



Кудрявцев І.М.*
аспірант

Дніпровський державний
аграрно-економічний
університет

Kudriavtsev I.
postgraduate student

Dnipro State Agrarian and
Economic University

УДК 631.362

DOI: 10.37128/2306-8744-2024-2-14

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СЕПАРАЦІЇ ВІДХОДІВ НАСІННЕВОЇ СУМІШІ СОНЯШНИКУ В КАМЕРІ РОЗРІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНОГО СЕПАРАТОРА

Насіннєві відходи та сміття містять 30–50 % придатної для подальшого використання зернової або олійної домішки, що робить їх перспективною сировиною для переробки. Механічне сортування на спеціалізованих машинах є єдиним способом вилучення цієї цінної сировини. Аеродинамічний процес розділення відходів насінневої суміші соняшника на лушпиння, ядра та інші домішки є важливою частиною переробки на олійноекстракційному заводі, але проблема неповного відділення лушпиння від ядер знижує якість обробки і призводить до втрат харчових продуктів. Оптимізація процесу сепарації відходів насінневої суміші соняшника є актуальною задачею.

Метою роботи є проведення чисельного моделювання процесу сепарації відходів насінневої суміші соняшника в камері розрідження розробленого аеродинамічного сепаратора і обґрунтувати його раціональні конструктивно-технологічні параметри.

В результаті першого етапу чисельного моделювання процесу сепарації компонентів відходів насінневої суміші соняшника в камері розрідження були отримані траєкторії руху і розподіли компонентів. Використовуючи Wolfram Cloud, були розраховані рівняння регресії залежності відстані між піками розподілів лушпиння соняшника і дрібних частинок ($\Delta y'$) від ефективного діаметра (D_p), швидкості подачі компонентів (V_p) та радіуса кривизни верхньої грані камери розрідження (R).

Встановлено, що при $D_p = 0,01$ м, $V_a = 3,35$ м/с, $R = 0,054$ м середня відстань між піками розподілів лушпиння і дрібних частинок становить $\Delta y' = 0,443$ м. В моделі Simcenter Star-CCM+ отримане раціональне значення для точки перетину розподілів компонентів суміші ($y'_{int} = 0,43$ м).

На другому етапі моделювання процесу сепарації в аеродинамічному сепараторі колонного типу були розраховані рівняння регресії коефіцієнта розподілу (δ) від вмісту компонентів в насіннєвій суміші (ψ_h, ψ_d, ψ_k), подачі суміші (q) та швидкості повітряного потоку (V_a).

Встановлено раціональні значення факторів для забезпечення високої якості сепарації при достатній

* Науковий керівник – Чурсінов Юрій Олексійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри харчових технологій Дніпровського державного аграрно-економічного університету



продуктивності і знижених енерговитратах: $q = 133$ кг/год, $Va = 2,46$ м/с, при цьому коефіцієнт розподілу $\delta = 0,92$.

Ключові слова: насіння, суміш, компоненти, аеродинамічний сепаратор, камера розрідження, потік повітря, параметри, швидкість, ефективність, моделювання.

Вступ. Насіннєві відходи та сміття є перспективною сировиною для переробки, оскільки містять 30-50 % придатної для подальшого використання зернової або олійної домішки [1]. Цю цінну сировину можна отримати лише шляхом механічного сортування відходів на спеціалізованих машинах [2].

Аеродинамічний процес, який використовується для розділення відходів насіннєвої суміші соняшника на лушпиння, ядра та інші домішки є важливою частиною процесу переробки на олійноекстракційному заводі [3]. Однак у цьому процесі неповне відділення лушпиння від ядер є однією з основних проблем. Ця проблема не тільки спричиняє втрату харчових продуктів, але й призводить до зниження якості подальшої обробки. Тому надзвичайно важливо дослідити, як оптимізувати процес сепарації відходів насіннєвої суміші соняшника.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В даний час найбільш часто використовуваним обладнанням для очищення відходів насіннєвої суміші соняшника є гравітаційний аеродинамічний сепаратор. Сепаратори мають такі переваги, як економічна ефективність, проста конструкція та простота обслуговування [4–6], а також може використовуватися для очищення та сортування багатьох інших сільськогосподарських продуктів [7–8].

Сепаратори виконані у вигляді вертикального розділового каналу, через який вводиться висхідний повітряний потік з частинками, що подаються знизу або збоку [7]. Зазвичай вважається, що подача насіннєвої суміші може зменшити швидкість повітряного потоку, порушити стабільність повітряного потоку та запобігти повному розділенню змішаних частинок [7]. Процес вивчався з різних аспектів на основі досвіду та спроб і помилок, наприклад, шляхом зміни форми розділового каналу [8], регулювання швидкості повітряного потоку [9] і коригування параметрів подачі суміші [10]. Результати показують, що швидкість повітряного потоку, швидкість подачі компонентів суміші і напрямок їх подачі мають значний вплив на розділення, а також демонструють, що різні оптимальні робочі параметри досягаються з різними матеріалами.

Таким чином, незважаючи на те, що продуктивність аеродинамічної сепарації була покращена, дослідження для відходів

насіннєвої суміші соняшника потребують додаткового уточнення. Тому пошук конструктивних рішень для створення машин тонкого очищення відходів насіннєвої суміші соняшника є актуальним завданням для агроінженерії.

Мета та завдання дослідження.

Провести чисельне моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшника в камері розрідження розробленого аеродинамічного сепаратора і обґрунтувати його раціональні конструктивно-технологічні параметри.

Викладення основного матеріалу .

Чисельне моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшника в камері розрідження аеродинамічного сепаратора проводилось за допомогою програмного пакету Simcenter Star-CCM+ [11]. Для створення сіткових моделей використовували генератор багатограничних комірок і генератор поверхневої сітки з базовим розміром комірки 0,02 м. Фізичні моделі включали модель ідеального газу, модель роздільної течії газу, лагранжеву багатофазність, модель багатофазної взаємодії Герца-Міндліна та модель опору кочення. Форма частинок встановлювалася за фактичною формою об'єкта методом координат. Моделювання застосовувало стандартну модель турбулентності k- ϵ з точністю збіжності 10^{-4} . Граничні умови включали встановлення швидкості на вході та тиску на виході для повітряного потоку. Рух газової фази вирішувався за допомогою стандартної моделі турбулентності k- ϵ , а для обробки стін використовували стандартні функції стін Simcenter Star-CCM+.

Були створені три лагранжеві фази методом дискретних елементів (DEM): ядро соняшника, лушпиння і дрібні частинки (рис. 1). Фізико-механічні властивості частинок DEM включали їх ефективний діаметр (5–25 мм), дійсну щільність (990 ± 30 кг/м³ для ядра соняшника, 510 ± 50 кг/м³ для лушпиння, 200 ± 70 кг/м³ для дрібних частинок), модуль Юнга, коефіцієнти тертя, Пуассона, відновлення та опору кочення [12–14].

Для моделювання були прийняті наступні властивості повітря: молярна маса 28,8 г/моль та динамічна в'язкість $1,86 \cdot 10^{-5}$ Па·с. Опорною величиною моделювання був вектор сили тяжіння з координатами (0,0; 0,0; -9,81) м/с². Моделювання проводилося



нестационарним неявним методом із кроком 0,001 с, при цьому на кожному кроці здійснювалося 5 ітерацій. Для переміщення частинок DEM число Куранта складало 0,05–0,35.

Першим етапом моделювання є дослідження процесу сепарації компонентів відходів насінневої суміші соняшнику в камері розрідження. У відповідності до першого етапу моделювання в камеру розрідження поступають лущиння соняшника і дрібні частинки. Попередньо камеру розрідження представимо у вигляді призми із виходом

повітряного потоку на нижній грані (рис. 2).

Факторами чисельного моделювання руху компонентів відходів насінневої суміші соняшнику в пневмосепаруючому каналі і камері розрідження є ефективний діаметр компонентів D_p (0,005–0,025 м, заповане – x_1), швидкість повітряного потоку V_a (5–15 м/с, заповане – x_2), радіус кривизни верхньої грані камери розрідження R (0,4–0,6 м, заповане – x_3). Моделювання проведено за повнофакторним планом чисельного дослідження для трьох факторів на трьох рівнях.



Рис. 1. Апроксимація форми компонентів відходів насінневої суміші соняшнику

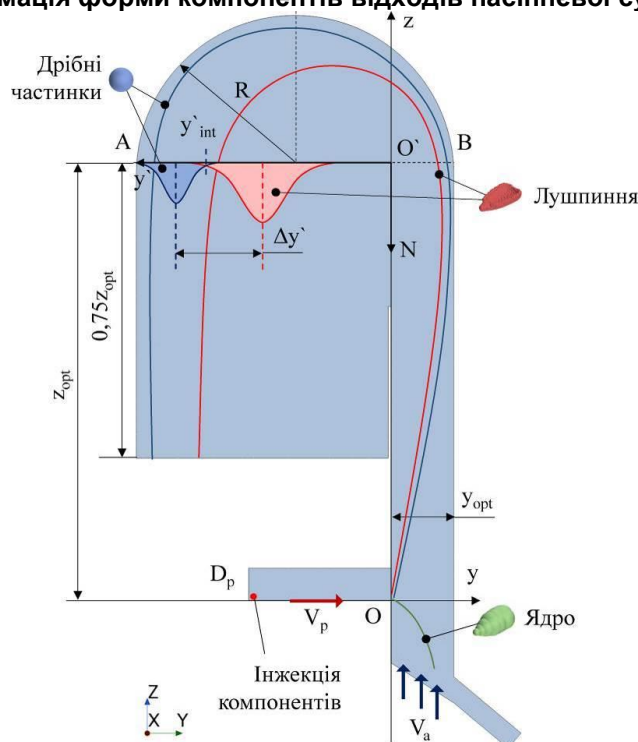


Рис. 2. Схема моделювання руху компонентів відходів насінневої суміші соняшнику в пневмосепаруючому каналі і камері розрідження



Після пневмосепаруючого каналу суміш, яка складається з лушпиння соняшника і дрібних частинок, рухається вгору до камери розрідження, де відбувається їх розділення. Визначимо траєкторії польоту компонентів суміші в камері розрідження враховуючи їх неоднорідність за фізико-механічними властивостями. Побудуємо розподіли компонентів суміші (лушпиння соняшника і дрібних частинок) вздовж лінії АВ (рис. 2) і визначимо відстань між їх піками $\Delta y'$ і точку перетину y'_{int} в системі координат $y'O'N$ (де N – кількість компонентів). Умовою якісного розділення лушпиння соняшника і дрібних

частинок в камері розрідження є максимізація відстані $\Delta y'$:

$$\Delta y' \rightarrow \max, \quad (1)$$

а точка перетину y'_{int} визначає координату розділення двох забірників компонентів суміші.

Для обґрунтування режимних параметрів аеродинамічного сепаратора колонного типу в залежності від складу засміченої насінневої суміші соняшнику проведемо *другий етап чисельного моделювання*. Схема моделювання наведена на рис. 3.

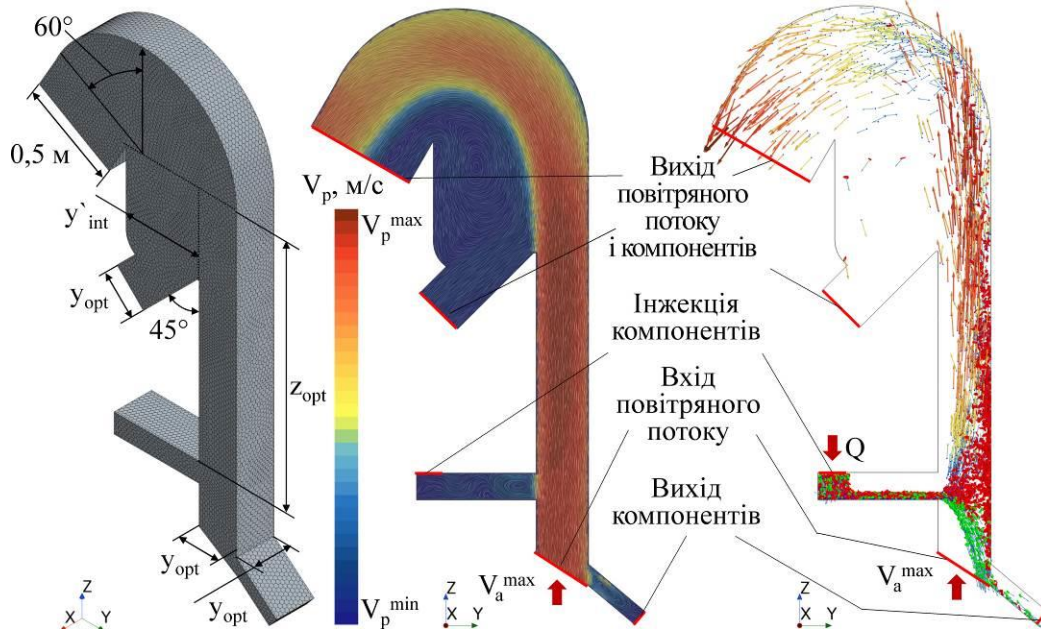


Рис. 3. Схема моделювання сепарації компонентів відходів насінневої суміші соняшнику в пневмосепаруючому каналі

Прийнято, що насінневу суміш попередньо калібрували на решетах і ефективний діаметр компонентів знаходить в межах 0,009 м до 0,013 м.

В якості факторів досліджень приймаємо швидкість повітряного потоку V_a (1–5 м/с) – x_3 , подачу суміші q (50–150 кг/год) – x_9 і вміст компонентів в насінневій суміші – ψ_h (x_6), ψ_d (x_7), ψ_k (x_8). При цьому виконується умова:

$$\psi_h + \psi_d + \psi_k = 1. \quad (2)$$

План досліджень впливу фракційного вмісту компонентів на якість сепарації в пневмосепаруючому каналі наведений в таблиці додатку.

За критерій оцінки якості сепарації було обрано вміст кожного компонента відходів насінневої суміші соняшника у відповідних забірниках η .

Спираючись на дослідження Алієва Е. Б. [15] за якісний критерій оцінки роботи розробленого аеродинамічного сепаратора є коефіцієнт розподілу δ , що визначається як середнє значення вмісту компонентів відходів

насінневої суміші соняшника у відповідних забірниках η :

$$\delta = \frac{\eta_{h-h} + \eta_{d-d} + \eta_{k-k}}{3}. \quad (3)$$

У результаті *першого етапу чисельного моделювання* процесу сепарації відходів насінневої суміші соняшнику в камері розрідження отримані траєкторії руху її компонентів. Для різних варіантів чисельного дослідження при різних значеннях факторів спостерігаються різні траєкторії польоту компонентів відходів насінневої суміші соняшнику (лушпиння соняшника і дрібних частинок). На траєкторії польоту компонентів впливає не тільки потік повітряного потоку, а й контактна взаємодія компонентів між собою і стінками аеродинамічного сепаратора колонного типу. Тому на рис. 4 побудовані розподіли компонентів суміші (лушпиння соняшника і дрібних частинок) вздовж лінії АВ (рис. 3).

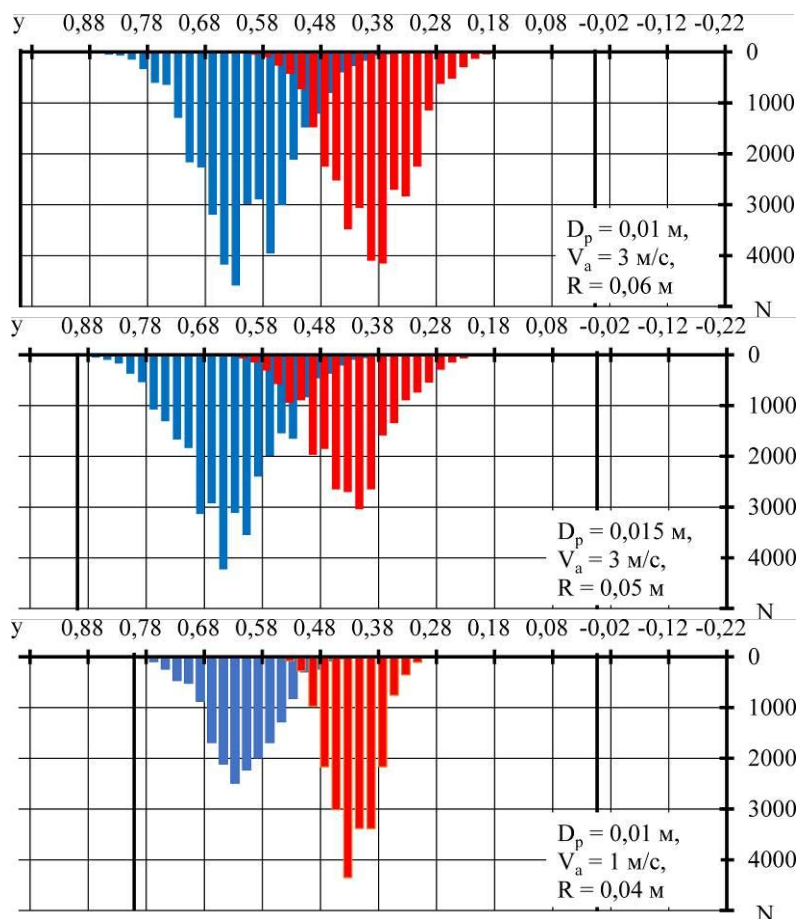
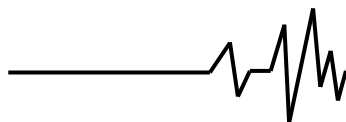


Рис. 4. Розподіли компонентів відходів насінневої суміші соняшнику в камері розрідження для різних комбінацій факторів дослідження

Згідно рис. 4 визначена відстань між піками розподілів $\Delta y'$ в системі координат $y'O'N$ (де N – кількість компонентів).

З використанням програмного пакету Wolfram Cloud [16] розрахуємо рівняння регресії другого порядку залежності $\Delta y'$ від факторів досліджень в закодованому вигляді:

$$\Delta y' = 0,442778 + 0,033 x_1 - 0,0173333 x_1^2 + 0,0168889 x_3 + 0,0065 x_1 x_3 - \quad (4)$$

$$- 0,0473333 x_3^2 + 0,0465 x_5 + 0,00308333 x_1 x_5 - 0,00158333 x_3 x_5 - 0,0461667 x_5^2.$$

Розраховані статистичні показники наведені в табл. 1. Сірим кольором виділені коефіцієнти регресії для яких розрахований коефіцієнт Стьюдента менше за табличне значення $t_{0,05}(27) = 2,05$. Цими коефіцієнтами регресії в подальшому будемо знехтувати, як статистично незначущими.

Таблиця 1

Статистичні показники рівняння регресії (4)

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a_{00}	0,442778	0,00506364	87,4427	$5,27332 \cdot 10^{-24}$
a_{10}	0,033	0,00234401	14,0785	$8,4308 \cdot 10^{-11}$
a_{30}	0,0168889	0,00234401	7,20513	$1,47174 \cdot 10^{-6}$
a_{50}	0,0465	0,00234401	19,8378	$3,4185 \cdot 10^{-13}$
a_{13}	0,0065	0,00287081	2,26417	0,0369301
a_{15}	0,00308333	0,00287081	1,07403	0,297819
a_{35}	-0,00158333	0,00287081	-0,551528	0,588449
a_{11}	-0,0173333	0,00405994	-4,26936	0,000518056
a_{33}	-0,0473333	0,00405994	-11,6586	$1,56274 \cdot 10^{-9}$
a_{55}	-0,0461667	0,00405994	-11,3713	$2,28186 \cdot 10^{-9}$

Провівши розкодування і прибравши незначущі коефіцієнти регресії маємо (рис. 5):

$$\Delta y' = - 1,19156 + 18,5167 D_p - 693,333 D_p^2 + 5,08167 R - 4,61667 R^2 + \quad (5)$$

$$+ 0,0729444 V_a + 0,65 D_p V_a - 0,0118333 V_a^2.$$

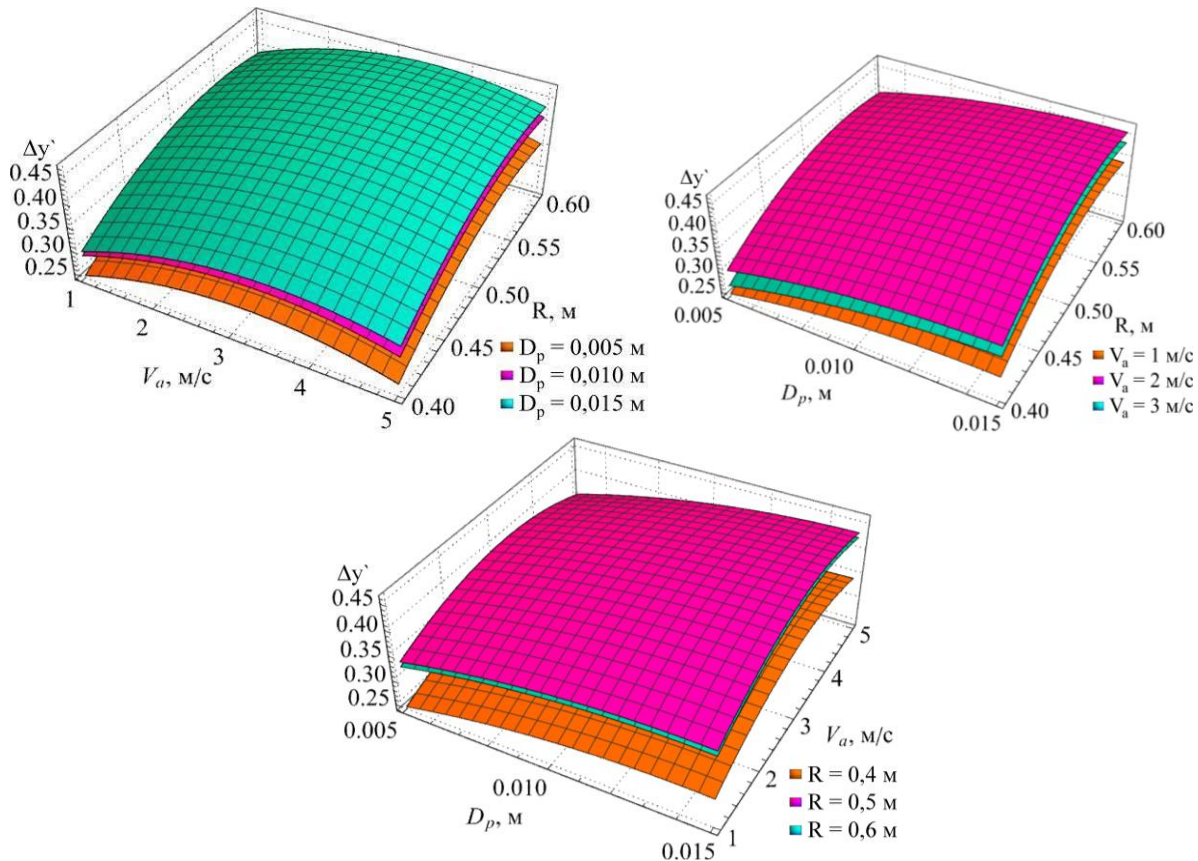


Рис. 5. Залежність відстань між піками розподілів лушпиння соняшника і дрібних частинок $\Delta y'$ від ефективного діаметра D_p , швидкості подачі компонентів V_p і радіуса кривизни верхньої грані камери розрідження R

Згідно рис. 5 збільшення ефективного діаметра компонентів D_p призводить до збільшення відстань між піками розподілів лушпиння соняшника і дрібних частинок $\Delta y'$. Це пояснюється тим що збільшується маса лушпиння і вони знижується раніше. Із збільшення радіуса кривизни верхньої грані камери розрідження R відстань між піками розподілів $\Delta y'$ збільшується. В свою чергу для швидкості повітряного потоку V_a спостерігається оптимуму для відстані між піками розподілів $\Delta y'$.

Вирішуючи рівняння (1) спільно з (5) в програмному пакеті Wolfram Cloud отримуємо раціональні значення факторів досліджень: для $D_p = 0,005$ м $\rightarrow V_a = 3,21$ м/с, $R = 0,055$ м; для $D_p = 0,010$ м $\rightarrow V_a = 3,35$ м/с, $R = 0,056$ м; для $D_p = 0,015$ м $\rightarrow V_a = 3,49$ м/с, $R = 0,054$ м. При цьому середнє значення відстані між піками розподілів лушпиння соняшника і дрібних частинок $\Delta y' = 0,443$ м.

Підставивши середні раціональні значення факторів ($D_p = 0,01$ м, $V_a = 3,35$ м/с, $R = 0,054$ м) в створену чисельну модель Simcenter Star-CCM+ отримане раціональне значення для точки перетину розподілів компонентів суміші (лушпиння соняшника і

дрібних частинок) вздовж лінії АВ (рис. 2) $y'_{int} = 0,43$ м (рис. 6).

Другий етап чисельного моделювання дозволив встановити вплив вмісту компонентів в насінній суміші – ψ_h, ψ_d, ψ_k .

З використанням програмного пакету Wolfram Cloud розрахуємо рівняння регресії неповного третього порядку залежності δ від факторів досліджень в закодованому вигляді:

$$\begin{aligned} \delta = & 0,421462 - 0,3611 x_6 + 0,200243 x_6^2 - \\ & 0,361757 x_7 + 0,220409 x_6 x_7 - \\ & - 0,0210008 x_6^2 x_7 + 0,199692 x_7^2 - \\ & 0,0291192 x_6 x_7^2 - \\ & - 0,361464 x_8 + 0,219188 x_6 x_8 - \\ & 0,0245388 x_6^2 x_8 + 0,221527 x_7 x_8 - \\ & - 0,221706 x_6 x_7 x_8 - 0,0248648 x_7^2 x_8 + \\ & 0,200336 x_8^2 - \\ & - 0,024224 x_6 x_8^2 - 0,0265838 x_7 x_8^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Розраховані статистичні показники наведені в табл. 2. Сірим кольором виділені коефіцієнти регресії для яких розрахований коефіцієнт Стюдента менше за табличне значення $t_{0,05}(22) = 2,07$. Цими коефіцієнтами регресії в подальшому будемо знехтувати, як статистично незначущими.

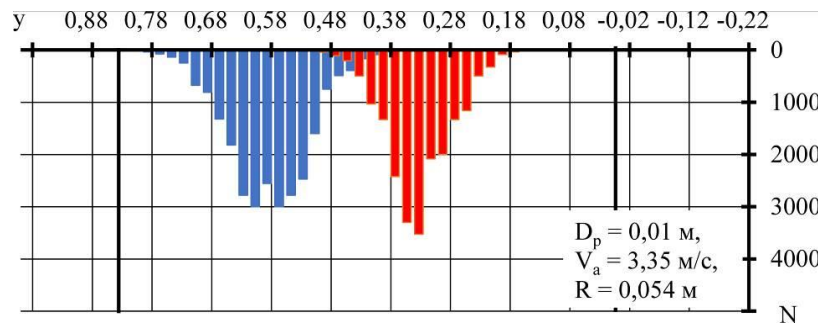
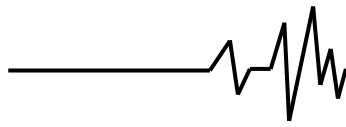


Рис. 6. Розподіли компонентів відходів насіннєвої суміші соняшнику в камері розрідження для раціональних значень факторів ($D_p = 0,01$ м, $V_a = 3,35$ м/с, $R = 0,054$ м)

Таблиця 2 – Статистичні показники рівняння регресії (6)

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a ₀₀	0,421462	0,00973401	43,2979	1,2402·10 ⁻⁷
a ₆₀	-0,3611	0,0104079	-34,6949	3,74211·10 ⁻⁷
a ₇₀	-0,361757	0,0104079	-34,758	3,70838·10 ⁻⁷
a ₈₀	-0,361464	0,0103973	-34,7651	3,70465·10 ⁻⁷
a ₆₇	0,220409	0,0221995	9,92857	0,000176924
a ₆₈	0,219188	0,022182	9,88137	0,000181011
a ₇₈	0,221527	0,022182	9,9868	0,000172034
a ₆₇₈	-0,221706	0,0263672	-8,40839	0,000390013
a ₆₆₇	-0,0210008	0,0367308	-0,571748	0,592236
a ₆₆₈	-0,0245388	0,0367358	-0,667979	0,533738
a ₇₇₈	-0,0248648	0,0367358	-0,676853	0,528541
a ₇₇₆	-0,0291192	0,0367308	-0,792774	0,463848
a ₈₈₆	-0,024224	0,0367112	-0,659852	0,538526
a ₈₈₇	-0,0265838	0,0367112	-0,724133	0,501436
a ₆₆	0,200243	0,0242769	8,24831	0,00042698
a ₇₇	0,199692	0,0242769	8,22559	0,000432557
a ₈₈	0,200336	0,0242713	8,25403	0,000425588

Провівши розкодування і прибравши незначущі коефіцієнти регресії маємо (рис. 7):

$$\begin{aligned} \delta = & 3,09458 - 3,12228 \psi_d + 0,879916 \psi_d^2 - 3,43384 \psi_h + 2,92708 \psi_d \psi_h - \\ & - 0,617124 \psi_d^2 \psi_h + 1,18357 \psi_h^2 - 0,596112 \psi_d \psi_h^2 - 2,81604 \psi_k + \\ & + 1,70844 \psi_d \psi_k + 2,33991 \psi_h \psi_k - 1,31949 \psi_d \psi_h \psi_k - 0,628444 \psi_h^2 \psi_k + \\ & + 0,568137 \psi_k^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Згідно рис. 7 коефіцієнта розподілу δ змінюється в діапазоні від 0,931 до 0,993. Найменше значення спостерігається для наступного вмісту компонентів: $\psi_d = 0,331$, $\psi_h = 0,335$, $\psi_k = 0,334$.

З використанням програмного пакету Wolfram Cloud розрахуємо рівняння регресії другого порядку залежності коефіцієнта розподілу δ від факторів досліджень V_a (x_3) і q (x_9) в закодованому вигляді:

$$\begin{aligned} \delta = & 0,949903 - 0,02576 x_9 - 0,0064 x_9^2 + \\ & 0,03472 x_3 - 0,00956 x_9 x_3 - \\ & - 0,0238857 x_3^2. \end{aligned} \quad (8)$$

Розраховані статистичні показники наведені в табл. 3. Сірим кольором виділені коефіцієнти регресії для яких розрахований коефіцієнт Стьюдента менше за табличне значення $t_{0,05}(25) = 2,06$. Цими коефіцієнтами регресії в подальшому будемо знехтувати, як статистично незначущими.

Провівши розкодування і прибравши незначущі коефіцієнти регресії маємо (рис. 8):

$$\begin{aligned} \delta = & 0,84132 + 0,0002836 q - 2,56 \cdot 10^{-6} \\ & q^2 + 0,0627486 V_a - \\ & - 0,0000956 q V_a - 0,00597143 V_a^2. \end{aligned} \quad (9)$$

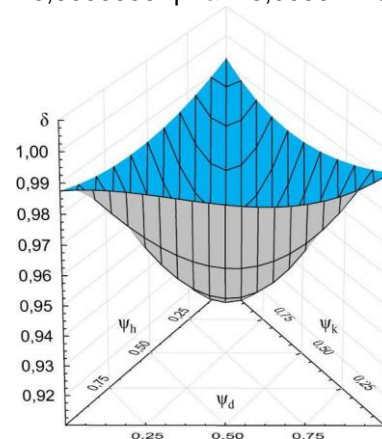
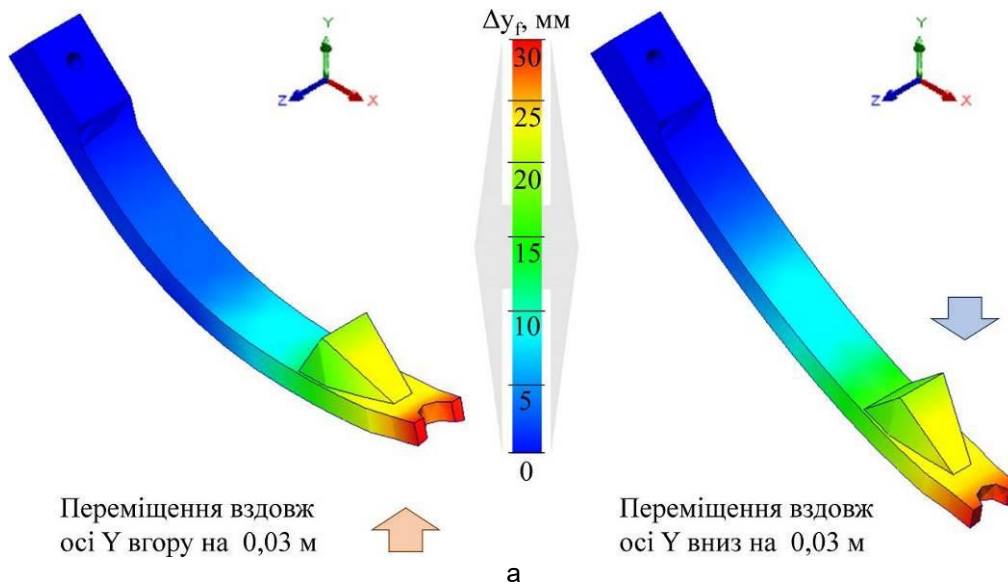
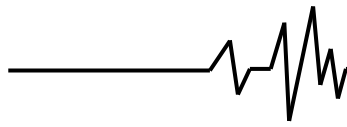


Рис. 7. Залежність коефіцієнта розподілу δ розробленого аеродинамічного сепаратора від вмісту компонентів в насіннєвій суміші ψ_h , ψ_d , ψ_k



Таблиця 3 – Статистичні показники рівняння регресії (8)

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a ₀₀	0,949903	0,00103881	914,413	1,39065·10 ⁻⁴⁵
a ₉₀	-0,02576	0,00074803	-34,4371	1,37735·10 ⁻¹⁸
a ₃₀	0,03472	0,00074803	46,4153	5,05772·10 ⁻²¹
a ₉₃	-0,00956	0,00105787	-9,03699	2,61997·10 ⁻⁸
a ₉₉	-0,0064	0,0012644	-5,06168	0,0000692824
a ₃₃	-0,0238857	0,0012644	-18,8909	8,96095·10 ⁻¹⁴

У відповідності до рис. 8 збільшення подачі суміші q призводить до зменшення коефіцієнта розподілу δ , а збільшення швидкості повітряного потоку V_a навпаки до його збільшення.

Для забезпечення високої якості сепарації при достатньо високій продуктивності і зменшених енерговитрат скористаємося наступною математичною умовою:

$$\delta \rightarrow \max, \quad q \rightarrow \max, \quad V_a \rightarrow \min. \quad (10)$$

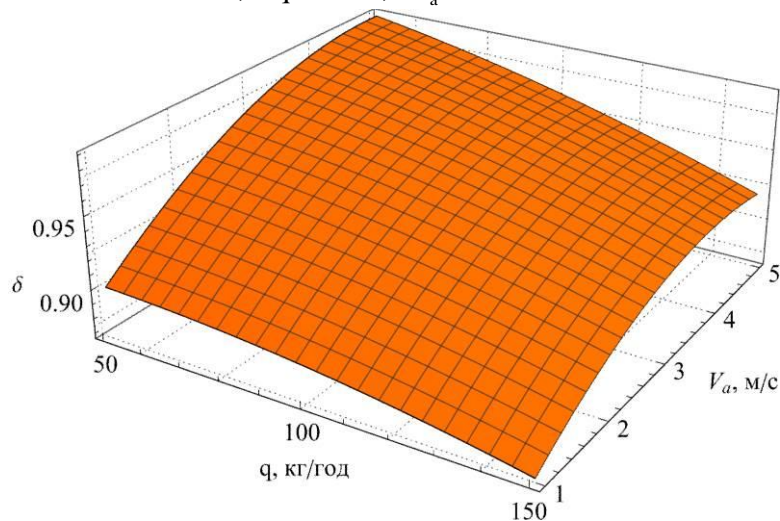


Рис. 8. Залежність коефіцієнта розподілу δ від подачі суміші q і швидкості повітряного потоку V_a

Провівши ранжування критеріїв і критерію перетворимо систему (2.50) до провівши зведення до єдиного узагальнюючого наступного вигляду:

$$K_4 = \frac{\delta - \min(\delta)}{\max(\delta) - \min(\delta)} \frac{q - \min(q)}{\max(q) - \min(q)} \frac{\max(V_a) - V_a}{\max(V_a) - \min(V_a)} \rightarrow \max. \quad (11)$$



Вирішуючи (1) спільно з (9) в програмному пакеті Wolfram Cloud отримуємо раціональні значення факторів: $q = 133$ кг/год, $V_a = 2,46$ м/с. При цьому коефіцієнт розподілу $\delta = 0,92$.

Висновки та перспективи подальших досліджень. В результаті першого етапу чисельного моделювання процесу сепарації компонентів відходів насінневої суміші соняшнику в камері розрідження отримані траєкторії руху і розподіли її компонентів. З використанням програмного пакету Wolfram Cloud розраховані рівняння регресії другого порядку залежності відстань між піками розподілів лушпиння соняшника і дрібних частинок Δy в камері розрідження від ефективного діаметра D_p , швидкості подачі компонентів V_p і радіуса кривизни верхньої грані камери розрідження R . Враховуючи умову максимізації Δy отримані раціональні значення факторів досліджень: для $D_p = 0,005$ м $\rightarrow V_a = 3,21$ м/с, $R = 0,055$ м; для $D_p = 0,010$ м $\rightarrow V_a = 3,35$ м/с, $R = 0,056$ м; для $D_p = 0,015$ м $\rightarrow V_a = 3,49$ м/с, $R = 0,054$ м. При цьому середнє значення відстані між піками розподілів лушпиння соняшника і дрібних частинок $\Delta y = 0,443$ м. Підставивши середні раціональні значення факторів ($D_p = 0,01$ м, $V_a = 3,35$ м/с, $R = 0,054$ м) в створену чисельну модель Simcenter Star-CCM+ отримане раціональне значення для точки перетину розподілів компонентів суміші (лушпиння соняшника і дрібних частинок) $y_{int} = 0,43$ м.

В результаті другого етапу чисельного моделювання процесу сепарації відходів насінневої суміші соняшника в аеродинамічному сепараторі колонного типу і подальшої обробки даних в програмному пакеті Wolfram Cloud розраховані рівняння регресії коефіцієнта розподілу δ розробленого аеродинамічного сепаратора від вмісту компонентів в насінневі суміші ψ_h , ψ_d , ψ_k і подачі суміші q та швидкості повітряного потоку V_a . Найменше значення коефіцієнта розподілу δ спостерігається для наступного вмісту компонентів: $\psi_d = 0,331$, $\psi_h = 0,335$, $\psi_k = 0,334$. Для забезпечення високої якості сепарації ($\delta \rightarrow \max$) при достатньо високій продуктивності ($q \rightarrow \max$) і зменшених енерговитрат ($V_a \rightarrow \min$) встановлені раціональні значення факторів досліджень: $q = 133$ кг/год, $V_a = 2,46$ м/с. При цьому коефіцієнт розподілу $\delta = 0,92$.

Список використаних джерел

1. Кудрявцев І. М., Луценко М. В., Чурсінов Ю. О. (2022). Техніко-економічне обґрунтування доцільності сортування відходів зернових та олійних культур. «Наука, технології інновації». 2(22): 61–67. <https://doi.org/10.35668/2520-6524-2022-2-08>.

2. Алієв Е. Б. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС. 2019. 196 с. ISBN 978-617-7759-32-3.

3. Алієв Е. Б., Пацула О. М., Гриценко В. Т. (2017). Технологія комплексної безвідхідної переробки макухи з насіння олійних культур з одержанням високоякісних повноцінних протеїнових добавок у вигляді пелет та твердого біопалива: Науково-методичні рекомендації. Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України. Електронний аналог друкованого видання (електронна книга). Запоріжжя: СТАТУС. ISBN 978-617-7353-59-0.

4. Богомолів О. В., Завгородній О. І., Ольшанський В. П., Богомолів О. О. (2019). До питання сепарації зернових сумішей за сукупністю пружних та аеродинамічних властивостей. Сучасні напрямки технології та механізації переробних і харчових виробництв: Вісник ХНТУСГ. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка. 207: 5–11. <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/4924>

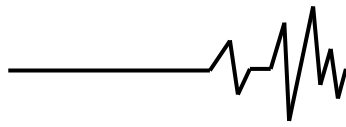
5. Козаченко О. В., Бакум М. В., Михайлов А. Д., Крєкот М. М., Чала О. С., Завгородній О. І. (2023). Підвищення посівних властивостей насіння сафлору красильного на вібраційній насіннеочисній машині. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 7 (38), II: 83–90. DOI: 10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.83-90

6. Kotov B., Stepanenko S., Tsurkan O., Hryshchenko V., Pansyr Y., Garasymchuk I., Spirin A., Kupchuk I. (2023). Fractioning of grain materials in the vertical ring air channel during electric field imposition. *Przeglad Elektrotechniczny*, 99 (1): 100–104. DOI: 10.15199/48.2023.01.19.

7. Shapiro M., Galperin V. (2005). Air classification of solid particles: a review. *Chemical Engineering and Processing. Process Intensification*. 44 (2): 279–285. DOI: 10.1016/j.cep.2004.02.022.

8. Aarabi M. J., Ebrahimi R. (2017). Pneumatic separation of mami cultivar almond (*Prunus amygdalus*) kernel from cracked shell. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*. 5(4). DOI: 10.18006/2017.5(4).573.577.

9. Aderinlewo A.A. (2011). Mathematical modelling of pneumatic cleaning of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). A Thesis in the Department of Agricultural and Environmental Engineering, Submitted to the Faculty of Technology in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy of the University of Ibadan. 194 p.



10. Aliev E. B., Bandura V. M., Pryshliak V. M., Yaropud V. M., Trukhanska O. O. (2018). Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 54 (1): 95–104.

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

12. Jafari S., Khazaei J., Arabhosseini A., Massah J., Khoshtaghaza M.H. (2011). Study on mechanical properties of sunflower seeds. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. Series Food Science and Technology*, 14

13. Malik M. A., Saini C. S., Yildiz F. (2016). Engineering properties of sunflower seed: Effect of dehulling and moisture content. *Cogent Food & Agriculture*. 2(1): 1145783. <https://doi.org/10.1080/23311932.2016.1145783>

14. Ali K. A. M., Zong W. Y., Yang L., El-Ghany H. M. A. (2021). Effect of Moisture Content on Sunflower Seed Physical and Mechanical Properties. In *International Journal of Engineering Research in Africa*. 57: 169–179. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/jera.57.1.69>.

15. Алієв Е. Б. (2020). Механіко-технологічні основи процесу прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Запоріжжя. 530 с.

16. Wolfram S. *An Elementary Introduction to the Wolfram Language*. Wolfram Media, Inc. 2015. 324 p.

References

1. Kudryavtsev I. M., Lutsenko M. V., Chursinov Yu. O. (2022). Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannya dotsil'nosti sortuvannya vidkhodiv zernovykh ta oliynykh kul'tur [*Technical and economic substantiation of the expediency of sorting grain and oil crop waste*]. «Nauka, tekhnolohiyi innovatsiyi». 2(22): 61–67. <http://doi.org/10.35668/2520-6524-2022-2-08>. [in Ukrainian].

2. Aliiev E. B. (2019). Fyzyko-matematychni modeli protsesiv pretsyziynoyi separatsiyi nasinnyevoho materialu sonyashnyku: monohrafiya [*Physico-mathematical models of processes of precision separation of sunflower seed material: monograph*]. Zaporizhzhya: STATUS. 196 s. ISBN 978-617-7759-32-3. [in Ukrainian].

3. Aliiev E. B., Patsula O. M., Hrytsenko V. T. (2017). Tekhnolohiya kompleksnoyi bezvidkhidnoyi pererobky makukhy z nasinnya oliynykh kul'tur z oderzhannyam vysokoyakisnykh

povnotsinnykh proteyinyvykh dobavok u vyhlyadi pelet ta tverdoho biopalyva: Naukovo-metodychni rekomendatsiyi [*Technology of complex waste-free processing of cake from oilseeds to obtain high-quality complete protein additives in the form of pellets and solid biofuel: Scientific and methodological recommendations*]. Instytut oliynykh kul'tur Natsional'noyi akademiyi ahrarnykh nauk Ukrainy. Elektronnyy analoh drukovanoho vydannya (elektronna knyha). Zaporizhzhya: STATUS. ISBN 978-617-7353-59-0. [in Ukrainian].

4. Bohomolov O. V., Zavorodniy O. I., Ol'shans'kyi V. P., Bohomolov O. O. (2019). Do pytannya separatsiyi zernovykh sumishey za sukupnistyu pruzhnykh ta aerodynamichnykh vlastyvostry [To the issue of separation of grain mixtures according to the set of elastic and aerodynamic properties]. Suchasni napryamky tekhnolohiyi ta mekhanizatsiyi pererobnykh i kharchovykh vyrobnytstv: Visnyk KHNTUS-H. Kharkiv: KHNTUS-H im. P. Vasylenka. 207: 5–11. <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/4924>. [in Ukrainian].

5. Kozachenko O. V., Bakum M. V., Mykhaylov A. D., Krekot M. M., Chala O. S., Zavorodniy O. I. (2023). Pidvyshchennya posivnykh vlastyvostry nasinnya safloru krasyl'noho na vibratsiyiniy nasinnyechysniy mashyni [*Improving the sowing properties of safflower dye seeds using a vibrating seed cleaning machine*]. Tsentral'noukrayins'kyi naukovy visnyk. Tekhnichni nauky. 7 (38), II: 83–90. DOI: 10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.83-90. [in Ukrainian].

6. Kotov B., Stepanenko S., Tsurkan O., Hryshchenko V., Pantsyr Y., Garasymchuk I., Spirin A., Kupchuk I. (2023). Fractioning of grain materials in the vertical ring air channel during electric field imposition. *Przeglad Elektrotechniczny*, 99 (1): 100–104. DOI: 10.15199/48.2023.01.19.

7. Shapiro M., Galperin V. (2005). Air classification of solid particles: a review. *Chemical Engineering and Processing. Process Intensification*. 44 (2): 279–285. DOI: 10.1016/j.cep.2004.02.022.

8. Aarabi M. J., Ebrahimi R. (2017). Pneumatic separation of mami cultivar almond (*prunus amygdalus*) kernel from cracked shell. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*. 5(4). DOI: 10.18006/2017.5(4).573.577.

9. Aderinlewo A.A. (2011). Mathematical modelling of pneumatic cleaning of cowpea (*Vigna unguiculata* (L). Walp). A Thesis in the Department of Agricultural and Environmental Engineering, Submitted to the Faculty of Technology in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy of the University of Ibadan. 194 p.

10. Aliev E. B., Bandura V. M., Pryshliak



V. M., Yaropud V. M., Trukhanska O. O. (2018). Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 54 (1): 95–104.

11. Aliiev E. B. (2023). *Chysel'ne modelyuvannya protsesiv ahropromyslovoho vyrobnytstva: pidruchnyk [Numerical modeling of agro-industrial production processes: a textbook]*. Kyiv: Ahrarna nauka, 340 s. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9>. [in Ukrainian].

12. Jafari S., Khazaei J., Arabhosseini A., Massah J., Khoshtaghaza M.H. (2011). Study on mechanical properties of sunflower seeds. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. Series Food Science and Technology*, 14

13. Malik M. A., Saini C. S., Yildiz F. (2016). Engineering properties of sunflower seed: Effect of dehulling and moisture content. *Cogent Food & Agriculture*. 2(1): 1145783. <https://doi.org/10.1080/23311932.2016.1145783>

14. Ali K. A. M., Zong W. Y., Yang L., El-Ghany H. M. A. (2021). Effect of Moisture Content on Sunflower Seed Physical and Mechanical Properties. In *International Journal of Engineering Research in Africa*. 57: 169–179. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/jera.57.169>.

15. Aliiev E. B. (2020). *Mekhaniko-tehnolohichni osnovy protsesu pretsyziynoyi separatsiyi nasinnyevoho materialu sonyashnyku: dys. ... d-ra tekhn. nauk: 05.05.11 [Mechanical and technological basis of the process of precision separation of sunflower seed material: thesis. ... Dr. Tech. Sciences: 05.05.11]*. Zaporizhzhya. 530 s. [in Ukrainian].

16. Wolfram S. *An Elementary Introduction to the Wolfram Language*. Wolfram Media, Inc. 2015. 324 p.

NUMERICAL SIMULATION OF THE WASTE SEPARATION PROCESS OF A SUNFLOWER SEED MIXTURE IN THE LIQUIDATION CHAMBER OF AN AERODYNAMIC SEPARATOR

Seed waste and debris contain 30–50 % of grain or oil impurities suitable for further use, making them a promising raw material for

processing. Mechanical sorting on specialized machines is the only way to extract this valuable raw material. The aerodynamic process of separating sunflower seed mixture waste into husk, kernels, and other impurities is an important part of processing at an oil extraction plant, but the issue of incomplete separation of husk from kernels reduces processing quality and leads to food product losses. Optimizing the separation process of sunflower seed mixture waste is a relevant task.

The aim of the work is to conduct numerical modeling of the process of separating sunflower seed mixture waste in the vacuum chamber of a developed aerodynamic separator and to justify its rational design and technological parameters.

As a result of the first stage of numerical modeling of the separation process of sunflower seed mixture waste components in the vacuum chamber, trajectories and distributions of the components were obtained. Using Wolfram Cloud, regression equations were calculated for the dependence of the distance between the peaks of the distributions of sunflower husk and small particles ($\Delta y'$) on the effective diameter (D_p), feed rate of components (V_p), and curvature radius of the upper edge of the vacuum chamber (R).

It was found that with $D_p = 0.01$ m, $V_a = 3.35$ m/s, $R = 0.054$ m, the average distance between the peaks of the husk and small particles distributions is $\Delta y' = 0.443$ m. In the Simcenter Star-CCM+ model, the rational value for the intersection point of the mixture component distributions (y'_{int}) was obtained as 0.43 m.

At the second stage of modeling the separation process in a column-type aerodynamic separator, regression equations for the separation coefficient (δ) were calculated based on the content of components in the seed mixture (ψ_h, ψ_d, ψ_k), feed rate (q), and airflow velocity (V_a).

Rational values of factors were established to ensure high separation quality with sufficient productivity and reduced energy consumption: $q = 133$ kg/h, $V_a = 2.46$ m/s, with the separation coefficient $\delta = 0.92$.

Key words: seed, mixture, components, aerodynamic separator, rarefaction chamber, air flow, parameters, speed, efficiency, modeling.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

Кудрявцев Ігор Миколайович – здобувач науково ступеня доктора філософії Дніпровського державного аграрно-економічного університету (вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, Україна, 49000, e-mail: igorrabota898@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9939-7014>)

Kudriavtsev Ihor – recipient of the scientific degree of Doctor of Philosophy at the Dnipro State Agrarian and Economic University (St. S. Efremova, 25, Dnipro, Ukraine, 49000, e-mail: igorrabota898@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9939-7014>).