зерном кондиційної вологості (до 7-8% для соняшника). Однак вторинна сировина часто має підвищену вологість (9-10%) і специфічну морфологію. При такому рівні вологості на поверхні частинок виникають капілярні сили та адгезійні зв'язки, що кардинально змінює реологічну поведінку матеріалу [Chavoshgoli et al., 2014; Kudriavtsev, 2024]. Просте перенесення методів очищення сухого зерна на вологі відходи є помилковим. Решета миттєво забиваються, а вібрація лише ущільнює матеріал. Окремим напрямком є спроба інтеграції оптичних сортувальників (фотосепараторів). Хоча ця технологія є революційною для фінішного очищення, її застосування для первинної сепарації високозасміченого та запиленого вороху соняшника наштовхується на фізичні обмеження, пов'язані з розсіюванням світла в запиленому середовищі [Алієв, 2019].

Відповідно до чинних стандартів на насіння соняшникас у складі олійної домішки виділяютья дев'ять фракцій [Пешук & Носенко, 2008]. За даними досліджень, їхні фізико-механічні властивості є близькими за основними показниками, що ускладнює розділення суміші та коректне визначення загального вмісту олійної домішки за допомогою лабораторних машин, конструктивно орієнтованих лише на один принцип поділу зернової маси.

Зокрема відокремлення лушпиння соняшника на решітних лабораторних аналізаторах за морфометричними ознаками є неможливим, оскільки сюди потрапляють також мінеральні домішки, фрагменти ядра, лушпиння, невиповнене насіння та інші компоненти з близькими геометричними параметрами. При цьому частина таких складових є непридатною для використання у виробництві харчових і кормових продуктів, що знижує точність оцінювання якості сировини.

Метою цієї роботи є науково-технічне обґрунтування вибору методу сепарації для специфічного типу сировини – вологих відходів соняшника. Авторами структуровано результати експериментальних досліджень, проведених на модельному середовищі, та теоретично пояснено фізичних процесів, що унеможливлюють використання геометричних методів і надають перевагу аеродинамічним системам із псевдозрідженням.

Методи та матеріали. Розділення таких гетерогенних сумішей, як високоолійні відходи соняшника, залежить від властивостей окремих частинок у робочій зоні сепаратора. Якщо частинки схожі за розміром і формою або злиплися між собою, геометричні критерії втрачають значення, і вирішальну роль набувають аеродинамічні властивості компонентів.

Пневмосепарація базується на взаємодії частинок з потоком повітря. На кожну частинку у висхідному повітряному потоці діють дві протилежні сили: сила тяжіння та аеродинамічний опір. Легка домішка, наприклад, лушпиння, має меншу густину та велику «парусність», тому сила опору повітря переважає силу тяжіння, і частинки піднімаються вгору. Важке ядро соняшника має більшу масу та компактну форму, тому сила тяжіння переважає, і воно опускається вниз.

Ключовим показником для ефектив-

ного розділення є швидкість повітряного потоку, яка повинна знаходитися між швидкостями витання легкої та важкої фракцій. Тоді легкі частинки виносяться потоком, а важкі залишаються на дні. Ефективність сепарації залежить від різниці цих швидкостей та від того, наскільки властивості частинок різко відрізняються, тобто наскільки добре можна їх розділити аеродинамічно.

Таким чином, робоча гіпотеза дослідження базується на твердженні, що для сумішей із частинками аналогічних розмірів і форм (наприклад, високоолійні відходи соняшника) саме аеродинамічні фактори визначатимуть успішність процесу, водночас класичні геометричні методи, основані на решітках або трієрах, виявляться малоефективними.

Аналіз застосованого у дослідженні технічного та технологічного обладнання для визначення домішок у насіннєвій сировині представлено авторами у роботі Melnyk (2025, b). Зважаючи на висновки евристичного аналізу, що містяться в цьому дослідженні, для сортування залучено 11 моделей сортувальних машин, які відрізняються типами сепаратора та методом технологічного процесу розділення суміші (рис 1).

У цьому дослідженні критеріями оцінювання обрано показники вмісту олійної домішки у сміттi насіння соняшника до та після сортування. Дослідження виконувалися із застосуванням заздалегідь підготовленого модельного середовища з відомою часткою олійної домішки. Для формування вихідних компонентів у виробничих умовах олійно-жирового підприємства відібрано 5 кг сміття насіння, яке містило олійну, мінеральну та органічну складові. Олійну домішку вилучали шляхом п'ятикратної ітераційної обробки на аеродинамічному сепараторі.

З урахуванням технологічної ефективності аеродинамічної сепарації на рівні 70-80% суміш органічної та мінеральної домішок додатково піддавали багаторазовій обробці з метою максимального вилучення залишкової олійної фракції. Контроль якості розділення здійснювався методом ручного розбирання, після чого всі виділені компоненти олійної домішки були об'єднані. Із 1,23 кг олійної домішки та 1,77 кг суміші органічної й мінеральної домішок формувалася модельна суміш із визначеним вмістом олійної домішки – 41%. Особливу увагу приділено підтриманню вологості суміші на рівні 9,0% ± 0,2% для забезпечення коректності та відтворюваності результатів.

Якість сортування визначалася як різницю між початковим і кінцевим вмістом олійної домішки. Перед проведенням кожного наступного випробування на іншому типі сортувального обладнання модельну суміш перевіряли на відповідність вихідним параметрам (вміст олійної домішки, вологість, однорідність) і, у випадку їхньої зміни після попередньої сепарації, повторно формували та доводили до вже визначених значень.

Показник виробничої потужності не підлягав критичному аналізу в цьому дослідженні, оскільки основну увагу було зосереджено на оцінюванні якості сортування. У межах дослідження пріоритетом визначено досягнення максимальної якості процесу, а не оптимізацію його продуктивності.

Результати. Узагальнені результати досліджень ефективності різних методів сепарації подано на порівняльній діаграмі (рис. 2). На діаграмі відображено показник олійної домішки (виражений у відсотках) до та після застосування кожного з протестованих лабораторних засобів сортування.

Аналіз графічних даних свідчить про суттєві відмінності в ефективності досліджуваних способів розділення. У лівій частині діаграми представлено результати решітної (SLN 3), трієрної (LA-T), морфометричної (LA-BG), гравітаційної (LA-HT), оптичної (ZL1) та магнітної (MCC) сепарацій. Висота стовпчиків для цих методів відповідає початковому рівню засміченості – 41%, що свідчить про фактичну відсутність зниження вмісту олійної домішки та, відповідно, нульову

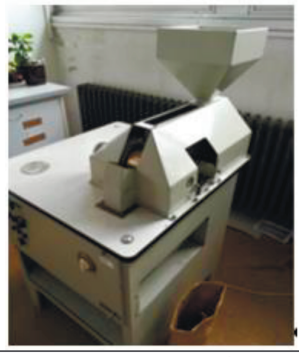
		
Лабораторний аспіратор «RPA-120» («Reiter Seed Processing», Німеччина)	Лабораторний решітний сепаратор «SLN 3» («PFEUFFER GmbH», Німеччина)	Лабораторний циліндричний барабанний сепаратор «Cimbria LAB ZS», (Австрія)
		
Лабораторний трієр «Westrup LA-T» (Данія)	Лабораторна стрічкова грейдерна машина «Westrup LA-BG» (Данія)	Лабораторний гравітаційний спіральний сепаратор «Westrup LA-HT» (Данія)
		
Лабораторна вібропневматична сортувальна машина «Westrup LA-K» (Данія)	Лабораторний аеродинамічний сепаратор «Westrup LA-DUAL» (Данія)	Інтелектуальний фотосепаратор «ZL1» («HEFEI», Китай)
		
Лабораторний магнітний сепаратор «MCC Lilliput» (Румунія)	Денсиметрична сортувальна та очищувальна колона «HALDRUP SARL DC-20» (Франція)	

Рисунок 1 – Обладнання для визначення домішок у насіннєвій сировині

ефективність за заданих умов експерименту. Це підтверджує обмеженість методів, заснованих переважно на геометричних і візуальних ознаках, для розділення компонентів із близькими морфометричними характеристиками.

У центральній частині діаграми наведено результати для обладнання Lab ZS та LA-K, для яких спостерігається часткове зниження залишкової засміченості до рівня 32-35%. Це свідчить про помірну ефективність розділення за густиною, однак отримані значення залишаються недостатніми для забезпечення високої якості очищення.

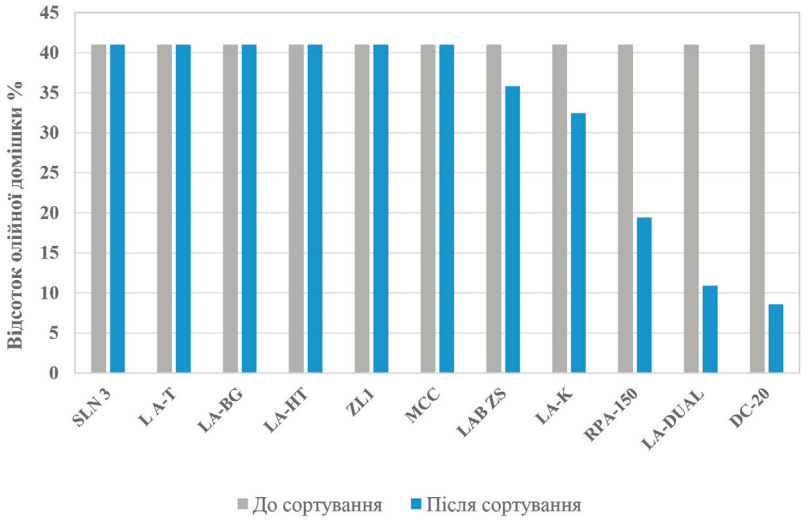


Рисунок 2 – Показники відсотку олійної домішки до та після сортування

Найбільш виражене зменшення показника зафіксовано у правій частині діаграми, де представлені результати аеродинамічних методів сепарації. Залишкова засміченість суттєво знижується, досягаючи мінімального значення 8,54% при використанні денсиметричної колони DC-20. Отримані дані графічно та кількісно підтверджують перевагу аеродинамічного принципу розділення над методами, що базуються на геометричних характеристиках частинок, для цього типу сировини з близькими фізико-механічними властивостями компонентів.

Порівняльну ефективність вилучення олійної домішки із зазначенням фізичного механізму обмеження наведено в таблиці 1.

Аналіз табличних даних підтверджує суттєву різницю в ефективності методів залежно від фізичного принципу розділення. Геометричні способи сепарації (решітний, трієрний, оптичний) не забезпечили зниження вмісту олійної домішки, що обумовлено адгезійними явищами, морфометричною аналогічністю компонентів і впливом пилової фракції на якість оптичного розпізнавання. Барабанний сепаратор продемонстрував незначне покращення результату через обмежену дезагломерацію частинок, водночас пневмостіл забезпечив середній рівень очищення завдяки частковій стратифікації шару матеріалу. Найвищі показники ефективності досягнуто при застосуванні аеродинамічних методів: аспірація суттєво зменшила вміст домішки за рахунок турбулентних потоків, а системи з ламінарним розшаруванням та псевдозрідженням забезпечили найглибше розділення. Максимальний ефект зафіксовано для денсиметричного сепаратора, що свідчить про визначальну роль керованих аеродинамічних процесів у розділенні цієї суміші.

Обговорення. Отримані результати порівняльного аналізу 11 моделей лабораторного обладнання підтверджують складність сепарації відходів соняшника, що корелює з дослідженнями Shukla et al. (1992). Автори наголошували, що близькість фізико-механічних властивостей фракцій олійної домішки робить майже неможливою якісну сепарацію при використанні лише одного способу подільності. Наше дослідження підтвердило цю тезу: решітні сепаратори («SLN 3», «Lab ZS») та трієри («LA-T») не продемонстрували жодної ефективності у вилученні олійної домішки з модельної суміші, залишивши її показник на початковому рівні 41%.

Водночас застосування пневматичних та аеродинамічних методів дало змогу суттєво покращити результати. Найкращі показники сортування на приладах

Таблиця 1 – Порівняльна ефективність обладнання для вилучення олійної домішки у насіннєвій сировині

Тип сепаратора	Модель	Залишковий вміст домішки, %	Ефективність процесу	Фізичний механізм обмеження
Решітний (геометричний)	SLN 3	41,00	Незадовільна (0%)	Адгезія, трибологічне блокування
Трієрний (геометричний)	LA-T	41,00	Незадовільна (0%)	Морфометрична подібність компонентів
Стрічковий (морфометричний, фрикційний)	LA-BG	41,00	Незадовільна (0%)	Недостатня відмінність коефіцієнтів тертя та морфометрична подібність компонентів
Гравітаційний (спіральний)	LA-HT	41,00	Незадовільна (0%)	Перекриття щільності та форми частинок
Оптичний (фотосепаратор)	ZL1	41,00	Незадовільна (0%)	Низький контраст та пилове екранування (ефект «пилової завіси»)
Магнітний (магнітна сепарація)	MCC	41,00	Незадовільна (0%)	Відсутність магнітних властивостей у компонентів суміші
Барабанний (геометричний/морфометричний)	Lab ZS	35,81	Низька	Недостатня дезагломерація
Гравітаційний (гравітаційний стіл)	LA-K	32,45	Середня	Часткова стратифікація шару
Аспіратор	RPA-120	19,42	Висока	Турбулентність потоку
Аеродинамічний	LA-DUAL	10,91	Дуже висока	Ламінарне розшарування
Денсиметричний	DC-20	8,54	Максимальна	Псевдозрідження

LA-DUAL (10,91%) та DC-20 (8,54%) свідчать про те, що вертикальний і горизонтальний повітряні потоки є найбільш перспективними середовищами для розділення компонентів із різною парусністю. Ефективність моделі DC-20 можна пояснити вдалим агрегатуванням модулів сортування, що дає змогу реалізувати багаторазову ітерацію процесу в межах одного циклу.

У ході експериментів ідентифіковано критичні фактори, які раніше не знаходили достатнього відображення в літературі, зокрема явища конгломерації та недостатньої стратифікації. Злипання часток суміші створює ущільнення, які змінюють аеродинамічні характеристики компонентів, що перешкоджає їхньому розділенню за ознакою щільності. Це підтверджує думку Shevchenko & Aliiev (2022) про необхідність розробки принципово нової техніки для аналізу ресурсних відходів соняшника.

Саме на засадах проведеного дослідження розроблено пілотну конструкцію аеродинамічного приладу для визначення олійної домішки у сировині [Бардадим та ін., 2023]. Для подолання виявлених технічних бар'єрів такий прилад повинен мати спеціальні застосунки для розпушування сировини та покращення її розшаровування [Мельник, 2025, а]. Це дасть змогу мінімізувати вплив «мертвих зон» і підвищити точність аналізу фракцій.

Окремої уваги заслуговує питання впровадження інтелектуальних систем. Попри загальну тенденцію цифровізації технологій оцінки якості насіннєвого матеріалу, описану Priporov & Shepelev (2021), Yang та ін., (2025), наше дослідження засвідчило, що сучасні фотосепаратори (на прикладі моделі ZL1) наразі не можуть

бути ефективно використані для аналізу олійної домішки. Головною перешкодою є висока концентрація пилу, що виникає при роботі пневматичних скидувачів, а це критично порушує поле фотофіксації. Це підтверджує ппозицію Алієва Е. Б. (2019) про те, що потенціал класичної механіки в сепарації насіння ще не вичерпаний.

Важливим аспектом дискусії є також виявлена термінологічна розбіжність між поняттями «пневматичне», «аеродинамічне» та «аспіраційне» сортування [Мельник & Кудрявцев, 2022]. Відсутність єдиного наукового підходу до визначення цих процесів, на яку ми звертали увагу раніше, ускладнює об'єктивне порівняння технічних характеристик обладнання різних виробників. Таким чином, розробка нових аналізаторів повинна супроводжуватися не лише інженерними вдосконаленнями, а й уточненням понятійного апарату в галузі агроінженерії.

Висновки. За результатами проведеного комплексно-порівняльного дослідження 11 сучасних моделей лабораторного обладнання для аналізу відходів збіжжя встановлено, що найбільш ефективними для сепарації олійної домішки у відходах соняшника є прилади, що використовують пневматичні та аеродинамічні принципи взаємодії у вертикальних або горизонтальних потоках. Найкращі показники сортування продемонстрували моделі «LA-DUAL» (залишковий відсоток домішки − 10,91%) та «DC-20» (8,54%) завдяки руйнуванню адгезійних зв'язків потоком повітря. Водночас традиційні геометричні методи сепарації виявилися абсолютно непридатними для такої сировини через явище трибологічного блокування отворів сит конгломератами, утвореними під дією капілярних сил.

Наукова новизна дослідження полягає в ідентифікації критичних чинників, що обмежують ефективність сепарації: процесів конгломерації (злипання) часток і порушення стратифікації суміші за ознакою щільності. Встановлено, що для забезпечення комерційної точності аналізу вологість зразка повинна бути жорстко кондиційована до рівня 9,0%. Практичне значення роботи реалізоване в розробці пілотної конструкції адаптивного аеродинамічного приладу, оснащеного спеціальними модулями для розпушування та покращення розшаровування сировини.

Отримані результати можуть бути впроваджені в лабораторну практику підприємств олійно-жирової галузі та елеваторних комплексів для точної оцінки ресурсної цінності відходів. Перспективи подальших досліджень лежать у площині інтеграції методів класичної механіки з мехатронними системами керування для автоматизації процесу аналізу всіх 9 фракцій олійної домішки. Окрім того, постала гостра необхідність у науковому обґрунтуванні й уніфікації термінологічного апарату щодо процесів повітряного сортування («пневматичне», «аспіраційне», «аеродинамічне») для подолання існуючих розбіжностей в інженерному проектуванні та технічній документації.

Перелік літератури

Алієв, Е. Б. (2019). Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС. 196 с. ISBN 978-617-7759-32-3. URL: https://www.aliev.in.ua/doc/knigi/kniga_4.pdf

Бардадим, В., Кудрявцев, І., Бардадим, О., Ярошкін, В., Мельник, С., & Мельник, М. (2023). Адаптивний аналізатор домішок у суміші зерна з програмованими параметрами (Патент № 158445). Державна служба інтелектуальної власності України.

Гапонич, Л. С., Топал, О. І., Голенко, І. Л., Кобзар, С. Г., & Дулієнко, С. Г. (2023). Перспективи залучення відходів олійноекстракційних заводів України для виробництва теплової та електричної енергії. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування, № 4(16), с. 51-59. https://doi.org/10.20998/2078-774X.2023.04.07

Коломієць, Л. В., Мартиненко, С. А., &

Левицька, К. А. (2018). Оцінка шляхів використання відходів рослинницької продукції. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, (48), 154-164. https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.154-164

Мельник, С. (2025, a). Адаптивний аналізатор домішок з пневмонічним деаунером (Заявка № u 2025 05952).

Мельник, С., & Кудрявцев, І. (2022). Проблеми визначення технологічної ефективності сортувального обладнання. Elevatorist. com. https://elevatorist.com/blog/read/822-problemi-viznachennya-tehnologichnoyi-efektivnosti-sortuvalnogo-obladnannya.

Пешук, Л. В., & Носенко, Т. Т. (2008). Біохімія та технологія олієжирової сировини. К. НУХТ, 296 с. URL: https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/810

Чурсінов Ю.О., Луценко М.В., & Кудрявцев І.М. (2022). Техніко-економічне обґрунтування доцільності сортування відходів зернових та олійних культур. Наука, технології, інновації. 2(22), С. 61-67. http://doi.org/10.35668/2520-6524-2022-2-08

Chavoshgoli, Es., Abdollahpour, Sh., Abdi, R., & Babaie, A. (2014). Aerodynamic and some physical properties of sunflower seeds as affected by moisture content. Agric Eng Int: CIGR Journal, 16 (2): pp.136-142.

Geletukha, G., Drahniev, S., Zheliezna, T., Bashtovyi A. (2020). Prospects of Sunflower Residues use for Energy. UABIO Position Paper № 25. URL: https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/10/uabio-position-paper-25-en-1.pdf

Havrysh, V., Kalinichenko, A., Pysarenko, P., & Samojlik, M. (2023). Sunflower residues-based biorefinery: Circular economy indicators. Processes, 11(2), 630. https://doi.org/10.3390/pr11020630

Kudriavtsev, I. (2024). Numerical simulation of the waste separation process of sunflower seed mixture in the pneumatic separating channel of the aerodynamic separator. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 2(125), 47–55 . https://doi.org/10.37128/2520-6168-2024-2-5.

Marques, L. S., Ferraz, G. A. E. S., Moreira Neto, J., Magalhres, R. R., de Lima, D. A., Tsuchida, J. E., & Fuzatto, D. C. (2022). Agricultural machinery telemetry: A bibliometric analysis. AgriEngineering, 4(4), 939-950 . https://doi.org/10.3390/agriengineering4040060.

Melnyk, S. (2025, b). Analysis of technical and technological equipment for determining impurities in seed raw materials. Machinery, energy, transport of agro-industrial complex. Vol. 130, № 3, pp. 44-52. DOI: 10.37128/2520-6168-2025-3-4

Priporov, I. E., & Shepelev, A. B. (2021, October). Digital technologies in quality determination of sunflower seeds. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 868, No. 1, p. 012083). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/868/1/012083

Shaukat, R. A., Saqib, Q. M., Khan, M. U., Chougale, M. Y., & Bae, J. (2021). Biowaste sunflower husks powder based recycled triboelectric nanogenerator for energy harvesting. Energy Reports, 7, 724-731. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.01.036

Shevchenko, I., & Aliiev, E. (2022). Precise grading and sorting of sunflower plant materials in industrial facilities. Journal of Central European Agriculture, 23(2), 327-341. https://doi.org/10.5513/JCEA01/23.2.3345

Shukla, B. D., Srivastava, P. K., & Gupta, R. K. (1992). Oilseeds processing technology. 281 p. URL: https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/server/api/core/bitstreams/b5bd0029-d39c-425e-953e-23cb2889ee8b/content

Yang, Y. K., Wu, C. J., Zhou, G., Shi, B. W., Zhou, J., Wu, C. L., ... & Li, P. (2025). Application of Color Selection Technology for Eliminating Defective Products of Ripe Sunflower Seeds. Journal of Food Quality, 2025(1), 2846698. https://doi.org/10.1155/jfq/2846698

References

Aliiev, E. B. (2019). Physical and mathematical models of precision separation processes of sunflower seed material: Monograph. Zaporizhzhia, Ukraine: STATUS. 196 p. ISBN 978-617-7759-32-3. URL: https://

www.aliev.in.ua/doc/knigi/kniga_4.pdf

Bardadym, V., Kudriavtsev, I., Bardadym, O., Yaroshkin, V., Melnyk, S., & Melnyk, M. (2023). Adaptive impurity analyzer in a grain mixture with programmable parameters (Patent No. 158445). State Intellectual Property Service of Ukraine.

Chavoshgoli, Es., Abdollahpour, Sh., Abdi, R., & Babaie, A. (2014). Aerodynamic and some physical properties of sunflower seeds as affected by moisture content. Agric Eng Int: CIGR Journal, 16 (2): pp.136-142.

Chursinov, Yu. O., Lutsenko, M. V., & Kudriavtsev, I. M. (2022). Techno-economic feasibility of sorting waste from grain and oilseed crops. Science, Technologies, Innovations, 2(22), 61–67. https://doi.org/10.35668/2520-6524-2022-2-08

Geletukha, G., Drahniev, S., Zheliezna, T., Bashtovyi A. (2020). Prospects of Sunflower Residues use for Energy. UABIO Position Paper № 25. URL: https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/10/uabio-position-paper-25-en-1.pdf

Haponych, L. S., Topal, O. I., Holenko, I. L., Kobzar, S. H., & Duliienko, S. H. (2023). Prospects for utilizing waste from Ukrainian oil extraction plants for thermal and electrical energy production. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Power and Heat Engineering Processes and Equipment, 4(16), 51–59. https://doi.org/10.20998/2078-774X.2023.04.07

Havrysh, V., Kalinichenko, A., Pysarenko, P., & Samojlik, M. (2023). Sunflower residues-based biorefinery: Circular economy indicators. Processes, 11(2), 630. https://doi.org/10.3390/pr11020630

Kolomiiets, L. V., Martynenko, S. A., & Levytska, K. A. (2018). Assessment of utilization pathways for crop production waste. Design, Production and Operation of Agricultural Machines, (48), 154–164. https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.154-164

Kudriavtsev, I. (2024). Numerical simulation of the waste separation process of sunflower seed mixture in the pneumatic separating channel of the aerodynamic separator. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 2(125), 47-55 . https://doi.org/10.37128/2520-6168-2024-2-5.

Marques, L. S., Ferraz, G. A. E. S., Moreira Neto, J., Magalhres, R. R., de Lima, D. A., Tsuchida, J. E., & Fuzatto, D. C. (2022). Agricultural machinery telemetry: A bibliometric analysis. AgriEngineering, 4(4), 939-950 . https://doi.org/10.3390/agriengineering4040060.

Melnyk, S. (2025, b). Analysis of technical and technological equipment for determining impurities in seed raw materials. Machinery, energy, transport of agro-industrial complex. Vol. 130, № 3, pp. 44-52. DOI: 10.37128/2520-6168-2025-3-4

Melnyk, S. (2025a). Adaptive impurity analyzer with pneumatic deauner (Application No. u 2025 05952).

Melnyk, S., & Kudriavtsev, I. (2022). Problems of determining the technological efficiency of sorting equipment. Elevatorist.com. https://elevatorist.com/blog/read/822-problemi-viznachennya-tehnologichnoyi-efektivnosti-sortuvalnogo-obladnannya

Peshuk, L. V., & Nosenko, T. T. (2008). Biochemistry and technology of oil-and-fat raw materials. Kyiv, Ukraine: National University of Food Technologies. 296 p. https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/810

Priporov, I. E., & Shepelev, A. B. (2021, October). Digital technologies in quality determination of sunflower seeds. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 868, No. 1, p. 012083). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/868/1/012083

Shaukat, R. A., Saqib, Q. M., Khan, M. U., Chougale, M. Y., & Bae, J. (2021). Biowaste sunflower husks powder based recycled triboelectric nanogenerator for energy harvesting. Energy Reports, 7, 724-731. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.01.036

Shevchenko, I., & Aliiev, E. (2022). Precise grading and sorting of sunflower plant materials in industrial facilities. Journal of Central European Agriculture, 23(2), 327-341. https://doi.org/10.5513/JCEA01/23.2.3345

Shukla, B. D., Srivastava, P. K., & Gupta, R. K. (1992). Oilseeds processing technology. 281 p. URL: https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/server/api/core/bitstreams/b5bd0029-

d39c-425e-953e-23cb2889ee8b/content

Yang, Y. K., Wu, C. J., Zhou, G., Shi, B. W., Zhou, J., Wu, C. L., ... & Li, P. (2025). Application of Color Selection Technology for Eliminating Defective Products of Ripe Sunflower Seeds. Journal of Food Quality, 2025(1), 2846698. https://doi.org/10.1155/jfq/2846698.

Надійшла до редакції 25.09.2025 р.;
переглянуто 22.10.2025 р.;
прийнято до друку 19.11.2025 р.
опубліковано 29.12.2025 р.
Received September 25, 2025;
revised October 22, 2025;
accepted November 19, 2025;
published December 29, 2025

UDC 631.561.6

SCIENTIFIC AND TECHNICAL SUBSTITUTION OF SEPARATION METHODS OF HIGH-OIL SUNFLOWER WASTE

Melnyk S., PhD student
e-mail: stealths1978@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8151-223X.
Koshulko V., PhD in Tech. Sc., Associate Professor,
e-mail: koshulko.v.s@dsau.dp.ua, https://orcid.org/0000-0002-1139-5074.
Kudriavtsev I., PhD,
e-mail: kudravcevigor898@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9939-7014.
Dnipro State Agrarian and Economic University
Bardadym O.,
e-mail: alik777bar@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8594-5059.
Melnyk M.,
e-mail: mykhaylo.melnyk@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2252-2235.
LLC SPE «Sorting Machines»

Summary

Purpose. *To provide a scientific and technical substantiation for selecting effective separation methods for high-oil sunflower processing waste, taking into account their physical and mechanical properties, elevated moisture content, and morphometric similarity of components.*

Methods. *Comparative experimental studies were carried out using 11 types of laboratory sorting equipment implementing geometric, gravitational, optical, magnetic, and aerodynamic separation principles. A model mixture of sunflower seed waste with a predetermined oil-bearing impurity content (41%) and controlled moisture (9.0 ± 0.2%) was used. Efficiency was evaluated by changes in the oil impurity fraction before and after separation, along with an analysis of the physical mechanisms limiting the process.*

Results. *It was found that conventional geometric, morphometric, and optical methods provide virtually no removal of the oil fraction due to adhesion phenomena, particle conglomeration, and the similarity of physical parameters. Gravitational and drum systems demonstrated partial effectiveness, but the purification level remained insufficient. The highest performance was achieved with pneumatic and aerodynamic methods, particularly under conditions of controlled airflow and fluidized-bed behavior. The minimum residual impurity content (8.54%) was obtained using a densimetric column, confirming the decisive role of particle aerodynamic properties in the separation process.*

Conclusions. *For efficient separation of high-oil sunflower waste, systems based on particle interaction with airflow are recommended, as they ensure disruption of adhesive bonds and stratification of the mixture by density and aerodynamic properties. The critical influence of moisture content and particle conglomeration on process quality was established. The results can be applied to the development of specialized laboratory analyzers and to improving waste processing technologies in the oil and fat industry.*

Keywords: *separation, sunflower waste, oil-bearing impurity, aerodynamic sorting, pneumatic separation, fluidization, laboratory equipment, particle conglomeration, moisture content.*