

## SHAPE MODELING OF FRUITS AND ROOTS

I. Dudarev\*, S. Prybysh

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES

AM  
CM

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

## ABSTRACT

Vegetables, fruits, berries and seeds of agricultural crops have different shapes and sizes. When developing machines and equipment for harvesting and processing agricultural products, it is necessary to take into account these characteristics of fruit and vegetable products in order to ensure high efficiency of technological processes. Scientists use various methods to describe the shape of vegetables, fruits, berries and seeds. In particular, morphometric analysis, reconstruction of contour images obtained from a photo of the whole fruits or its parts, as well as X-ray computed tomography, 3D data processing methods and visualization technologies (triangulation, time of flight (TOF), interferometry, electromagnetic radiation and ultrasound) are used. The aim of the study was to obtain mathematical models of the shapes of fruits and root crops. Creative shapes of tomatoes, carrots and table beets were described by modifying the superformula of the flat curve of the superellipse. To build 3D models of fruits and root crops, the equation of the creative shape written in parametric form was used. Construction of graphs of creative forms of fruit and root crops, as well as their 3D models was carried out in the computer algebra system Mathcad 14. The proposed mathematical models can be used for modeling of technological processes, development of working bodies of machines, equipment and robots for harvesting and processing of agricultural crops, as well as for determination of physical and mechanical parameters of agricultural products (volume, mass, density, etc.). By changing the parameters of the mathematical models of fruit and root crops, it is possible to take into account the peculiarities of the shape of their various varieties. Further research in this direction with the aim of developing mathematical models for describing the shape of seeds, fruits and roots of various agricultural crops is promising.

**Key words:**

vegetables,  
model of vegetables,  
equation of vegetable shape,  
shape of tomato,  
root vegetable shape

**Article history:**

Received 30.05.2024

Accepted 22.06.2024

**\*Corresponding author:**

i\_dudarev@ukr.net

DOI: 10.36910/acm.vi50.1456

**To cite this article:**

Dudarev, I., & Prybysh, S. (2024). Shape modeling of fruits and roots. *Agricultural Machines*, 50, 157-165. <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1456>

УДК 635.64:635.1:004.942

## МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМИ ПЛОДІВ ТА КОРЕНЕПЛОДІВ

І.М. Дударев\*, С.Ю. Прибиш

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

AGRICULTURAL MACHINES



## АНОТАЦІЯ

Овочі, фрукти, ягоди та насіння сільськогосподарських культур мають різноманітну форму та розміри. Під час розроблення машин та обладнання для збирання й перероблення урожаю агропродукції необхідно врахувати ці характеристики плодоовочевої продукції для забезпечення високої ефективності технологічних процесів. Науковці використовують різні методи для опису форми овочів, фруктів, ягід та насіння. Зокрема, використовуються морфометричний аналіз, метод реконструкції зображень контурів, отриманих з фото цілого плода або його шматочків, а також використовуються рентгенівська комп'ютерна томографія, методи оброблення 3D-даних та технології візуалізації (триангуляція, час польоту (TOF), інтерферометрія, електромагнітне випромінювання та ультразвукове зображення). Метою дослідження було отримання математичних моделей форм плодів та коренеплодів. Твірні форм томатів, моркви та столового буряка описували шляхом модифікації суперформули плоскої кривої супереліпса. Для побудови 3D-моделей плодів та коренеплодів використовували рівняння твірної форми, записане у параметричній формі. Побудову графіків твірних форм плодів та коренеплодів, а також їх 3D-моделей проводили у системі комп'ютерної алгебри Mathcad 14. Запропоновані математичні моделі можуть бути використані під час моделювання технологічних процесів, розроблення робочих органів машин, обладнання та роботів для збирання й перероблення урожаю сільськогосподарських культур, а також обчислення фізико-механічних показників агропродукції (об'єму, маси, густини тощо). Змінюючи параметри математичних моделей плодів та коренеплодів, можна врахувати особливості форми різних їх сортів. Перспективними є подальші дослідження у цьому напрямі з метою розроблення математичних моделей для опису форми насіння, плодів та коренеплодів різних сільськогосподарських культур.

**Ключові слова:**

овочі,  
модель овочів,  
рівняння форми овочів,  
форма томату,  
форма коренеплодів

**Історія публікації:**

Отримано 30.05.2024

Затверджено 22.06.2024

**\*Автор для листування:**

i\_dudarev@ukr.net

DOI: 10.36910/acm.vi50.1456

**Цитувати цю статтю:**

Дударев, І. М., & Прибиш, С. Ю. (2024). Моделювання форми плодів та коренеплодів. *Сільськогосподарські машини*, 50, 157-165. <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1456>

## СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Геометричні параметри та основні фізичні властивості сільськогосподарської продукції (зерна, фруктів, овочів, ягід) широко використовують для розроблення збиральних пристроїв, зокрема роботизованих (Bu et al., 2020), обладнання для сепарування та калібрування, пакування та транспортування (Ziaratban et al., 2016). Будова плодів, їх розміри, форма та внутрішня структура можуть бути надзвичайно різноманітними (Cieslak et al., 2016; Дударев & Панасюк, 2020). Традиційний підхід до моделювання форми насіння, фруктів, овочів та ягід базується на припущенні, що агропродукція є однорідною та ізотропною, а моделі об'єктів створюють з використанням геометричних фігур, зокрема, еліпсоїда, циліндра, півсфери, зрізаного конуса або ж їх комбінацій (Anders et al., 2019). Науковці також використовують морфометричний аналіз насіння, плодів та коренеплодів для отримання контурних морфометричних даних, тобто числових характеристик їх форми, наприклад, зі сканованих поздовжніх розрізів насіння чи плодів, які надалі використовують для математичного моделювання їх форми (Visa et al., 2014). Для опису форми симетричних насінин використовують два типи моделей (Martín-Gómez et al., 2021): супереліпс; комбінацію двох напівеліпсів. У науковій праці (Дударев & Прибуш, 2023) для опису форми насіння льону-довгунця, гречки та кукурудзи використано суперформулу плоскої кривої супереліпса Й. Джиліса.

Також для розроблення 3D-моделей форми плодів використовують інші методи, більшість з яких базується на рівняннях: сферичних (Saudreau et al., 2007); еліпсоїдних (Ling et al., 2007); кривих Безьє (Mieszkalski & Wojdalski, 2017). Для моделювання також використовують реконструкцію зображень контурів, отриманих з фото цілого плода або його шматочків (Cieslak et al., 2016). Більш точні (несиметричні) зображення форми овочів та фруктів можна отримати з використанням рентгенівської комп'ютерної томографії (Rogge et al., 2015). У науковій праці (Morimoto et al., 2000) запропонована методика кількісного оцінювання форми плоду з використанням атрактора, фрактальної розмірності та нейронних мереж. Тривимірні

моделі різних фруктів та овочів можна отримати моделюванням хмари точок (рис. 1) з різних систем координат (Wang & Chen, 2020).



Рис. 1 – Моделювання перцю з використанням хмари точок (Wang & Chen, 2020)

Для побудови моделей овочів та фруктів використовують також методи оброблення 3D-даних та технології візуалізації, зокрема, такі як триангуляція, інтерферометрія, час польоту (TOF), електромагнітне випромінювання та ультразвукове зображення (Wang et al., 2024). У науковій праці (Danckaers et al., 2015) запропоновано метод побудови статистичної моделі форми яблука, що можна використати для інших фруктів, ягід та овочів. 3D-моделі плодів можна створити за допомогою генератора геометричних моделей на основі рентгенівських комп'ютерних томографічних зображень (Gruyters et al., 2018).

У Bohl et al. (2015) представлено метод моделювання складних об'єктів (фруктів, овочів) за допомогою простих об'єктів, які взаємодіють один з одним (рис. 2). Цей метод засновано на класичних L-системах (системи Лінденмаєра) та тривимірних узагальнених картах (3Gmaps).

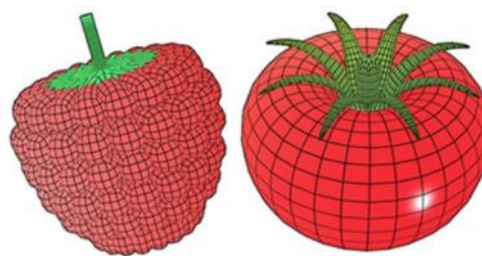


Рис. 2 – Моделювання плодів з використанням методу L-системи та 3Gmaps (Bohl et al., 2015)

Для деяких сільськогосподарських культур немає реалістичних моделей форм, їх малюють вручну або використовують спрощені моделі (наприклад, у випадку використання методу дискретних елементів (DEM) замінюють реальний об'єкт моделлю сферичної форми), при цьому втрачається багато важливих деталей (Kafashan et al., 2006). У науковій праці (Kafashan et al., 2006) запропоновано метод графічного геометричного моделювання фруктів на основі реконструкції їх скибочок (рис. 3).

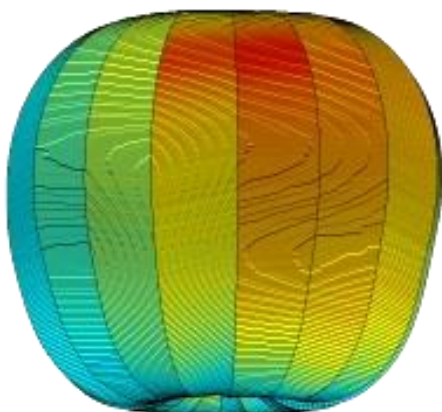


Рис. 3 – Моделювання яблука з 16 скибочок (Kafashan et al., 2006)

Отже, подальші дослідження зі створення математичних моделей, які б дозволили описати форму плодів та коренеплодів сільськогосподарських рослин, є актуальними.

**Мета дослідження** – математичне моделювання форми плодів та коренеплодів.

### МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

У цьому дослідженні використано метод математичного моделювання для опису твірної форми симетричних плодів та коренеплодів. Твірні форми томатів, моркви та столового буряка описували шляхом модифікації суперформули плоскої кривої супереліпса Й. Джиліса:

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

де  $r$  – радіус у полярній системі координат;  $\varphi$  – 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 (півосі).

Для побудови графіків твірних форм плодів та коренеплодів використовували систему комп'ютерної алгебри Mathcad 14. Для цього рівняння, що описує твірну форми у полярній системі координат, записували у параметричній формі:

$$\begin{cases} x(\varphi) = r(\varphi) \cos \varphi; \\ y(\varphi) = r(\varphi) \sin \varphi. \end{cases} \quad (2)$$

Для побудови 3D-моделей плодів або коренеплодів у системі Mathcad 14 рівняння, що описує твірну форми у полярній системі координат, записували у параметричній формі:

$$U(\varphi, \theta) = \begin{cases} x(\varphi, \theta) = r(\varphi) \cos \varphi; \\ y(\varphi, \theta) = r(\varphi) \sin \varphi \cos \theta; \\ z(\varphi, \theta) = r(\varphi) \sin \varphi \sin \theta; \end{cases} \quad (3)$$

де  $U(\varphi, \theta)$  – математична модель плоду або ж коренеплоду, що дозволяє побудувати його 3D-модель (причому, кут  $\varphi$  змінюється в межах  $[0, \pi]$ , а кут  $\theta$  – в межах  $[0, 2\pi]$ );  $\theta$  – кут повороту твірної форми плода чи коренеплоду навколо осі  $x$ .

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Система рівнянь у параметричній формі, що описує твірну томату плоско-овальної форми (рис. 4, а), має вигляд:

$$\begin{aligned} x(\varphi) &= \left[ \left| \frac{\cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{a} \right|^{n_2} + \left| \frac{\sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{b} \right|^{n_3} \right]^{\frac{-1}{n_1}} \cos \varphi; \\ y(\varphi) &= \left[ \left| \frac{\cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{a} \right|^{n_2} + \left| \frac{\sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{b} \right|^{n_3} \right]^{\frac{-1}{n_1}} \sin \varphi; \end{aligned} \quad (4)$$

де  $a = 0,4$ ;  $b = 0,4$ ;  $m = 1$ ;  $n_1 = 0,75$ ;  $n_2 = 0,15$ ;  $n_3 = 4,8$ .

Використовуючи рівняння (4) та згідно з системою рівнянь (3), отримуємо математичну модель форми плоско-овального томату, що зображена **рис. 4, б**:

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

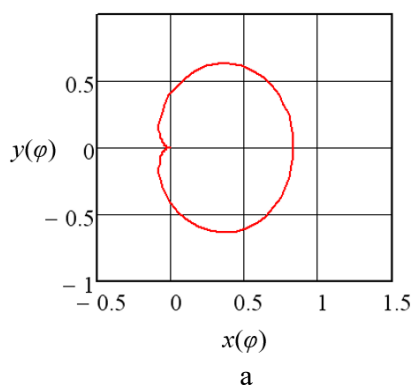
$$y(\varphi, \theta) = \left[ \frac{\cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right)^{n_2}}{a} + \frac{\sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right)^{n_3}}{b} \right]^{\frac{-1}{n_1}} \times \sin\varphi \cos\theta;$$

$$z(\varphi, \theta) = \left[ \frac{\cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right)^{n_2}}{a} + \frac{\sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right)^{n_3}}{b} \right]^{\frac{-1}{n_1}} \times \sin\varphi \sin\theta;$$

де  $a = 0,4$ ;  $b = 0,4$ ;  $m = 1$ ;  $n_1 = 0,75$ ;  $n_2 = 0,15$ ;  $n_3 = 4,8$ .

Для томату видовжено-овальної форми твірні описується рівняннями (**рис. 5, а**):

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



$$y(\varphi) = \left[ \frac{\cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right)^{n_2}}{a} + \frac{\sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right)^{n_3}}{b} + c \right]^{\frac{-1}{n_1}} \sin\varphi; \quad (6)$$

де  $a = 10$ ;  $b = 0,35$ ;  $m = 1$ ;  $n_1 = 0,75$ ;  $n_2 = 0,15$ ;  $n_3 = 4,8$ ;  $c = 0,6$ .

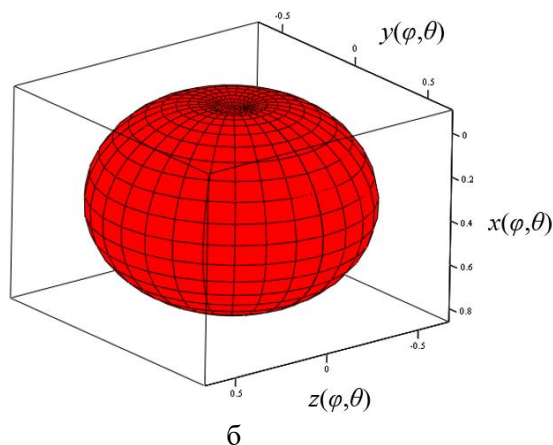
Математична модель форми видовжено-овального томату (**рис. 5, б**):

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

$$y(\varphi, \theta) = \left[ \frac{\cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right)^{n_2}}{a} + \frac{\sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right)^{n_3}}{b} + c \right]^{\frac{-1}{n_1}} \times \sin\varphi \cos\theta;$$

$$z(\varphi, \theta) = \left[ \frac{\cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right)^{n_2}}{a} + \frac{\sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right)^{n_3}}{b} + c \right]^{\frac{-1}{n_1}} \times \sin\varphi \sin\theta; \quad (7)$$

де  $a = 10$ ;  $b = 0,35$ ;  $m = 1$ ;  $n_1 = 0,75$ ;  $n_2 = 0,15$ ;  $n_3 = 4,8$ ;  $c = 0,6$ .



**Рис. 4** – Графік твірної томата плоско-овальної форми (а) та його модель (б)

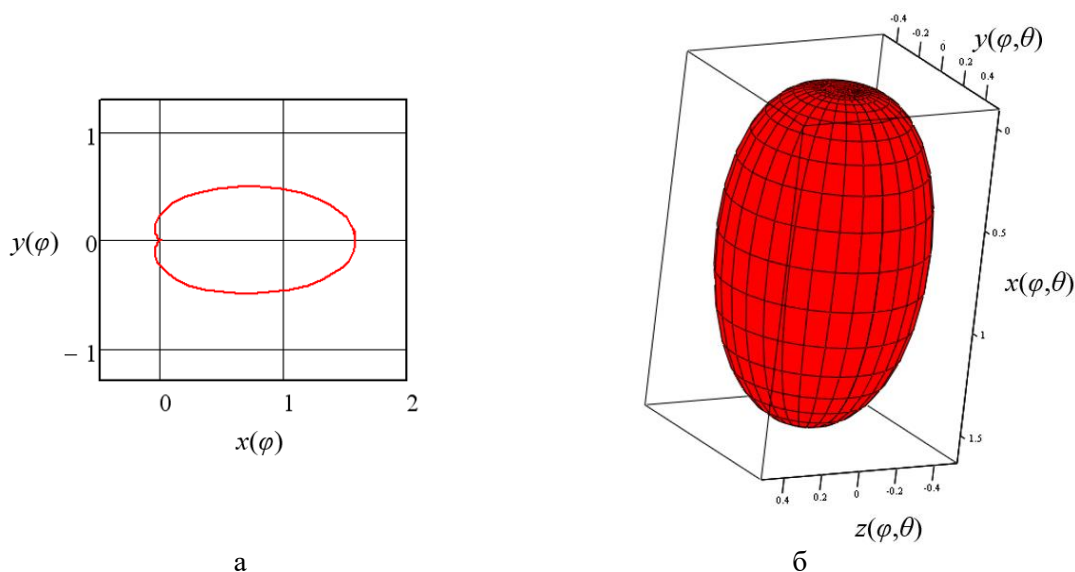


Рис. 5 – Графік твірної томата видовжено-овальної форми (а) та його модель (б)

Твірна моркви видовжено-овальної форми (рис. 6, а) описується рівняннями (6) за значень параметрів:  $a = 10$ ;  $b = 0,2$ ;  $m = 1$ ;  $n_1 = 0,75$ ;  $n_2 = 0,15$ ;  $n_3 = 4,8$ ;  $c = 0,4$ .

Математична модель форми видовжено-овальної моркви містить рівняння (7) за значень параметрів:  $a = 10$ ;  $b = 0,2$ ;  $m = 1$ ;  $n_1 = 0,75$ ;  $n_2 = 0,15$ ;  $n_3 = 4,8$ ;  $c = 0,4$ . 3D-модель моркви видовжено-овальної форми, яка побудована за запропонованою математичною моделлю, зображена на рис. 6, б.

Твірна моркви конічноподібної форми (рис. 7, а) описується також рівняннями (6), але за значень параметрів:  $a = 10$ ;  $b = 0,11$ ;  $m = 1$ ;  $n_1 = 0,55$ ;  $n_2 = 0,15$ ;  $n_3 = 4,8$ ;  $c = 0,05$ . Форма конічноподібної моркви описується рівняннями (7) за значень параметрів:  $a = 10$ ;  $b = 0,11$ ;  $m = 1$ ;  $n_1 = 0,55$ ;  $n_2 = 0,15$ ;  $n_3 = 4,8$ ;  $c = 0,05$ . 3D-модель моркви конічноподібної форми зображена на рис. 7, б.

Для описання твірної моркви плоско-конічної форми (рис. 8, а) використані рівняння (6) з параметрами:  $a = 10$ ;  $b = 0,15$ ;  $m = 1$ ;  $n_1 = 3,5$ ;  $n_2 = 0,15$ ;  $n_3 = 10$ ;  $c = 0,4$ . Рівняння (7) є математичною моделлю форми плоско-конічної моркви у випадку значень параметрів:  $a = 10$ ;  $b = 0,15$ ;  $m = 1$ ;  $n_1 = 3,5$ ;  $n_2 = 0,15$ ;  $n_3 = 10$ ;  $c = 0,4$ . 3D-модель моркви плоско-конічної форми зображена на рис. 8, б.

Твірна буряка столового плоско-конічної форми (рис. 9, а) описується рівняннями:

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

$$y(\varphi) = \left[ \frac{\left| \cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right) \right|^{n_2}}{a} + \frac{\left| \sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right) \right|^{n_3}}{b} \right]^{\frac{-1}{n_1}} \sin \varphi; \quad (8)$$

де  $a = 8$ ;  $b = 0,3$ ;  $m = 1$ ;  $n_1 = 0,7$ ;  $n_2 = 0,2$ ;  $n_3 = 5$ ;  $d = 0,01$ .

Математична модель форми плоско-конічного столового буряка (рис. 9, б):

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

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

$$\times \sin \varphi \cos \theta;$$



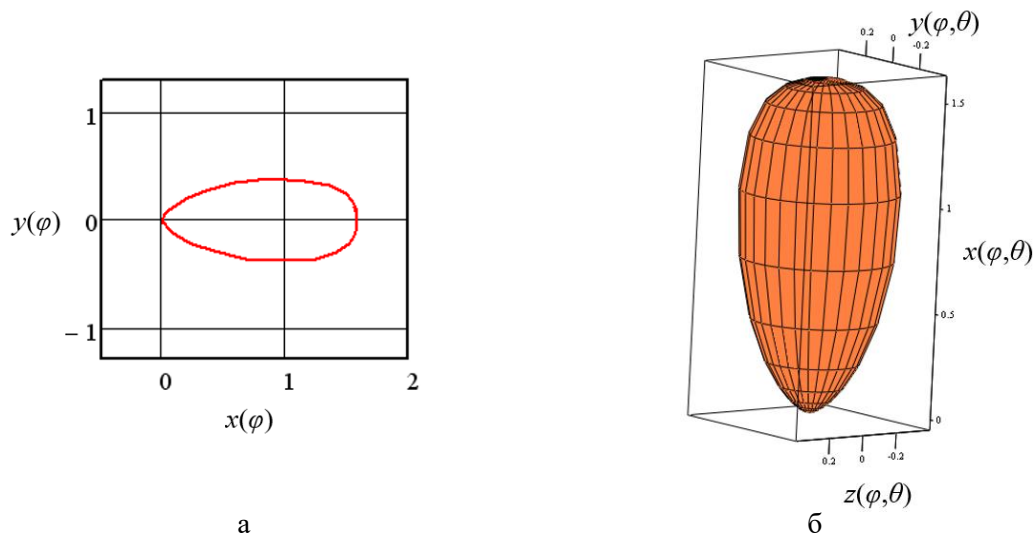


Рис. 6 – Графік твірної моркви видовжено-овальної форми (а) та її модель (б)

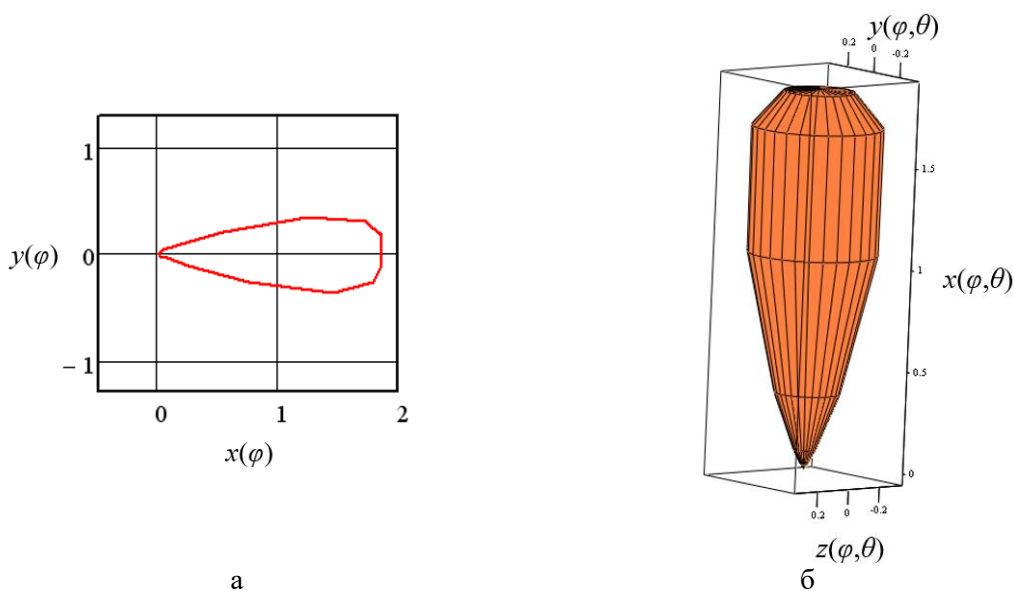


Рис. 7 – Графік твірної моркви конічноподібної форми (а) та її модель (б)

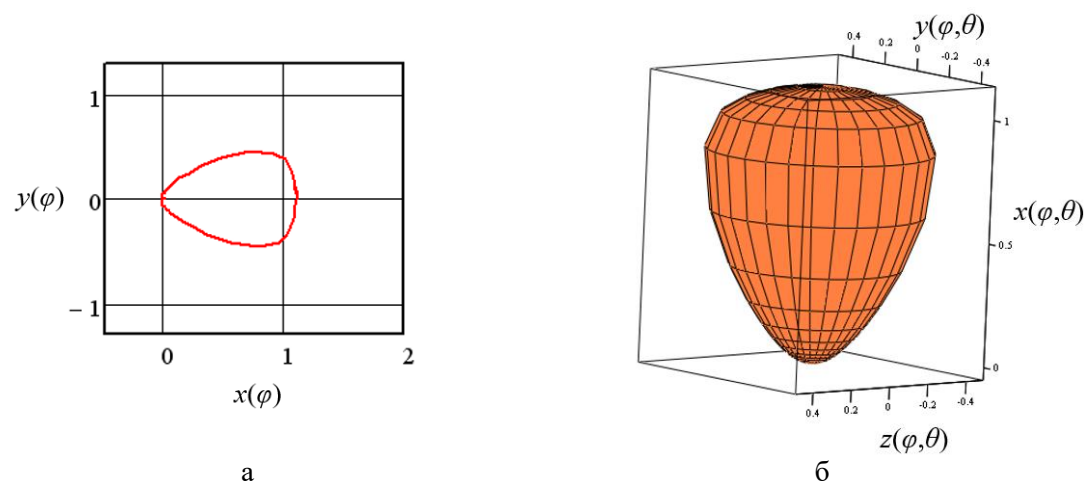


Рис. 8 – Графік твірної моркви плоско-конічної форми (а) та її модель (б)

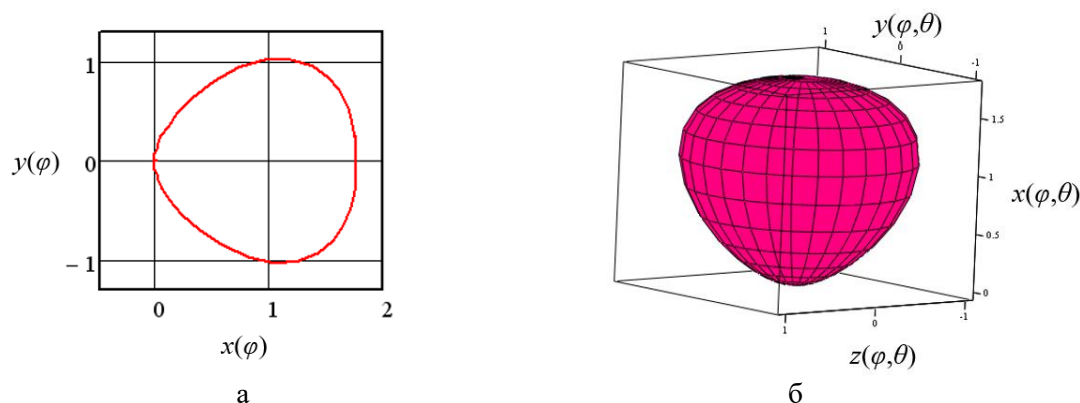


Рис. 9 – Графік твірної буряка столового плоско-конічної форми (а) та його модель (б)

$$z(\varphi, \theta) = \left[ \frac{\left| \cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right) \right|^{n_2}}{a} + \frac{\left| \sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right) \right|^{n_3}}{b} \right]^{\frac{-1}{n_1}} \times \sin\varphi \sin\theta; \quad (9)$$

де  $a = 8$ ;  $b = 0,3$ ;  $m = 1$ ;  $n_1 = 0,7$ ;  $n_2 = 0,2$ ;  $n_3 = 5$ ;  $d = 0,01$ .

### ВИСНОВКИ

Запропоновані моделі дозволяють описати і візуалізувати форму овочів, зокрема, томатів, моркви та буряка столового. Ці моделі можуть бути використані під час моделювання технологічних процесів, розроблення робочих органів машин, обладнання й роботів для збирання та перероблення урожаю різних сільськогосподарських культур, а також обчислення фізико-механічних характеристик овочів (об'єму, маси, густини тощо). Змінюючи параметри моделей, можна урахувати особливості форми різних сортів овочів. Для того, щоб розміри моделей відповідали розмірам плодів та коренеплодів, необхідно використовувати коефіцієнти масштабування, помноживши на них рівняння математичної моделі. Перспективними є подальші дослідження у цьому напрямі з метою розроблення математичних моделей для опису форми насіння, плодів та коренеплодів різних сільськогосподарських культур.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

Anders, A., Choszcz, D., Markowski, P., Lipiński, A. J., Kaliniewicz, Z., & Ślesicka, E. (2019). Numerical modeling of the shape of agricultural

products on the example of cucumber fruits. *Sustainability*, 11(10), 2798. <https://doi.org/10.3390/su11102798>

Bohl, E., Terraz, O., & Ghazanfarpour, D. (2015). Modeling fruits and their internal structure using parametric 3Gmap L-systems. *The Visual Computer*, 31, 819-829. <https://doi.org/10.1007/s00371-015-1108-9>

Bu, L., Hu, G., Chen, C., Sugirbay, A., & Chen, J. (2020). Experimental and simulation analysis of optimum picking patterns for robotic apple harvesting. *Scientia Horticulturae*, 261, 108937. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108937>

Cieslak, M., Cheddadi, I., Boudon, F., Baldazzi, V., Génard, M., Godin, C., & Bertin, N. (2016). Integrating physiology and architecture in models of fruit expansion. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1739. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01739>

Danckaers, F., Huysmans, T., Van Dael, M., Verboven, P., Nicolai, B., & Sijbers, J. (2015). Building a statistical shape model of the apple from corresponded surfaces. *Chemical Engineering Transactions*, 44, 49-54. <https://doi.org/10.3303/CET1544009>

Gruyters, W., Verboven, P., Diels, E., Rogge, S., Smeets, B., Ramon, H., Defraeye, T., & Nicolai, B. M. (2018). Modelling cooling of packaged fruit using 3D shape models. *Food and Bioprocess Technology*, 11, 2008-2020. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2163-9>

Kafashan, J., Tijsskens, B., Moshou, D., Mouazen, A. M., De Baerdemaeker, J., & Ramon, H. (2006). Image processing to create a realistic 3D model of apple based on its slices. In *2006 ASAE Annual Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers. <https://doi.org/10.13031/2013.21461>

Ling, L., Hongzhen, X., Wenlin, S., & Gelin, L. (2007). Research on visualisation of fruits based on deformation. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 50(5), 593-600.

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>
- Mieszkalski, L., & Wojdalski, J. (2017). A mathematical method for modeling the shape of apples. Part 1. Description of the method. *ECONTECHMOD: An International Quarterly Journal*, 6(3), 97-104.
- Morimoto, T., Takeuchi, T., Miyata, H., & Hashimoto, Y. (2000). Pattern recognition of fruit shape based on the concept of chaos and neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26(2), 171-186.
- Rogge, S., Defraeye, T., Herremans, E., Verboven, P., & Nicolai, B. M. (2015). A 3D contour based geometrical model generator for complex-shaped horticultural products. *Journal of Food Engineering*, 157, 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.02.006>
- Saudreau, M., Sinoquet, H., Santin, O., Marquier, A., Adam, B., Longuenesse, J.-J., Guillioni, L., & Chelle, M. (2007). A 3D model for simulating the spatial and temporal distribution of temperature within ellipsoidal fruit. *Agricultural and Forest Meteorology*, 147(1-2), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.06.006>
- Visa, S., Cao, C., Gardener, B. M., & van der Knaap, E. (2014). Modeling of tomato fruits into nine shape categories using elliptic fourier shape modeling and Bayesian classification of contour morphometric data. *Euphytica*, 200(3), 429-439. <https://doi.org/10.1007/s10681-014-1179-0>
- Wang, Y., & Chen, Y. (2020). Fruit morphological measurement based on three-dimensional reconstruction. *Agronomy*, 10(4), 455. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040455>
- Wang, J., Xie, Z., Mao, P., Sun, M., & Guo, J. (2024). Fruit modeling and application based on 3D imaging technology: a review. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18, 4120-4136. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02480-3>
- Ziaratban, A., Azadbakht, M., & Ghasemnezhad, A. (2016). Modeling of volume and surface area of apple from their geometric characteristics and artificial neural network. *International Journal of Food Properties*, 20(4), 762-768. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1180533>
- Дударєв, І. М., & Панасюк, С. Г. (2020). Дослідження впливу товщини нарізування плодів та коренеплодів на площу поверхні шматочків (*Impact of fruit and vegetable slicing on the area of pieces' surface*). *Сільськогосподарські машини*, 44, 51-70. <https://doi.org/10.36910/agromash.vi44.294>
- Дударєв, І. М., & Прибиш, С. Ю. (2023). Моделювання форми зерна та насіння для обґрунтування параметрів решета сепаратора (*Modeling of grain and seed shape to substantiate of seed cleaner sieve parameters*). *Сільськогосподарські машини*, 49, 124-133. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1066>