

**MODELING OF GRAIN AND SEED SHAPE TO SUBSTANTIATE OF SEED
CLEANER SIEVE PARAMETERS****I. Dudarev*, S. Prybysh***Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine*

AGRICULTURAL MACHINES

**ABSTRACT**

Seed cleaning is the mandatory technological operation of post-harvest processing of agricultural crops. During seed cleaning, trash, seed impurities and other components of the seed mass are separated from the grain/seeds of the main crop. The effective course of seed cleaning depends on the technological parameters of the seed mass and the parameters and mode of operation of the cleaner. Indicators characterizing the efficiency of the seed cleaner are productivity, indicator of seed separation, indicator of seed loss and indicator of seed damage. The technical indicators of the seed cleaner include the specific metal capacity and energy intensity of the seed cleaning process, as well as the degree of sieve surface utilization. The technological indicators of the seed mass are the moisture content and the ratio of mass components. The sieve is the working surface of the seed cleaner, which is characterized, among other things, by the shape and size of the holes and their position. In turn, the choice of the shape and size of the sieve holes depends on the shape and size of the components of the grain mass. It is important to determine the shape and size of the grains/seeds in order to justify the sieve parameters. This paper analyses known methods for the quantitative determination of grain/seed shape. The studies were carried out using a digital microscope and computer software for plotting and area determination of projection images and patterns of grains/seeds. The resulting mathematical models, which include the parametric equations of the ellipse and the modified super formula, describe the shape of the projections of linseed, wheat and maize, buckwheat and soya bean seeds. These mathematical models can be used in the design of sieve work surfaces of seed cleaner. A scheme and equation are also proposed for the determination of a complex indicator, which makes it possible to evaluate the design of any seed cleaner in comparison with other seed cleaners. A comprehensive indicator can be used to evaluate the design of any machines and equipment, as it takes into account all the parameters that affect the efficiency of their operation, and compare them with the best values of these parameters.

Key words:

seed cleaning process,
seed shape,
seed model,
shape of sieve hole,
sieve cleaner

Article history:

Received 17.05.2023

Accepted 23.06.2023

***Corresponding author:**

i_dudarev@ukr.net

DOI: 10.36910/acm.vi49.1066**To cite this article:**

Dudarev, I., & Prybysh, S. (2023). Modeling of grain and seed shape to substantiate of seed cleaner sieve parameters. *Agricultural Machines*, 49, 124-133. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1066>

УДК 621.928:001.891.573

МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМИ ЗЕРНА ТА НАСІННЯ ДЛЯ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕШЕТА СЕПАРАТОРА**І.М. Дударев*, С.Ю. Прибиш***Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна***АНОТАЦІЯ**

Обов'язковою технологічною операцією післязбирального оброблення сільськогосподарських культур є сепарування. Під час сепарування відбувається відокремлення від зерна/насіння основної культури сміттєвих та зернових домішок, а також інших складових зернової маси. Ефективний перебіг сепарування залежить від технологічних показників зернової маси та параметрів і режиму роботи сепаратора. Робочою поверхнею решітного сепаратора зернової маси є решето, яке, з-поміж інших параметрів, характеризується формою та розмірами отворів, а також їх розташуванням. Своєю чергою, вибір форми та розмірів отворів решета залежить від форми та розмірів складових зернової маси. Отже, важливим для обґрунтування параметрів решета є визначення форми та розмірів зернівок/насінин. У статті проаналізовані відомі методи кількісного визначення форми зернівок/насінин. Дослідження проводилися із використанням цифрового мікроскопа та комп'ютерного програмного забезпечення для побудови графіків, а також визначення площі зображень проєкцій зернівок/насінин та їх моделей. Отримані математичні моделі, що містять записані в параметричній формі рівняння еліпса та модифікованої суперформули, дозволяють описати форму проєкцій насіння льону-довгунця, зернівок пшениці та кукурудзи, плодів гречки та сої. Ці математичні моделі можуть бути використані під час проєктування решітчастих робочих поверхонь сепараторів зернової маси. Також запропоновані схема та вираз для визначення комплексного показника, який дозволяє оцінити конструкцію будь-якого решітного сепаратора порівняно з іншими сепараторами. Комплексний показник можна використовувати для оцінювання конструкцій будь-яких машин та обладнання, оскільки він дозволяє урахувати всі параметри, які впливають на ефективність їх функціонування, та порівняти їх з найкращими (базовими) значеннями цих параметрів.

Ключові слова:

сепарування зерна,
форма зерна,
модель зерна,
форма отворів решета,
решітний сепаратор

Історія публікації:

Отримано 17.05.2023

Затверджено 23.06.2023

***Автор для листування:**

i_dudarev@ukr.net

DOI: 10.36910/acm.vi49.1066

Цитувати цю статтю:

Дударев, І. М., & Прибиш, С. Ю. (2023). Моделювання форми зерна та насіння для обґрунтування параметрів решета сепаратора. *Сільськогосподарські машини*, 49, 124-133. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1066>

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

При оцінюванні конструкції сепаратора зернової маси, що має решітчасті робочі поверхні, необхідно урахувати технологічні показники зернової маси, за яких є можливим ефективне сепарування, технічні показники сепаратора та показники, що характеризують ефективність його роботи. Роботу сепаратора характеризують продуктивність P_{11} , ступінь відокремлення домішок (зернових, сміттєвих) P_{12} , ступінь втрат зерна основної культури P_{13} та ступінь пошкодження зерна P_{14} . Поміж технічних показників сепаратора є питома металомісткість P_{21} і енергоємність P_{22} процесу сепарування, а також ступінь використання поверхні решета P_{23} .

Технологічними показниками зернової маси, яка надходить на сепарування, є вологість P_{31} та співвідношення складових маси (засміченість) P_{32} . Важливими також для вибору решіт сепаратора та режиму його роботи є фізико-механічні властивості, розмір та форма складових зернової маси (Фоминих & Чумаков, 2010). Плоске решето зернового сепаратора характеризують конструкція, форма, просторове розташування, спосіб руху, а також форма, розмір та розташування отворів (Ольховський & Дударев, 2021). Оцінити конструкцію решітного сепаратора

зернової маси можна за комплексним показником, який обчислюється відповідно до схеми на **рис. 1**:

$$Q = m_1 \left(\frac{m_{11}P_{11}}{P_{\delta 11}} + \frac{m_{12}P_{12}}{P_{\delta 12}} + \frac{m_{13}P_{13}}{P_{13}} + \frac{m_{14}P_{14}}{P_{14}} \right) + m_2 \left(\frac{m_{21}P_{\delta 21}}{P_{21}} + \frac{m_{22}P_{22}}{P_{22}} + \frac{m_{23}P_{23}}{P_{\delta 23}} \right) + m_3 \left(\frac{m_{31}P_{31}}{P_{31}} + \frac{m_{32}P_{32}}{P_{32}} \right), \quad (1)$$

де Q – комплексний показник для оцінювання конструкції решітного сепаратора; m_i, m_{ij} – коефіцієнти вагомості показників; P_{ij} – фактичні значення показників; $P_{\delta ij}$ – базові значення показників (рекомендовані значення або ж значення цих показників найкращих конструкцій решітних сепараторів).

У виразі (1) містяться базові значення показників: продуктивність $P_{\delta 11}$; ступінь відокремлення домішок (зернових, сміттєвих) $P_{\delta 12}$; ступінь втрат зерна основної культури $P_{\delta 13}$; ступінь пошкодження зерна $P_{\delta 14}$; питома металомісткість сепарування $P_{\delta 21}$; питома енергоємність сепарування P_{22} ; ступінь використання поверхні решета $P_{\delta 23}$; вологість зернової маси P_{31} ; співвідношення складових зернової маси (засміченість) P_{32} .

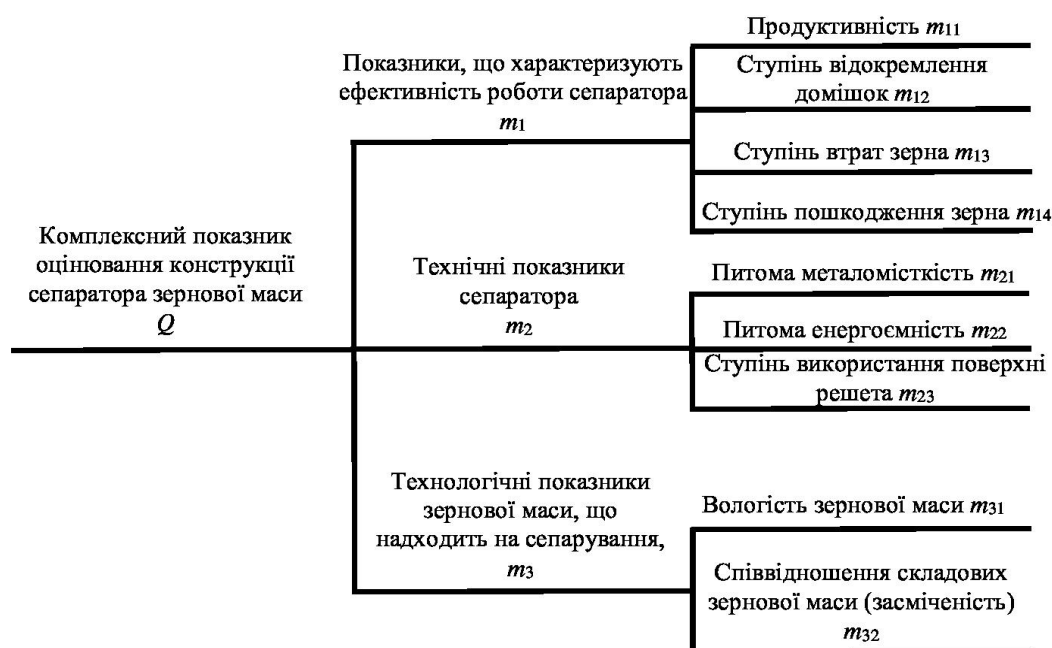


Рис. 1 – Схема до визначення комплексного показника Q оцінювання конструкції решітного сепаратора

У виразі (1) біля кожного із показників міститься коефіцієнт його вагомості (m_i, m_{ij}). Коефіцієнти вагомості показників визначають шляхом опитування експертів (Дударев, 2022):

$$\left. \begin{aligned} m_1 + m_2 + m_3 &= 1; \\ m_{11} + m_{12} + m_{13} + m_{14} &= 1; \\ m_{21} + m_{22} + m_{23} &= 1; \\ m_{31} + m_{32} &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Якщо збільшення фактичного значення показника P_{ij} позитивно впливає на оцінку конструкції сепаратора, то цей показник записується в чисельнику, а відповідне базове значення показника $P_{\delta ij}$ – в знаменнику. І, навпаки, якщо збільшення фактичного значення показника P_{ij} негативно впливає на оцінку конструкції сепаратора, то цей показник записується в знаменнику, а відповідне базове значення показник $P_{\delta ij}$ – в чисельнику.

Що більше значення комплексного показника Q порівняно зі значеннями цього показника для конструкцій-аналогів, то вище оцінено конструкцію сепаратора.

У виразі (1) вплив конструктивних особливостей решета та режиму його роботи на оцінку сепаратора ураховано через показники P_{11}, P_{12}, P_{13} та P_{14} . Однак, необхідно зауважити, що вибір форми та розмірів отворів решета для забезпечення ефективного перебігу сепарування залежить від урахування форми і розмірів складових зернової маси, яку необхідно розділити на решеті. Якщо розміри насінини (довжину, ширину і товщину) можна визначити шляхом прямого вимірювання, то кількісне визначення форми насінини чи зернівки ускладнене.

Відомі різні методи кількісного визначення форми зернівок/насінин різних сільськогосподарських культур. Найпростіший метод – це виміряти довжину й ширину зернівки/насінини та за їх співвідношенням обчислити індекс ексцентриситету, що характеризує форму зернівки чи насінини (Cervantes et al., 2016):

$$I_{екс.} = \frac{l}{s}, \quad (3)$$

де $I_{екс.}$ – індекс ексцентриситету; l – довжина

зернівки/насінини, мм; s – ширина зернівки/насінини, мм.

Форму зернівки/насінини характеризують індексом площинності (Cervantes et al., 2016):

$$I_{пл.} = \frac{(l+s)}{2h}, \quad (4)$$

де $I_{пл.}$ – індекс площинності (форми); l – довжина зернівки/насінини, мм; s – ширина зернівки/насінини, мм; h – товщина зернівки/насінини, мм.

Ще одним показником, що характеризує форму зернівки або насінини, є форм-фактор (Cervantes et al., 2012):

$$I_{ф.ф.} = \frac{4\pi S}{P^2}, \quad (5)$$

де $I_{ф.ф.}$ – форм-фактор; S – площа поверхні зернівки/насінини, мм²; P – периметр зернівки/насінини, мм.

Індекс округлості зернівки або насінини (Juan et al., 2022):

$$I_{ок.} = \frac{4S}{\pi l^2}, \quad (6)$$

де $I_{ок.}$ – індекс округлості; S – площа поверхні зернівки/насінини, мм²; l – більша вісь зернівки/насінини (довжина), мм.

Довжина, ширина, площа та периметр зернівки чи насінини не в усіх випадках дозволяють з необхідною точністю описати їх форму, оскільки зернівки/насінини різних культур, що мають дуже схожі розміри за всіма цими параметрами, можуть суттєво відрізнятися за формою (Cervantes et al., 2019). Відповідно, індекси, які обчислені за цими характеристиками, не дозволяють описати форму зернівки/насінини.

Для опису форми зернівки/насінини використовується аналіз їх цифрових зображень (DIA – Digital Image Analysis) (Williams et al., 2012). Зернівки та насінини багатьох видів рослин нагадують геометричні фігури. Відповідно, плоске зображення зерна/насіння можна описати через подібність до плоских геометричних фігур. Отже, цей метод також може бути використано для кількісного визначення форми зернівки або насінини.

Форму зернівки/насінини порівнюють з геометричними моделями кардіоїди, еліпса, овалу, спіралі Фібоначчі, лінзи тощо (Cervantes & Martín Gómez, 2019). Для опису форми симетричних зернівок чи насінин використовується два типи моделей (Martín-Gómez et al., 2021): супереліпс та комбінація двох напівеліпсів. Супереліпс описується рівнянням:

$$\left|\frac{x}{a}\right|^p + \left|\frac{y}{b}\right|^p = 1, \quad (7)$$

де a , b – півосі супереліпса; p – показник степеня ($p > 0$); x , y – координати точок кривої.

Друга група моделей отримана за допомогою рівняння еліпса з півосями 1 та $1/b$, де $b > 0$ (Martín-Gómez et al., 2021):

$$\left(\sqrt{1-x^2} - by\right)\left(\sqrt{1-x^2} + by\right) = 0. \quad (8)$$

Опис форми зернівки/насінини у вигляді краплі води отримують шляхом модифікації рівняння (8) (Cervantes et al., 2021):

$$\left(\sqrt{1-x^2} + by\right) \times \left(\sqrt{1-x^2} + \frac{a}{50x^2 + c} - by\right) = 0, \quad (9)$$

де $a = b = 1$, $c = 2$.

Одночасні модифікації в обох членах рівняння (8) дозволяють описати форму у вигляді серця (Cervantes et al., 2021):

$$\left(\sqrt{1-x^2} - \frac{a}{54x^2 + 9|x| + 3} + y\right) \times \left(\sqrt{1-x^2} + \frac{b}{54x^2 + 9|x| + 3} - y\right) = 0, \quad (10)$$

де $a = 1/2$; $b = 1/3$ (збільшення a – зменшує розмір нижньої частини фігури; збільшення b – зменшує наддзьобок фігури).

Альтернативою канонічним геометричним фігурам, які використовуються як моделі для кількісного визначення форми зернівки чи насінини, можуть бути безперервні замкнуті

криві, що описані рівняннями Фур'є (Cervantes et al., 2022).

Для кількісного оцінювання форми зернівки чи насінини використовується також метод порівняння двомірного зображення зернівки чи насінини з геометричною фігурою, за результатами якого обчислюється індекс J (Gutiérrez del Pozo et al., 2020):

$$J = \frac{S}{T} \cdot 100, \quad (11)$$

де S – площа плоскої фігури, що накладається на зображення зернівки чи насінини, мм^2 ; T – площа зображення зернівки чи насінини, мм^2 .

Індекс J вказує на відсоток подібності між плоским зображенням зернівки/насінини і його геометричною моделлю. Відповідно, цей індекс може змінюватися в межах 1–100 та є мірою форми, а не розміру.

У науковій роботі (Martín-Gómez et al., 2020) пропонується вираз (11) записати у вигляді (рис. 2):

$$J = \frac{C}{C+D} \cdot 100, \quad (12)$$

де C – площа області, що спільна для моделі та зображення зернівки/насінини, мм^2 ; D – площа області, яка не є спільною для моделі та зображення зернівки/насінини, мм^2 .

Необхідно зауважити, що форму плоскої геометричної фігури можна вважати подібною до плоского зображення зернівки чи насінини, якщо $J > 90$.

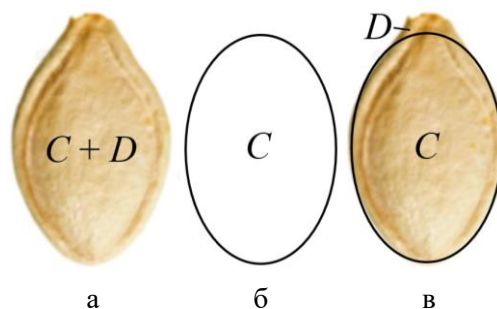


Рис. 2 – Схеми до визначення індексу J :
а – плоске зображення насінини гарбуза;
б – модель насінини гарбуза (овал);
в – накладання моделі на зображення насінини гарбуза

Актуальними є подальші дослідження, що дозволять отримати математичні моделі, які описують проєкції зернівки або насінини сільськогосподарських культур, що можуть бути використані під час обґрунтування розмірів та форми отворів решіт сепараторів зернової маси.

Мета дослідження – моделювання форми зерна та насіння для обґрунтування параметрів решета сепаратора зернової маси.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Двомірні зображення насінини льону-довгунця, зернівок кукурудзи та пшениці, плодів гречки і сої отримали із використанням цифрового мікроскопу Bresser Biolux LCD 5MP (рис. 3).



Рис. 3 – Цифровий мікроскоп Bresser Biolux LCD 5MP

Моделювання форми проєкцій зернівок або насінин сільськогосподарських культур проходило із використанням математичних методів. Побудову плоских кривих, що описують форму проєкцій зернівок/насінин, за отриманими математичними моделями здійснювали у системі комп'ютерної алгебри Mathcad 14. Для оброблення плоских кривих, що побудовані в Mathcad 14, використовували комп'ютерну програму AutoCAD 2007. Створені моделі (плоскі криві) форми дорсальної, латеральної та/або вентральної

проєкцій зернівок/насінин порівнювалися із насінням льону-довгунця, зернівками пшениці та кукурудзи, плодами гречки та сої. Для кількісного оцінювання подібності форми моделі до двомірного зображення зернівки чи насінини обчислювали індекс J за виразом (11). Якщо $J > 90$, то вважалось, що модель подібна за формою до проєкції зернівки/насінини. Площа T двомірних зображень зернівки чи насінини та площа S плоских фігур, що обмежені кривими, які одержані за рівняннями моделей, визначалися шляхом аналізування зображень у форматі PNG у комп'ютерній програмі для оброблення зображень ImageJ (рис. 4).

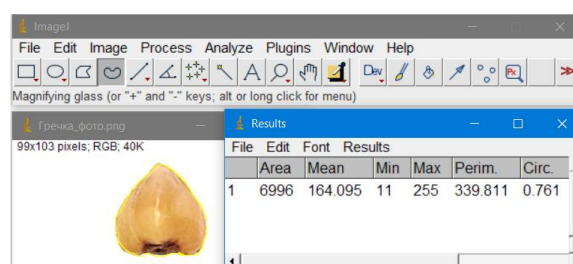


Рис. 4 – Робоче вікно комп'ютерної програми ImageJ

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Зернівки і насінини більшості культур в дорсальній, латеральній та вентральній проєкціях мають різну форму й розміри. Для опису форми насіння льону-довгунця, гречки та кукурудзи використано суперформулу плоскої кривої супереліпса Й. Джиліса:

$$r(\varphi) = \left[\frac{\left| \cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right) \right|^{n_2}}{a} + \frac{\left| \sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right) \right|^{n_3}}{b} \right]^{\frac{-1}{n_1}}, \quad (13)$$

де r – радіус у полярній системі координат; φ – кут у полярній системі координат; m – параметр, що характеризує число фрагментів, які повторюються; n_1, n_2, n_3 – параметри, що визначають форму; a, b – габарити (величина півосей).

Форму дорсальної проєкції насіння льону-довгунця (рис. 5) можна описати поданою в параметричній формі суперформулою (13):

$$x(\varphi) = \left[\left(\left| \frac{\cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{a} \right| + 3 \right)^{n_2} + \left(\left| \frac{\sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{b} \right| + 3 \right)^{n_3} \right]^{\frac{-1}{n_1}} \sin \varphi,$$

$$y(\varphi) = \left[\left| \frac{\cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{a} \right| + \left| \frac{\sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{b} \right| \right]^{\frac{-1}{n_1}} \cos \varphi, \quad (14)$$

де $m = 3; n_1 = 35; n_2 = 17; n_3 = 17; a = 1; b = 1$.

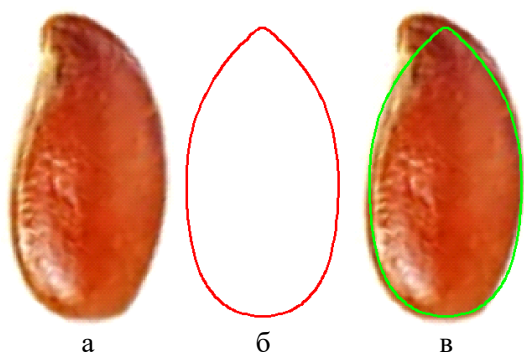


Рис. 5 – Схеми до визначення індексу J для насінини льону-довгунця:

а – плоске зображення насінини льону-довгунця; б – модель насінини; в – накладання моделі на зображення насінини

Форму дорсальної проєкції зернівки кукурудзи (**рис. 6**) можна описати поданою в параметричній формі модифікованою суперформулою (13):

$$x(\varphi) = \left[\left(\left| \frac{\cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{a} \right| + 0,7 \right)^{n_2} + \left(\left| \frac{\sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{b} \right| + 0,7 \right)^{n_3} \right]^{\frac{-1}{n_1}} \sin \varphi,$$

$$y(\varphi) = \left[\left| \frac{\cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{a} \right| + \left| \frac{\sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{b} \right| \right]^{\frac{-1}{n_1}} \cos \varphi, \quad (15)$$

де x, y – координати кривої вздовж осей x та y ; $m = 3; n_1 = 31; n_2 = 20; n_3 = 20; a = 1; b = 1$.

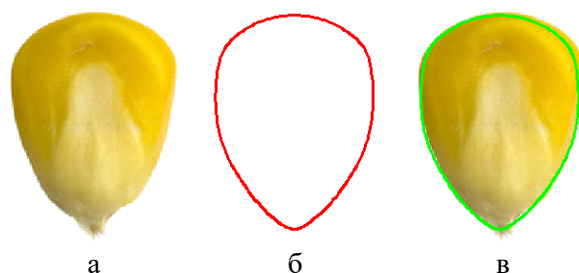


Рис. 6 – Схеми до визначення індексу J для зернівки кукурудзи:

а – плоске зображення зернівки кукурудзи; б – модель зернівки; в – накладання моделі на зображення зернівки

Форму дорсальної проєкції плода гречки (тригранного горішка) (**рис. 7**) можна описати модифікованою суперформулою, що подана в параметричній формі (13):

$$x(\varphi) = \left\{ \left[\left(\left| \frac{\cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{a} \right| + 1,4 \right)^{n_2} + \left(\left| \frac{\sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{b} \right| + 1,4 \right)^{n_3} \right]^{\frac{-1}{n_1}} + 1,2 \right\} \sin \varphi,$$

$$y(\varphi) = \left[\left| \frac{\cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{a} \right| + \left| \frac{\sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{b} \right| \right]^{\frac{-1}{n_1}} \cos \varphi, \quad (16)$$

де $m = 3; n_1 = 4,6; n_2 = 10; n_3 = 10; a = 1; b = 1$.

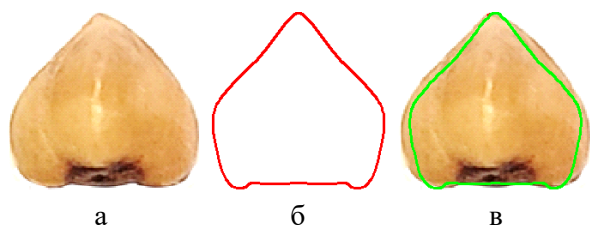


Рис. 7 – Схеми до визначення індексу J для плода гречки:
 а – плоске зображення плода гречки;
 б – модель плода; в – накладання моделі на зображення плода

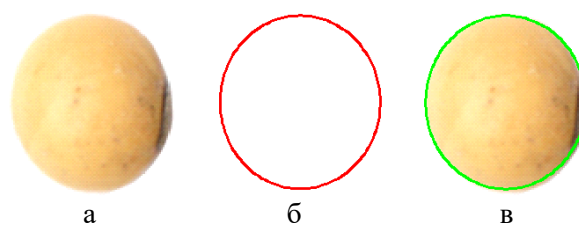


Рис. 8 – Схеми до визначення індексу J для плода сої:
 а – плоске зображення плода сої;
 б – модель плода; в – накладання моделі на зображення плода

Вирази (14)–(16) дозволяють змоделювати лише форму зернівки/насінини без урахування її розмірів, тому для приведення моделі до розмірів насінини необхідно використовувати коефіцієнти масштабування, однакові для осей x та y .

Для опису форми латеральної проекції плода (боба) сої (рис. 8) використано рівняння еліпса в параметричній формі:

$$\left. \begin{aligned} x(\varphi) &= a \cos(\varphi); \\ y(\varphi) &= b \sin(\varphi); \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

де a, b – осі еліпса (ширина та довжина плода).

Для опису форми дорсальної/вентральної проекцій зернівки пшениці (рис. 9) можна також використати рівняння еліпса в параметричній формі (17).

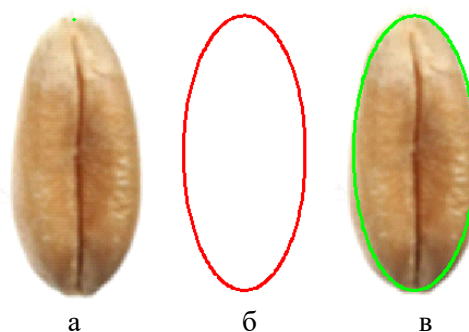


Рис. 9 – Схеми до визначення індексу J для зернівки пшениці:
 а – плоске зображення зернівки пшениці;
 б – модель зернівки; в – накладання моделі на зображення зернівки

Моделі зернівок та насінин, що зображені на рис. 5–9, побудовані із використанням програми Mathcad 14 (рис. 10).

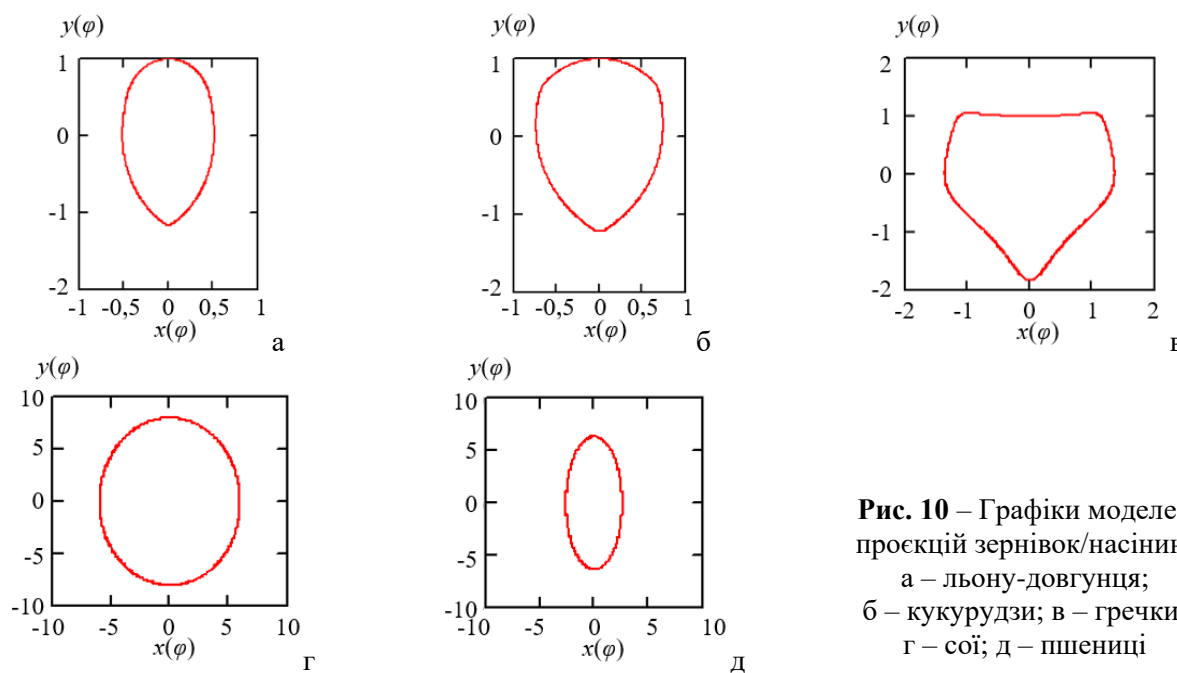


Рис. 10 – Графіки моделей проєкцій зернівок/насінин:
 а – льону-довгунця;
 б – кукурудзи; в – гречки;
 г – сої; д – пшениці

Результати обчислення індексу J за виразом (11) для моделей насінини льону-довгунця, зернівок кукурудзи та пшениці, плодів гречки та сої подані в **таблиці**. Оскільки значення індексу $J > 90\%$ для моделей зернівок та насінин досліджених культур, то запропоновані моделі проєкцій можна вважати подібними до двомірних зображень зернівок та насінин цих культур.

Таблиця – Результати обчислення індексу J для моделей зернівок та насінин

Зернівка чи насінини сільськогосподарських культур	Значення індексу J , %
1	2
Льон-довгунець	93,0
Пшениця	95,3
Гречка	90,1
Кукурудза	96,3
Соя	99,4

ВИСНОВКИ

Ефективне сепарування насіння та зерна сільськогосподарських культур на решітних сепараторах можливе у випадку правильного вибору решіт та режимів сепарування із урахуванням властивостей зернової маси, що надходить на сепарування, та її складових. Поміж характеристик складових зернової маси важливою є форма зернівок та насінин, з урахуванням якої вибираються решета з необхідною формою та розміром отворів. Отже, важливо математично описати форму зернівок/насінин, що дозволить обґрунтувати раціональну форму та розміри отворів решіт сепаратора і, відповідно, зробити процес сепарування більш ефективним. Отримані математичні моделі, що містять записані в параметричній формі рівняння еліпса та модифікованої суперформули, дозволяють описати форму проєкцій насіння льону-довгунця, зернівок пшениці та кукурудзи, плодів гречки та сої. Ці математичні моделі можуть бути використані під час проєктування решітчастих робочих поверхонь сепараторів зернової маси.

Також запропоновані схема та вираз для визначення комплексного показника, який дозволяє оцінити конструкцію будь-якого

решітного сепаратора порівняно з іншими сепараторами. Комплексний показник можна використовувати для оцінювання конструкцій будь-яких машин та обладнання, оскільки він дозволяє урахувати всі параметри, які впливають на ефективність їх функціонування, та порівняти їх з найкращими (базовими) значеннями цих параметрів.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Cervantes, E., Martín, J. J., Chan, P. K., Gresshoff, P. M., & Tocino, Á. (2012). Seed shape in model legumes: Approximation by a cardioid reveals differences in ethylene insensitive mutants of *Lotus japonicus* and *Medicago truncatula*. *Journal of Plant Physiology*, 169(14), 1359-1365. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2012.05.019>
- Cervantes, E., Martín, J. J., & Saadaoui, E. (2016). Updated methods for seed shape analysis. *Scientifica*, 2016, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2016/5691825>
- Cervantes, E., & Martín Gómez, J. J. (2019). Seed shape description and quantification by comparison with geometric models. *Horticulturae*, 5, 60. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5030060>
- Cervantes, E., Martín Gómez, J. J., Gutiérrez del Pozo, D., & Silva Dias, L. (2019). An Angiosperm Species dataset reveals relationships between seed size and two-dimensional shape. *Horticulturae*, 5, 71. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5040071>
- Cervantes, E., Martín-Gómez, J. J., Gutiérrez del Pozo, D., & Tocino, Á. (2021). Seed geometry in the Vitaceae. *Plants*, 10, 1695. <https://doi.org/10.3390/plants10081695>
- Cervantes, E., Rodríguez-Lorenzo, J. L., Diego Gutiérrez del Pozo, D., Martín-Gómez, J. J., Janousek, B., Tocino, Á., & Juan, A. (2022). Seed Silhouettes as geometric objects: New applications of Elliptic Fourier Transform to seed morphology. *Horticulturae*, 8, 974. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8100974>
- Gutiérrez del Pozo, D., Martín-Gómez, J. J., Tocino, Á., & Cervantes, E. (2020). Seed geometry in the Arecaceae. *Horticulturae*, 6, 64. <https://doi.org/10.3390/horticulturae6040064>
- Juan, A., Martín-Gómez, J. J., Rodríguez-Lorenzo, J. L., Janoušek, B., & Cervantes, E. (2022). New techniques for seed shape description in silene species. *Taxonomy*, 2, 1-19. <https://doi.org/10.3390/taxonomy2010001>
- Martín-Gómez, J. J., Gutiérrez del Pozo, D., Uchescu, M., Bacchetta, G., Cabello Sáenz de Santamaría, F., Tocino, Á., & Cervantes, E. (2020). Seed morphology in the Vitaceae based on geometric models. *Agronomy*, 10, 739. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050739>

- Martín-Gómez, J. J., del Pozo, D. G., Tocino, Á., & Cervantes, E. (2021). Geometric models for seed shape description and quantification in the cactaceae. *Plants*, 10, 2546. <https://doi.org/10.3390/plants10112546>
- Williams, K., Munkvold, J., & Sorrells, M. (2012). Comparison of digital image analysis using elliptic Fourier descriptors and major dimensions to phenotype seed shape in hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.). *Euphytica*, 190(1), 99-116. <https://doi.org/10.1007/s10681-012-0783-0>
- Дударев, І. М. (2022). Алгоритм оцінювання придатності рослинної сировини для перероблення за певною технологією (*Algorithm for assessing the suitability of plant raw materials for processing according to a certain technology*). *Сільськогосподарські машини*, 48, 100-109. <https://doi.org/10.36910/acm.vi48.888>
- Ольховський, В. О., & Дударев, І. М. (2021). Способи сепарування та сепаратори зернової маси (*Separation methods and separators of grain mass*). *Сільськогосподарські машини*, 47, 102-112. <https://doi.org/10.36910/acm.vi47.655>
- Фоминых, А. В., & Чумаков, В. Г. (2010). Алгоритм расчета процесса сепарации на решетных устройствах (*Algorithm for calculating the separation process on screen devices*). *Аграрный вестник Урала*, 7(73), 77-79.