

Макаренко О. В.
ORSID 0009-0007-3350-7456
E-mail: A.makarenko@avec.ua

Державний біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЯ
ЗЕРНОВИХ ТА ЗЕРНОБОБОВИХ
КУЛЬТУР ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ
МЕХАНІЧНИХ ІНТЕНСИФІКАТОРІВ**

DOI <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.119>

УДК 631.363.3

Макаренко О. В. Підвищення ефективності процесу розділення насіння зернових та зернобобових культур шляхом застосування механічних інтенсифікаторів

Анотація. Встановлення додаткових сітчастих інтенсифікаторів на робочій поверхні пневмосепарувального столу покращує якісні показники процесу при одночасному збільшенню питомої подачі матеріалу. Для адекватного визначення конструктивних (геометричних) параметрів сітчастого інтенсифікатора використано методику механіко-математичного моделювання процесу розділення насінневих матеріалів з урахуванням конструктивних параметрів і кінематичних режимів сепаруючої машини та фізико-механічних властивостей сої та нуту, де насінневий матеріал представлено як багатофазне середовище. Наведено результати математичного моделювання, а саме, залежність чистоти основної фракції від визначальних параметрів процесу.

Ключові слова: насінневий матеріал, багатофазне середовище, сепаруюча машина, механічні інтенсифікатори.

Makarenko O. V. Improving the Efficiency of the Separation Process of Cereal and Legume Seeds through the Use of Mechanical Intensifiers.

Abstract. The installation of additional mesh intensifiers on the working surface of a pneumatic separation table improves the qualitative indicators of the process while simultaneously increasing the specific feed rate of the material. To adequately determine the structural (geometric) parameters of the mesh intensifier, a method of mechanical-mathematical modeling of the seed material separation process was used, taking into account the structural parameters and kinematic operating modes of the separating machine, as well as the physical and mechanical properties of soybean and chickpea seeds, where the seed material is considered as a multiphase medium. The results of mathematical modeling are presented, namely the dependence of the purity of the main fraction on the determining parameters of the process.

Keywords: seed material, multiphase medium, separating machine, mechanical intensifiers.

Актуальність проблеми

За даними Європейської парламентської дослідницької служби (EPRS) [1], Український банк землі сільськогосподарського призначення до початку повномасштабних бойових дій, становив 41,3 млн. га, з них орної 32,7 млн. га. В той же час, за даними [2], у 2022 році Україна втратила до 20% територій, що еквівалентно 10 млн. га, з них 8 млн. га – орні землі. До додаткових втрат слід віднести забруднення вибухонебезпечними предметами. За інформацією Міністерства оборони України [3] площа, що має потенційне забруднення становить 139 000 км².

Аналіз літературних джерел дозволив встановити: значне зменшення площі орних земель, а у прифронтових областях має місце значне падіння врожайності культур, що в свою чергу, фіксується у зменшеннях об'ємів валового виробництва; економічні втрати у зв'язку з погіршенням логістичних витрат та коливаннями валютних курсів; деградація ґрунтів та екологічні ризики.

За даними FAO [4], відновлення (формування) одного сантиметру верхнього шару може тривати від 100 до 400 років.

Відповідно до положень Стратегії розвитку сільського господарства та сільських територій України до 2030 року, а також затвердженого операційного плану її реалізації на 2025–2027 роки [5], аграрна галузь держави спрямована на активне входження до глобальної продовольчої системи з метою зміцнення продовольчої безпеки як на національному рівні, так і на рівні міжнародних ринків. У цьому контексті сільське господарство визначається одним із ключових пріоритетів економічного розвитку країни та важливим чинником підтримання національної безпеки, збереження державного суверенітету і стабільності. У стратегічних документах також наголошується, що міжнародний ринок зерна відіграє провідну роль у підтриманні рівноваги та стабільності світових продовольчих систем.

З метою зменшення витрат на виробництво зернових і зернобобових культур значна частина середніх та малих агропромислових підприємств використовує насіннєвий матеріал власного виробництва. Водночас отримання насіння з високими посівними якостями та значним біологічним потенціалом можливе лише за умови його якісної підготовки. Одним із ключових етапів такої підготовки є ефективне очищення насіннєвого матеріалу від домішок, присутність яких суттєво погіршує схожість, енергію проростання та загальну життєздатність насіння. Сучасні технологічні лінії підготовки насіння передбачають використання комплексу машин для первинного, вторинного очищення та точного розділення насіннєвих сумішей [6]. Відповідно до вимог нормативних документів, до технологій і технічних засобів підготовки насіння висуваються підвищені вимоги щодо ошадливого поводження з насіннєвим матеріалом, що має забезпечувати збереження його біологічних властивостей і мінімізацію механічних пошкоджень. Особливу роль у технологічному процесі відіграють сепаруючі машини точного розділення, до яких належать фотосепаратори, сепаратори прецизійної обробки, віброфрикційні сепаратори, а також установки для розділення насіннєвого матеріалу в псевдозрідженому шарі за густиною. Серед зазначених технічних рішень найбільшого поширення набули машини, що здійснюють сепарацію насіння за густиною, що пояснюється їх відносно високою продуктивністю, економічною доцільністю та здатністю забезпечувати належну якість очищення.

Разом із тим проведений аналіз наукових публікацій, дослідних зразків та серійно виготовлених машин цього класу засвідчив наявність системних науково-технічних недоліків, які призводять до помилок у розрахунках, проектуванні та конструюванні сепаруючих машин і, відповідно, стримують подальший розвиток даного напрямку техніки [7]. Зокрема, у більшості теоретичних моделей процесу розділення насіннєвих матеріалів за густиною розглядається рух окремої частинки матеріалу, без урахування її взаємодії з іншими частинками шару та без врахування конструктивних особливостей робочої поверхні сепаратора.

Підвищення продуктивності або покращення якості розділення в таких системах обмежується площею робочої поверхні та величиною подачі матеріалу. При збільшенні подачі за незмінної площі робочої поверхні спостерігається суттєве погіршення показників якості процесу. Це пояснюється затуханням імпульсу коливань, що передається від робочої поверхні через нижні елементарні шари до частинок, розташованих на значній відстані від неї [8]. У зв'язку з цим доцільним є застосування

додаткових механічних інтенсифікаторів, які здатні активізувати переміщення частинок у шарі та покращити умови їх розшарування [9].

Таким чином, підвищення ефективності технологічного процесу підготовки насіння шляхом обґрунтування раціональних конструктивних параметрів сепаруючої машини для розділення насінневого матеріалу за густиною, а також визначення оптимальних параметрів механічних інтенсифікаторів, встановлених на робочій поверхні, і кінематичних режимів роботи машини, є актуальним науково-прикладним завданням. Його вирішення сприятиме підвищенню якості насінневого матеріалу, зростанню ефективності виробництва та зміцненню продовольчої безпеки України.

Формулювання мети дослідження

Мета роботи – аналіз впливу механічних інтенсифікаторів на ефективність процесу розділення насінневих матеріалів зернових та зернобобових культур.

Результати досліджень

1 Моделювання процесу розділення насінневих матеріалів у псевдорозрідженому шарі з використанням механічних інтенсифікаторів

Процес розділення насінневих матеріалів на робочих поверхнях пневмосепаруючих столів (ПСС) складається з двох фах: перша фаза – процес переміщення матеріалу від зони завантаження до зони вивантаження та друга фаза – процес розшарування матеріалу на фракції [10]. Якість процесу розділення залежить від раціонального співвідношення конструктивних параметрів та кінематичних режимів сепаруючої машини і фізико-механічних властивостей матеріалу, що обробляється [11].

Удосконалення технологічних процесів потребує детального аналізу закономірностей переміщення та взаємодії шарів частинок, що створює передумови для вдосконалення методів сепарації та підвищення результативності роботи псевдозріджених сепараційних систем.

Мінімізація втрат біологічно цінної частини насінневого матеріалу значною мірою залежить від раціонального вибору технологічних параметрів процесу, що забезпечує зменшення технологічних втрат і формування рівномірного розподілу частинок за фракціями.

Створення та розвиток математичних моделей технологічних процесів вимагає використання сучасних розрахункових підходів, які дозволяють описати поведінку насіння у робочій зоні обладнання та визначити оптимальні режими функціонування сепаруючих машин [12].

Таким чином, результати проведених досліджень мають подвійне значення – фундаментальне і прикладне, оскільки сприяють більш глибокому розумінню механізмів сепарації сипких матеріалів та можуть бути використані для вдосконалення технологічних процесів у аграрному виробництві.

Під час формування багатомірних математичних моделей процесу сепарації приймається припущення, що під впливом спрямованого повітряного потоку та коливального руху робочої поверхні відбувається інтенсивне вертикальне розшарування псевдозрідженого шару насінневого матеріалу вздовж осі, перпендикулярної до площини псевдозрідженого сепараційного столу. У результаті такого процесу формується N шарів частинок, кожен із яких характеризується власними фізико-механічними параметрами, зокрема густиною, аерогравітаційними та гідродинамічними властивостями.

Кінематика кожного з утворених шарів розглядається з позицій механіки багатофазних середовищ, де кожен шар частинок моделюється як окрема

квазібезперервна фаза, а взаємодія між ними визначається граничними умовами на межах їх контакту. У такій постановці задачі динаміка псевдозрідженого шару, розшарованого за висотою, описується як рух багатофазної системи типу $N+I$, яка включає N шарів дискретного зернового матеріалу та одну безперервну газову фазу – повітря.

При моделюванні розподілу частинок за густиною передбачається існування граничних значень густини для різних фракцій матеріалу. До "легкої" фракції відносять домішки, пошкоджені або некондиційні насінини, а також інші компоненти з пониженими значеннями густини. Натомість, "важка" фракція представлена біологічно повноцінним, життєздатним насінням із підвищеними значеннями густини. Між цими крайніми групами формується проміжна – "середня" фракція, до складу якої входять частинки з середніми характеристиками густини.

Для математичного опису процесу припускається, що вертикальний розподіл частинок за густиною підпорядковується нормальному закону, а положення шарів із різними значеннями густини відповідає математичному сподіванню цього розподілу. Оскільки густина частинок змінюється неперервно, а точний розподіл їх кількості за цим параметром зазвичай невідомий, це суттєво ускладнює отримання точного аналітичного розв'язку задачі. Тому для спрощення розрахунків приймається припущення, що функції розподілу формуються для усереднених значень густини трьох основних фракцій – легкої, середньої та важкої, а дисперсія координат відповідних шарів приймається рівною одиниці.

Важливою передумовою ефективного функціонування ПСС є визначення раціональних технологічних параметрів їх роботи. До таких параметрів належать кути нахилу робочої поверхні столу, частота та амплітуда її коливань, а також швидкість і напрямок повітряного потоку. Правильний вибір цих характеристик істотно впливає на кінематику переміщення частинок у шарі, інтенсивність їх розшарування та якість кінцевого поділу матеріалу на фракції.

Разом з тим значна різноманітність фізико-механічних властивостей насінневого матеріалу суттєво ускладнює опис процесу сепарації засобами класичних аналітичних методів. Це зумовлює необхідність створення спеціалізованих механіко-математичних моделей, які дають змогу адекватно відобразити поведінку частинок у робочій зоні сепаратора. Використання таких моделей дозволяє не лише підвищити ефективність розділення, але й визначити оптимальні режими роботи обладнання без проведення значної кількості трудомістких експериментальних досліджень. У результаті досягається зниження виробничих витрат, зростання продуктивності та підвищення стабільності технологічного процесу.

У представленому дослідженні для опису процесу застосовано багатофазний підхід, відповідно до якого насінневий матеріал розглядається як псевдорідина система, що складається з декількох шарів частинок. Кожен із цих шарів характеризується власними гідродинамічними та аерогравітаційними властивостями. Така концепція дає можливість врахувати особливості фізичної взаємодії частинок у псевдозрідженому середовищі та описати процес переміщення шарів із різною густиною за відмінними траєкторіями, що сприяє більш глибокому розумінню механізмів сепарації.

Результативність застосування цієї технології значною мірою визначається комплексом робочих параметрів, серед яких найбільший вплив мають кути нахилу робочої поверхні, частота її коливань та швидкість повітряного потоку. Оптимізація цих характеристик дозволяє підвищити якість розділення насінневого матеріалу, мінімізувати втрати біологічно повноцінного насіння та збільшити загальну ефективність процесу сепарації.

У межах даної роботи використано сепараційну систему, в якій зерновий матеріал розділяється на шари у псевдорозрідженому середовищі. Загальний вигляд робочої поверхні з встановленим сітчастим інтенсифікатором наведено на рис. 1.

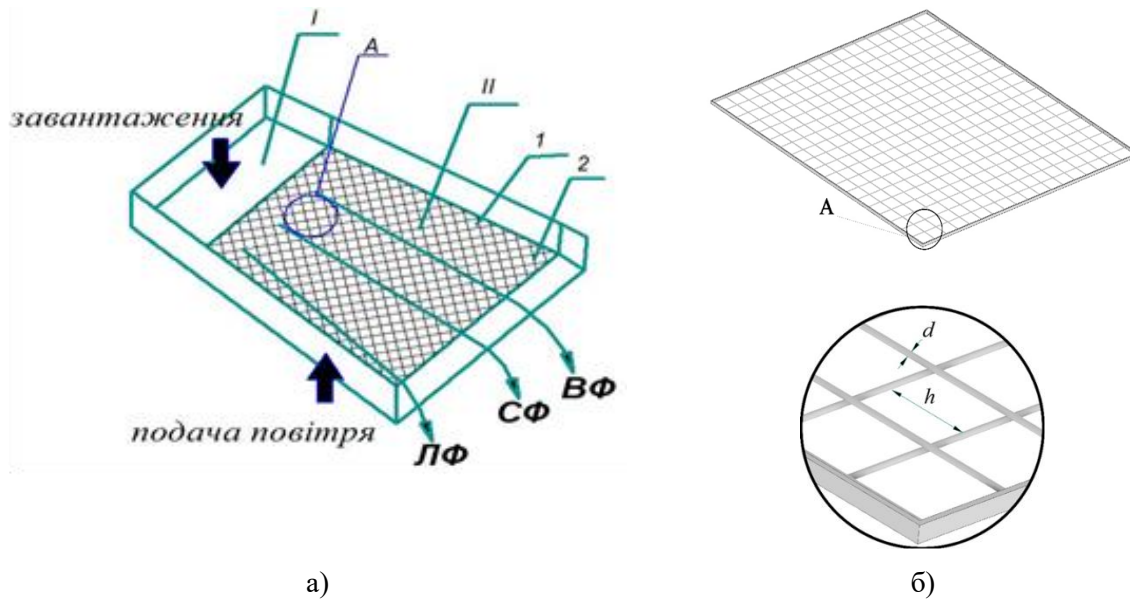


Рис. 1. Загальний вид робочої поверхні пневмосепарувального столу з встановленим сітчастим інтенсифікатором (а): ЛФ – легка фракція, СФ – середня фракція, ВФ – важка фракція; загальний вид інтенсифікатора (б): d – діаметр, h – шаг розташування прутів перетину. Дата подачі заявки на патент України 19.12.2024 р.

Для опису руху рідини використовуються основні рівняння механіки суцільного середовища. Усі моделі суцільного середовища передбачають визначення полів напружень σ_{ij} , деформацій ε_{ij} , переміщень u_i , (швидкостей V_i) а також температури T , тиску p і густини ρ у залежності від часу. Для знаходження цих полів використовують такі співвідношення:

- рівняння руху, за дією зовнішніх навантажень X_i , записані в термінах напружень

$$\sigma_{ij,j} + X_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}; \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (1)$$

- співвідношення Коші, що пов'язують малі деформації та переміщення

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (2)$$

В термінах швидкостей співвідношення Коші мають вигляд:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (V_{i,j} + V_{j,i}). \quad (3)$$

- умови сумісності деформацій

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{ik}}{\partial x_j \partial x_l} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{jl}}{\partial x_i \partial x_k} = \frac{\partial^2 \varepsilon_{il}}{\partial x_j \partial x_k} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{jk}}{\partial x_i \partial x_l}, \quad (4)$$

- граничні та початкові умови,

- рівняння стану, що пов'язують тиск, густину та температуру середовища.

Однак, вказаних співвідношень недостатньо для однозначного визначення σ_{ij} , ε_{ij} , u_j ($i, j = 1, 2, 3$). Тому в механіці рідини використовують співвідношення між

напруженнями та швидкостями деформацій. Вважаємо, що компоненти тензора напружень лінійно зв'язані з компонентами тензору швидкостей деформацій.

Відмінні типи залежностей відповідають різним моделям рідини. Введемо такі припущення щодо псевдорідкого середовища: вважатимемо рідину такою що стискається та в'язкою; передбачимо, що збурення тиску є незначними, тобто розглядатимемо задачу у лінійному формулюванні; застосовуватимемо фундаментальні закони механіки рідини, зокрема закон збереження маси (рівняння неперервності) у такому вигляді:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} = - \operatorname{div}(\rho_f \mathbf{V}_f). \quad (5)$$

Далі використовуємо рівняння руху рідини у напруженнях (наслідок закону збереження імпульсу) з врахуванням об'ємних сил \mathbf{F} у вигляді:

$$\rho_f \frac{d\mathbf{V}_f}{dt} = \rho_f \mathbf{F} + \operatorname{div}(\boldsymbol{\sigma}_f). \quad (6)$$

Для визначення компонентів тензору напружень приймаємо гіпотезу Стокса:

$$\boldsymbol{\sigma}_f = - \left(P + \frac{2}{3} \mu \right) \mathbf{I} + \dot{\mathbf{S}}, \quad (7)$$

де $\dot{\mathbf{S}}$ – девіатор швидкостей деформації; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості.

$$\dot{\mathbf{S}} = \begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_{11} - \dot{e}_0 & \dot{\varepsilon}_{12} & \dot{\varepsilon}_{13} \\ \dot{\varepsilon}_{12} & \dot{\varepsilon}_{22} - \dot{e}_0 & \dot{\varepsilon}_{23} \\ \dot{\varepsilon}_{13} & \dot{\varepsilon}_{23} & \dot{\varepsilon}_{33} - \dot{e}_0 \end{pmatrix}, \quad \dot{e}_0 = \frac{1}{3} (\dot{\varepsilon}_{11} + \dot{\varepsilon}_{22} + \dot{\varepsilon}_{33}). \quad (8)$$

Застосовуємо рівняння стану у вигляді $p = p(\rho)$ та співвідношення:

$$\frac{\partial p}{\partial \rho} = c^2, \quad (9)$$

де c – швидкість звуку в середовищі.

Розглянемо рух багатошарової рідини. Нехай кожний шар характеризується такими параметрами: густина ρ_n , μ_n – коефіцієнт динамічної в'язкості, h_n – середня товщина шару. Рівняння руху для кожного шару в інваріантній формі матимуть вигляд:

$$\rho_n \frac{d\mathbf{V}^{(n)}}{dt} = - \nabla p^{(n)} + \mu_n \Delta \mathbf{V}^{(n)} + \rho_n \mathbf{F}^{(n)} \quad (10)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{V}^{(n)} = (\nabla \cdot \mathbf{V}^{(n)}) = 0 \quad (11)$$

В рівняннях (10)-(11) вектор швидкості $\mathbf{V}^{(n)}$ має такі компоненти $\mathbf{V}^{(n)} = (V_1^{(n)}, V_2^{(n)}, V_3^{(n)})$, вектор масових сил $\mathbf{F}^{(n)}$ в координатному вигляді зображується як $\mathbf{F}^{(n)} = (F_1^{(n)}, F_2^{(n)}, F_3^{(n)})$. Диференціальний оператор $\frac{d}{dt}$ має вигляд $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{V}^{(n)} \cdot \nabla)$.

2 Аналітична модель процесу розділення сої за допомогою інтенсифікаторів з урахуванням геометричних параметрів та режиму роботи

Розглянуто сітчастий інтенсифікатор, призначений для розділення НМ за фізико-механічними властивостями (густина, форма, аеродинамічний опір). Конструкція включає: нахилену вібраційну площину та систему перегородок з кроком s і висотою h .

Модель включатиме врахування швидкості повітряного потоку, спрямованого через шар частинок; напрям вібрації уздовж осі x , перпендикулярно до перегородок.

Геометричні параметри сітчастого інтенсифікатора: s – крок встановлення перегородок (м); h – висота перегородки (м); L – довжина робочої частини (м); θ – кут нахилу інтенсифікатора (рад); H – початкова висота шару насіння (м); A – амплітуда вібрації (м); f – частота вібрації (Гц).

Вібрація має визначальний вплив на процес розподілу часток НМ. Математично це можна описати через гармонійні коливання:

$$y(t) = A\varphi(ft + \varphi). \quad (12)$$

Далі наведено фізичні параметри інтенсифікатора:

V_{bc} - швидкість повітряного потоку, приведена до площі шару;

$V_{кр}$ - критична швидкість псевдозрідження;

ε - пористість динамічного шару частинок, яка обчислюється за формулою:

$$\varepsilon = 1 - \frac{1 - \varepsilon_0}{h_1/h_0}, \quad (13)$$

де ε_0 - початкова пористість шару;
 h_1/h_0 - ступінь розширення шару.

Величина h_1/h_0 описується таким чином:

$$\frac{h_1}{h_0} = a + b \frac{V_{bc}}{V_{кр}}. \quad (14)$$

Тут a, b – сталі, різні для різних матеріалів.

З (13) та (14) маємо таку формулу

$$\varepsilon = 1 - \frac{1 - \varepsilon_0}{a + bV_{bc}/V_{кр}}. \quad (15)$$

Початкову пористість ε_0 можна обчислити з урахуванням вібраційного впливу за формулою:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_\infty(1 - \exp(-k_\varepsilon J_{b,\bar{\rho}})) K_y, \quad (16)$$

де: ε_∞ - максимальна пористість у стаціонарному стані;

k_ε - емпіричний коефіцієнт;

$J_{b,\bar{\rho}}$ - вібраційне прискорення, яке обчислюється за формулою:

$$J_{b,\bar{\rho}} = \frac{(2\pi f)^2}{A}; \quad (17)$$

K_y - коефіцієнт ущільнення шару (відношення питомої ваги частинок до ваги у псевдозрідженому стані), що обчислюється за формулою:

$$K_y = \frac{G}{G_y}. \quad (18)$$

З урахуванням дії сітчастого інтенсифікатора в рівняннях руху НМ вводиться модифікована сила опору руху через НМ за формулою:

$$F_{опір} = \mu_f mg \cos\theta(1 - \varepsilon). \quad (19)$$

Знайдемо далі умову переходу частинки через перегородку. Частинка може подолати перегородку висотою h , якщо її вертикальна швидкість достатньо велика. Це накладає таку умову на амплітуду A :

$$A \cdot 2\pi f > \sqrt{2gh}. \quad (20)$$

З (20) маємо

$$A > \frac{\sqrt{2gh}}{2\pi f}. \quad (21)$$

Умова (21) задає мінімальну амплітуду для забезпечення ефективного переміщення частинок через перегородки інтенсифікатора.

З формули (21) можемо також знаходити висоту перегородки інтенсифікатора за заданою амплітудою.

Крім того, враховуємо швидкісний поріг V_{th} , пов'язаний із геометрією кроку S та вібраційним імпульсом f , за формулою:

$$V_{th} = \frac{S}{T} = sf. \quad (22)$$

Якщо $V > V_{th}$, то ефективність використання інтенсифікатора суттєво зменшується.

3 Обговорення отриманих результатів

Комп'ютерне моделювання чистоти розділення фракцій на пневмосортувальному столі з урахуванням сітчастого інтенсифікатора

За результатами розв'язання рівнянь механіко-математичної моделі побудовано графічні залежності зміни чистоти основної фракції від визначальних параметрів процесу (рис. 2).

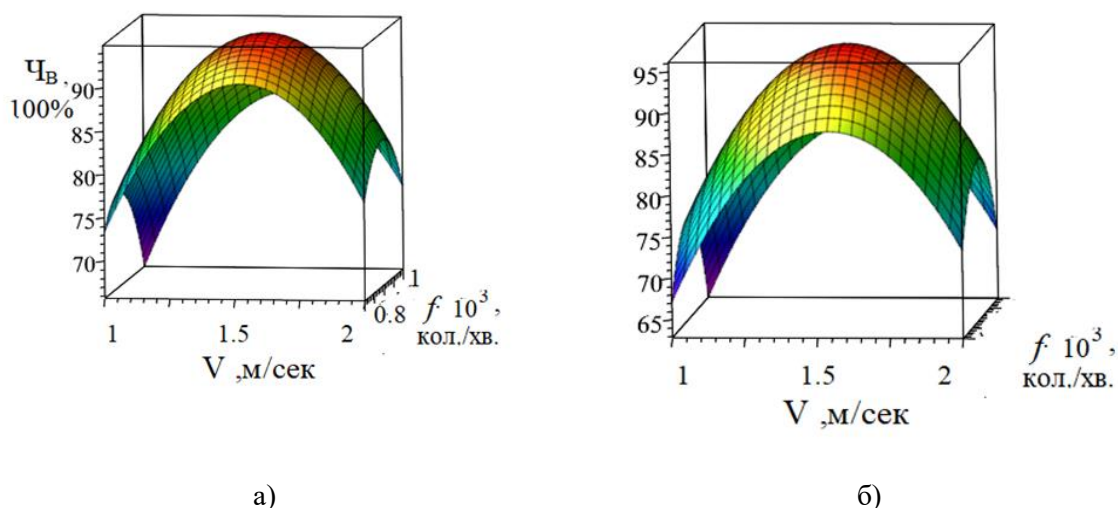


Рис. 2. Зміна чистоти основної фракції НМ сої (а) та нуту (б) від частоти коливань (f) та швидкості (V) повітряного потоку

При цьому крок встановлення перегородок інтенсифікатора має визначатись:

$$0.06m < s < 0.16m. \quad (23)$$

Далі переходимо до вивчення січних отриманих поверхонь $\text{Ч}_B(A, f)$.

На рис.3 та 4 наведено січні поверхонь для сої та нуту в залежності від різних параметрів.

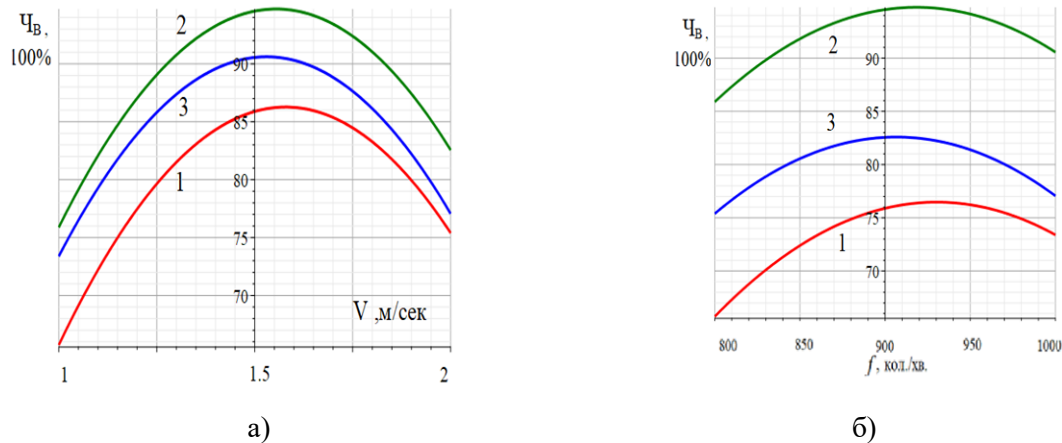


Рис. 3. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ сої в залежності від частоти (а) (1 – 800 кол./хв.; 2 – 900 кол./хв.; 3 – 1000 кол./хв.) коливань ПСС та швидкості повітряного потоку (б): (1 – 1 м/с, 2 – 1.5 м/с, 3 – 2 м/с)

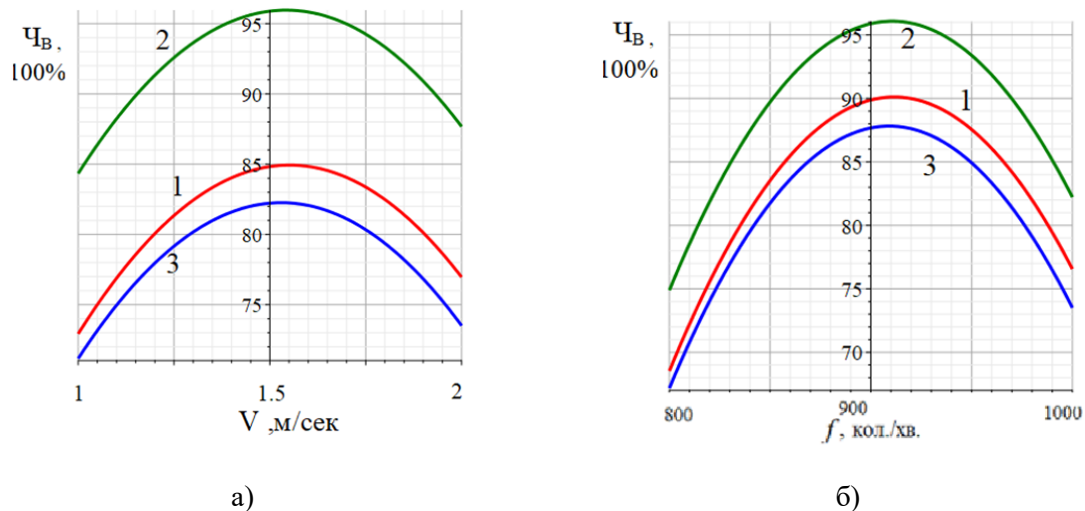


Рис. 4. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ нуту в залежності від частоти (а) (1 – 800 кол./хв.; 2 – 900 кол./хв.; 3 – 1000 кол./хв.) коливань ПСС та швидкості повітряного потоку (б): (1 – 1 м/с, 2 – 1.5 м/с, 3 – 2 м/с) з урахуванням дії інтенсифікатора

Досліджені залежності чистоти основної фракції від частоти (а) та швидкості повітря (б).

Вивчались зміни чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ сої та нуту в залежності від вказаних параметрів з урахуванням дії інтенсифікатора.

Далі проведено порівняння даних розрахунків для зміни чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ нуту та сої з урахуванням та без урахуванням дії інтенсифікатора з такими параметрами $h = 0.0085$ м та $s = 0.16$ м. На рис. 5. наведені результати цього порівняння.

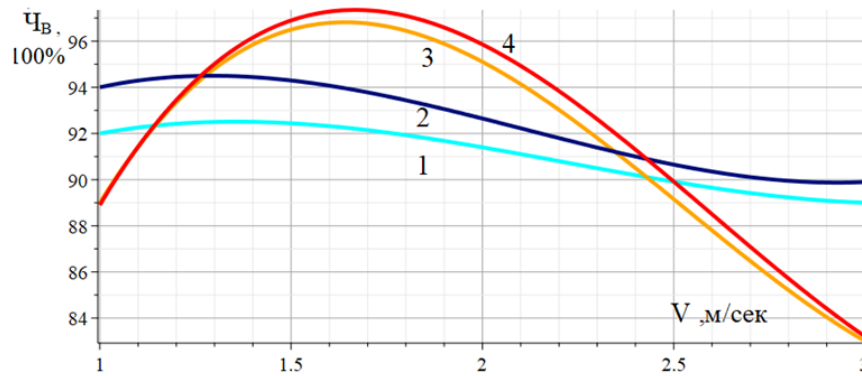


Рис.5. Чистота важкої фракції, отриманої розділенням НМ на ПСС, в залежності від швидкості повітряного потоку для матеріалів сої та нуту в залежності від швидкості повітря (1 – соя, без інтенсифікатора, 2 – соя, з інтенсифікатором, 3 – нут, без інтенсифікатора, 4 – нут, з інтенсифікатором)

З цих даних можна зробити висновок, що наявність інтенсифікатора за заданих параметрах приводить до підвищення чистоти важкої фракції.

При швидкості повітря більш, ніж 2м/с відбувається погіршення якості сортування.

Висновки

1. За результатами критичного аналізу ефективності роботи ПСС встановлено, що збільшення продуктивності сепаруючої машини обмежено геометричними розмірами робочої поверхні, а збільшення подачі матеріалу знижує якісні показники процесу. Встановлено, що використання додаткових механічних інтенсифікаторів на робочій поверхні має позитивний ефект.

2. Механіко-математичний метод моделювання процесу розділення НМ у псевдорозрідженому середовищі, в якому НМ представлено як багатофазне середовище та враховує конструктивні параметри, кінематичні режими ПСС і фізико-механічні властивості матеріалу є дієвим та адекватним.

3. Виходячи з (22) та (23) можна визначити раціональні геометричні параметри сітчастого інтенсифікатора з урахуванням фізико-механічних властивостей матеріалу. Встановлено підвищення ефективності процесу розділення НМ при використанні сітчастого інтенсифікатора, який становлено на робочій поверхні ПСС. Подано заяву на корисну модель.

Список використаних джерел

1. Дані Європейського парламентського вісника. https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/760432/EPRS_BRI%282024%29760432 (дата звернення 04.03.2026 р.)

2. KSE. AGRICULTURE IN UKRAINE: PRE-WAR, STATUS QUO AND A LOOK AHEAD. July, 2023. P. 78. <https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/03/Market-analysis-and-Outlook-of-Ukraine-2023> (дата звернення 05.03.2026 р.)

3. <https://mod.gov.ua/en/news/the-area-of-ukrainian-territories-potentially-contaminated-by-mines-and-explosive-hazards-decreased-by-17-000-km-in-2024> (дата звернення 05.03.2026 р.)

4. <https://www.fao.org/newsroom/story/Cherishing-the-ground-we-walk-on/en?utm> (дата звернення 06.03.2026 р.)

5. <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-skhvalennia-strategii-rozvytku-silskoho-hospodarstva-ta-silskykh-terytorii-v-ukraini-na-period-i151124-1163> (дата звернення 06.03.2026 р.)
6. Бредихін В.В., Богомолов О.В., Кісь-Коркіщенко Л.В., Сліпченко М.В., Іващенко С.Г., Ірклієнко В.І., Черняєв О.О., Тікунов С.Р. Наукові основи ощадливої підготовки насіння з поліпшеним біологічним потенціалом: монографія. Харків, Діса+, 2023. 401 с.
7. Ольшанський В.П., Бредихін В.В., Лук'яненко В.М., Півень М.В., Сліпченко М.В., Харченко С.О. Теорія сепарування зерна: монографія. Харків, 2017. 802 с.
8. Bredykhin Vadym, Tikunov Stanislav, Slipchenko Maksim, Aifyorov Oleksiy, Bogomolov Alexey, Shchur Taras, Kocira Slawomir, Kiczorowski Piotr, Paslavskyy Rostyslav (2023). Improving efficiency of corn seed separation and calibration process. *Scienco. Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 27, No. 1. P. 241 – 253. DOI: <https://doi.org/10.2478/agriceng-2023-0018>
9. Vadym Bredykhin, Taras Shchur, Stanislav Tikunov, Oleksandr Makarenko, Vladyslav Mezentsev, Weronika Kruszelnicka. Evaluation of maize seed sieving performance using sieves with cassini oval shape openings. *Journal of Agricultural Engineering*. 2024. V. 61. P. 666-674. DOI: <https://doi.org/10.52151/jae2024615.1875>
10. Slipchenko Maksym, Bredykhin Vadym, Kis-Korkishhenko Liliia, Pak Andrey, Aifyorov Oleksiy. Construction of a physical-mathematical model of oscillations of the unbalanced vibrator of the pneumatic sorting table. *European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. T. 4/7. № 124. P. 89 – 98. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.281425>
11. Алієв Елічин Бахтияр огли. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС, 2019. 196 с.
12. Степаненко С.П. Механіко-технологічне обґрунтування процесів і обладнання безрешітного фракціонування зернових матеріалів: автореф. дис. ...докт. техн. наук: 05.05.11, Глеваха, 2020. 48 с.
13. Sinha J. P., et al. Seed processing for quality upgradation // *Seed Processing: Principles and Practices*. – Singapore: Springer, 2023. – P. 183–208. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-5888-5_10
14. Rojas-Yana D., et al. Machine vision system for sorting lentils using deep learning // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.108693>

References

1. Data from the European Parliamentary Gazette. https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/760432/EPRS_BRI%282024%29760432 (date of application: March 4, 2026)
2. KSE. AGRICULTURE IN UKRAINE: PRE-WAR, STATUS QUO AND A LOOK AHEAD. July, 2023. P. 78. <https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/03/Market-analysis-and-Outlook-of-Ukraine-2023> (date of application: March 5, 2026)
3. <https://mod.gov.ua/en/news/the-area-of-ukrainian-territories-potentially-contaminated-by-mines-and-explosive-hazards-decreased-by-17-000-km-in-2024> (date of application: March 5, 2026)
4. <https://www.fao.org/newsroom/story/Cherishing-the-ground-we-walk-on/en?utm> (date of application: March 6, 2026)
5. <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-skhvalennia-strategii-rozvytku-silskoho-hospodarstva-ta-silskykh-terytorii-v-ukraini-na-period-i151124-1163> (date of application:

March 6, 2026)

6. Bredykhin V.V., Bogomolov O.V., Kis-Korkishchenko L.V., Slipchenko M.V., Ivashchenko S.G., Irkliyenko V.I., Chernyaev O.O., Tikunov S.R. Scientific foundations of economical seed preparation with improved biological potential: monograph. Kharkiv,

7. Olshansky V.P., Bredykhin V.V., Lukyanenko V.M., Piven M.V., Slipchenko M.V., Kharchenko S.O. Theory of grain separation: monograph. Kharkiv, 2017. 802 p.

8. Bredykhin Vadym, Tikunov Stanislav, Slipchenko Maksim, Aifyorov Oleksiy, Bogomolov Alexey, Shchur Taras, Kocira Slawomir, Kiczorowski Piotr, Paslavskyy Rostyslav (2023). Improving efficiency of corn seed separation and calibration process. Sciendo. Agricultural Engineering. 2023. Vol. 27, No. 1. P. 241 – 253. DOI: <https://doi.org/10.2478/agriceng-2023-0018>

9. Vadym Bredykhin, Taras Shchur, Stanislav Tikunov, Oleksandr Makarenko, Vladyslav Mezentsev, Weronika Kruszelnicka. Evaluation of maize seed sieving performance using sieves with cassini oval shape openings. Journal of Agricultural Engineering. 2024. V. 61. P. 666-674. DOI: <https://doi.org/10.52151/jae2024615.1875>

10. Slipchenko Maksym, Bredykhin Vadym, Kis-Korkishhenko Liliia, Pak Andrey, Alforyorov Oleksiy. Construction of a physical-mathematical model of oscillations of the unbalanced vibrator of the pneumatic sorting table. European Journal of Enterprise Technologies. 2023. T. 4/7. № 124. P. 89 – 98. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.281425>

11. Aliyev Elichin Bakhtiyar ogly. Physical and mathematical models of precision separation processes for sunflower seed material: monograph. Zaporizhia: STATUS, 2019. 196 p.

12. Stepanenko S.P. Mechanical and technological justification of processes and equipment for screenless fractionation of grain materials: abstract of dissertation ... Doctor of Technical Sciences: 05.05.11, Hlevakha, 2020. 48 p.

13. Sinha J. P., et al. Seed processing for quality upgradation // Seed Processing: Principles and Practices. – Singapore: Springer, 2023. – P. 183–208. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-5888-5_10

14. Rojas-Yana D., et al. Machine vision system for sorting lentils using deep learning // Computers and Electronics in Agriculture. – 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.108693>

Отримано: 10.04.2026. Прийнято: 21.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.