

УДК 631.313

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.117-125>

**М.І. Черновол**, проф., академік НААН України, д-р техн. наук, **М.О. Свірень**, проф., д-р техн. наук, **В.В. Амосов**, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

*e-mail: kaf\_sgm\_kntu@ukr.net, v\_vas\_a@ukr.net*

## Моделювання процесу однозернового дозування вакуумним пневмомеханічним висівним апаратом

Використання математичного моделювання значно прискорює процес досліджень. Розроблено алгоритм та програму в системі MathCAD для імітаційного моделювання процесу відокремлення насінин від циліндричної, конічної та тороїдальної поверхонь присмоктувальних отворів вакуумного пневмомеханічного висівного апарата та падіння їх на дно борозни.

Виявлено, що рівномірність розподілу насінин по довжині рядка погіршується зі зменшенням середнього діаметра насінин та збільшення радіуса присмоктувального отвору.

При конічній поверхні присмоктувального отвору найвища рівномірність розподілу насінин по довжині рядка досягається при куті конуса  $\gamma=60^\circ$  та максимальному діаметрі  $d_{\max}=(1,7-2,0) r_{\text{сєм}}$ .

Найвищу рівномірність розподілу насінин по довжині рядка можливо досягти при тороїдальній поверхні присмоктувального отвору, зокрема, при мінімальному радіусі радіального перерізу тора.

**математична модель, однозернове дозування, пневмомеханічний висівний апарат, присмоктувальний отвір, якість розподілу насінин**

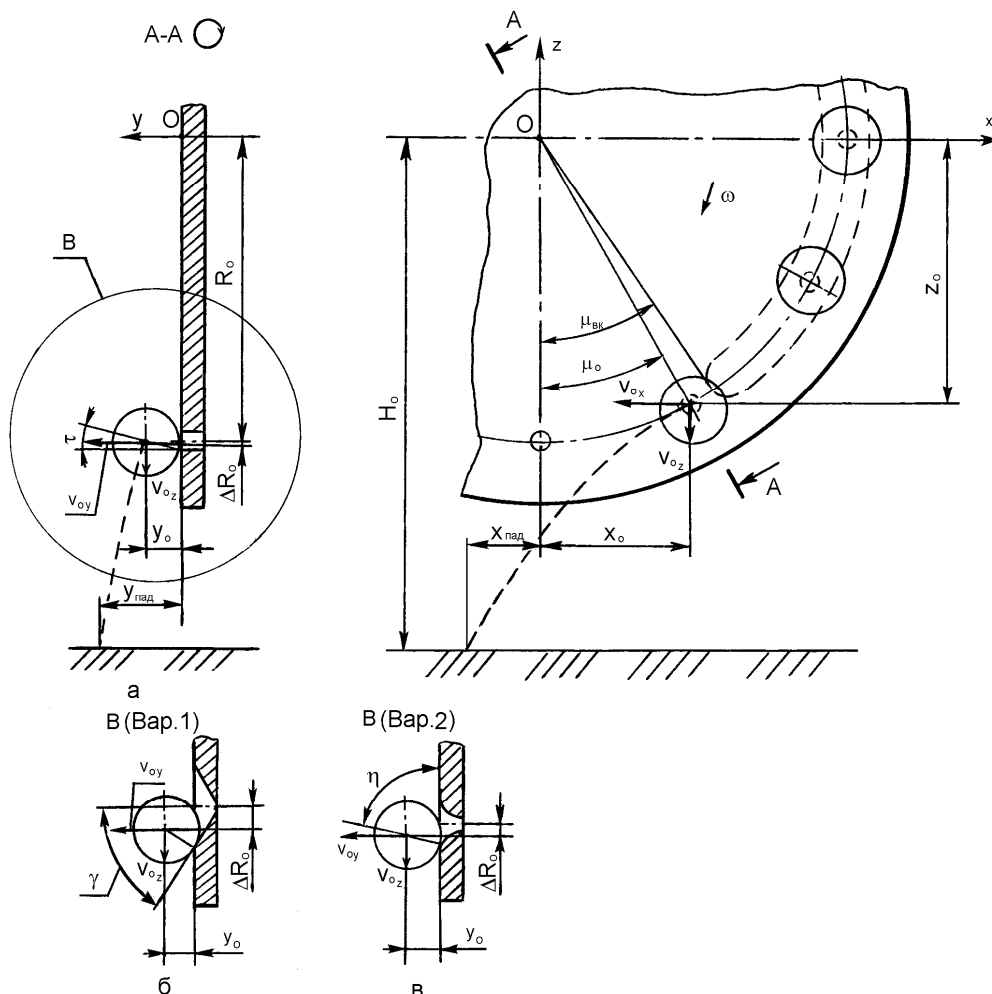
**Постановка проблеми.** Математичне моделювання стало невід'ємною складовою процесів дослідження, проектування, випробування сільськогосподарських машин та їх робочих органів. Якість роботи висівних апаратів просапних сівалок суттєво впливає на врожайність. Розроблені математичні моделі дозволяють визначити оптимальну форму, розміри та кінематичні параметри висівних апаратів та їх вплив на найважливіший показник якості роботи – рівномірність розподілу насінин по довжині рядка.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найкраще відпрацьовані алгоритми створення емпіричних математичних моделей на основі експериментальних даних, зокрема, методи планування експериментів [1; 2]. Важливу роль відіграють моделі для прогнозування врожайності на основі аналізу рівномірності розподілу насінин по довжині рядка [3]. Використання сучасних комп'ютерів та новітнього програмного забезпечення суттєво розширило можливості створення як емпіричних, так і теоретичних математичних моделей. Так, методи імітаційного моделювання дозволяють провести комп'ютерний експеримент, відтворюючи функціонування найскладнішої технічної системи, що значно прискорює процес досліджень та економить значні кошти.

Ряд математичних залежностей, які моделюють процеси, що відбуваються у висівних апаратах точної сівби, узагальнено в монографіях Волоха М.П. [4], Чичкина В.П. [5] та Кошурнікова А.Ф. [6].

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є визначення впливу форми поверхні та геометричних параметрів присмоктувального отвору на рівномірність розподілу насінин по довжині рядка та визначення його раціональних параметрів.

**Виклад основного матеріалу.** Модель імітує процес відокремлення насінин, розміри яких розподілені за нормальним усіченим законом [7] від поверхні присмоктувального отвору з циліндричною поверхнею (індекс  $i=1$ ) (рис. 1, а), конічною поверхнею ( $i=2$ ) (рис. 1, б) та тороїдальною поверхнею ( $i=3$ ) (рис. 1, в).



а – від циліндричної поверхні; б – від конічної поверхні; в – від тороїдальної поверхні

Рисунок 1 – Схема процесу відокремлення насінини від присмоктувального отвору та падіння на дно борозни

Джерело: розроблено авторами

У програмі моделювання, створеній у системі MathCAD 2000 [8] для формування вектора радіусів насінин  $r_{сем}$  використано функцію **rnorm**, яка генерує  $N$  випадкових нормально розподілених чисел.

Основні математичні залежності, необхідні для створення математичної моделі, виведено у роботі [7].

Для кожного значення  $r_{сем}$  алгоритмом (укрупнена схема наведена на рис. 2) передбачено розрахунок таких величин:

- початкові кути при русі насінин по кожній з трьох форм поверхні ( $\tau_o, \eta_o, \eta_{ок}$ );
- кути, які показують положення насінин в момент відокремлення від поверхні ( $\tau_{отд}, \eta_{отд}, \eta_{отд.к}$ );

г) проекції швидкості насінин в момент відокремлення на осі координат ( $v_{ox}$ ,  $v_{oy}$ ,  $v_{oz}$ );

д) координати центра мас насінини у системі координат  $Oxyz$ , пов'язаній з центром висівного диска ( $x_{omd}$ ,  $y_{omd}$ ,  $z_{omd}$ );

е) час падіння насінини на дно борозни;

ж) інтервал між сусідніми насінинами на дні борозни  $x_p$ .

У результаті статистичної обробки отриманого вектора  $x_p$  визначаються середнє вибіркоче значення інтервалу між насінинами ( $x_{гср}$ ,  $x_{ксп}$ ,  $x_{гсп}$ ) та середньоквадратичне відхилення інтервалів для присмоктувального отвору з гострою кромкою  $\sigma_g$ , конічної  $\sigma_k$  та тороїдальної  $\sigma_t$  поверхонь.

Укрупнена схема алгоритму математичного моделювання процесу відокремлення насінини від присмоктувального отвору та падіння на дно борозни представлена на рис. 2.

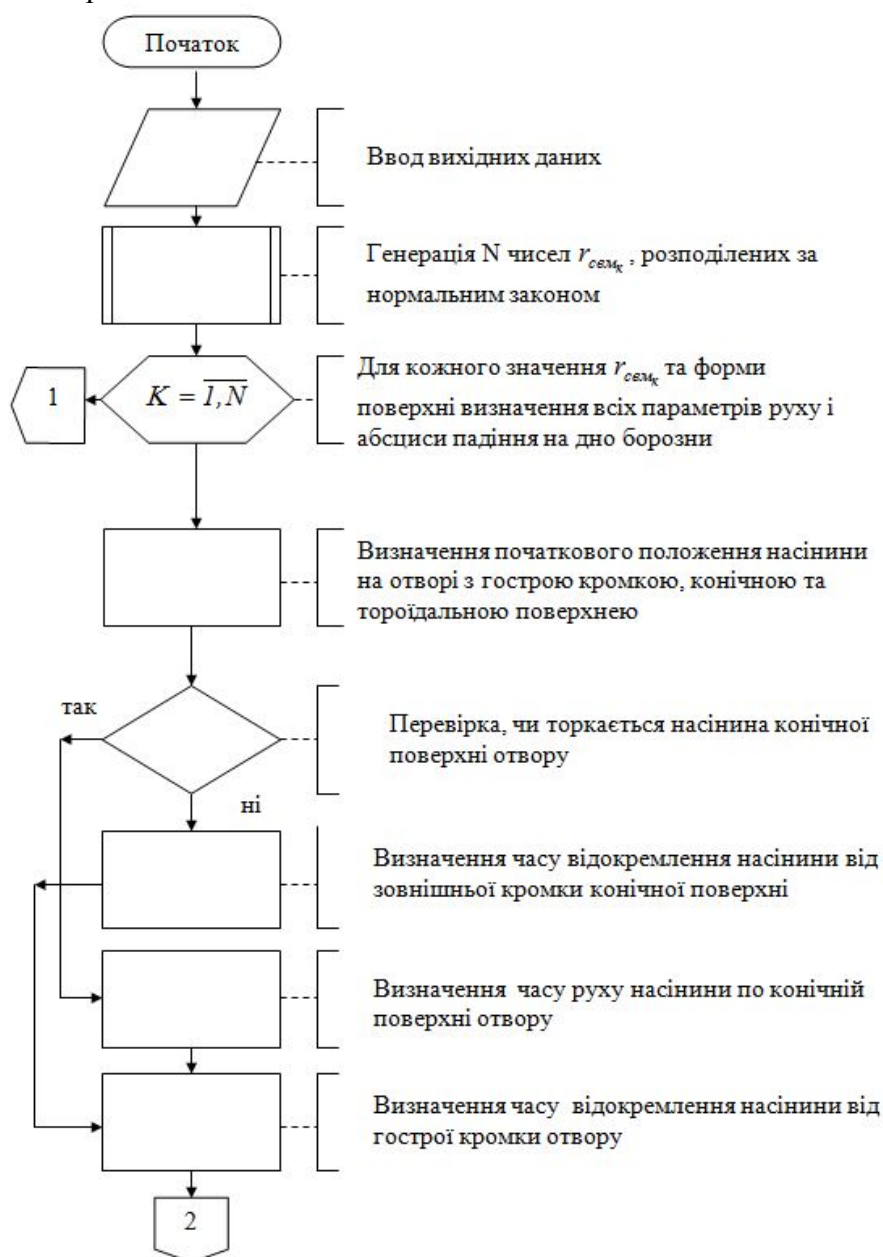


Рисунок 2 – Схема алгоритму математичного моделювання

Джерело: розроблено авторами

Моделювання процесу відокремлення кулеподібних насінин від різних по формі поверхонь присмоктувального отвору та падіння їх на дно борозни дозволяють провести імітацію висіву насінин, лінійні розміри яких розподілені за усіченим нормальним законом. Це необхідно для встановлення інтервалів між сусідніми насінинами на дні борозни та їх статистичних характеристик.

При проведенні математичного експерименту змінюється один із вхідних параметрів моделі і його значення фіксуються у робочому векторі, наприклад  $\omega$ , а отримані у результаті моделювання значення  $\sigma_z$ ,  $\sigma_k$  і  $\sigma_m$  – у трьох інших векторах. На основі цих векторів будуються графіки  $\sigma_z=f_1(\omega)$ ,  $\sigma_k=f_2(\omega)$  і  $\sigma_m=f_3(\omega)$  у системі Mathcad. Аналогічно проводиться аналіз всіх необхідних залежностей.



Рисунок 2 (продовження) – Схема алгоритму математичного моделювання

Джерело: розроблено авторами

Найбільший інтерес викликає вплив середнього радіуса насінини, радіуса отвору, радіуса закруглення тороїдальної поверхні, кута конуса і максимального діаметра конічної поверхні на рівномірність розподілу насінин у рядку.

Розрахунки проведено при таких значеннях параметрів моделі:

радіус кола присмоктувальних отворів  $R_0=0,06$  м;

кут закінчення вакуумної камери  $\mu_{\text{вк}}=\pi/6$ ;

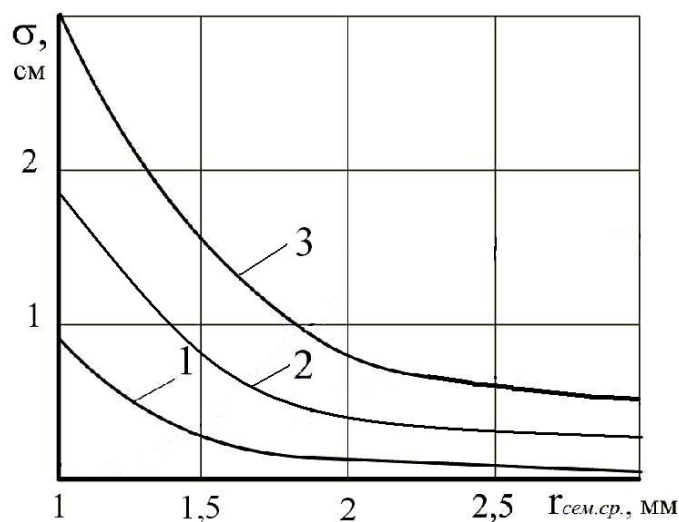
висота осі диска над дном борозни  $H_0=0,2$  м;

кількість отворів висівного диска  $z=22$ ;

швидкість руху сівалки  $v_m=2$  м/с;

кількість інтервалів моделювання  $N=500$ .

Як видно з отриманих залежностей (рис. 3), збільшення радіуса насінин покращує якість їх розподілу.



1 – тороїдальна поверхня; 2 – циліндрична поверхня; 3 – конічна поверхня

Рисунок 3 – Вплив розміру насінин на рівномірність їх розподілу у рядку  
( $\omega=10$  с<sup>-1</sup>;  $r_{отв}=0,5$  мм;  $d_{max}=2,8$  мм;  $r_{ф}=0,9$  мм;  $K_{пр}=0,4$ )

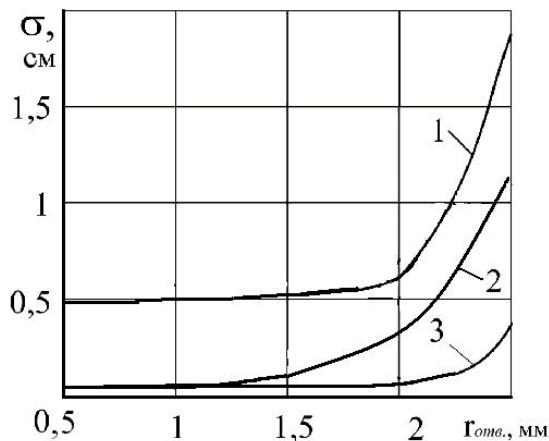
*Джерело: розроблено авторами*

Найкращі результати точності висіву спостерігаються для присмоктувальних отворів тороїдальної форми.

Для досліджених отворів усіх форм характерне суттєве зменшення впливу розміру отвору на точність висіву при  $r_{сеп.ср.}>2$  мм.

Дослідженням впливу радіуса присмоктувального отвору встановлено, що зі збільшенням радіуса, рівномірність розподілу насінини спочатку (до  $r_{отв}=1,5$  мм) практично не змінюється, а потім різко погіршується (рис. 4). Пояснити це можна тим, що збільшення отвору приводить до більш глибокого западання насінини в комірку дозуючого диска і що ускладнює процес їх відокремлення.

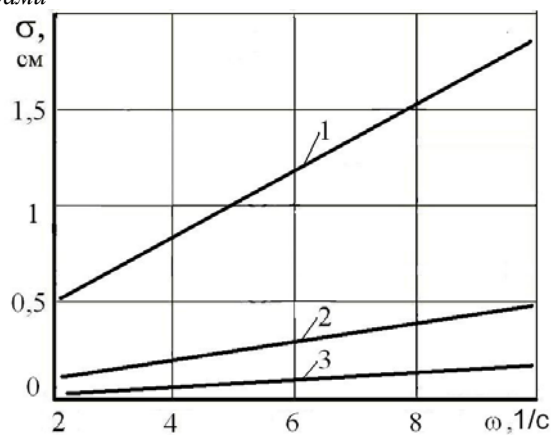
Збільшення кутової швидкості обертання висівного диска помітно погіршує рівномірність розподілу насінин (рис. 5).



1 –  $r_{сеп\ ср} = 6\text{ мм}$ ;  $\sigma_r = 1,2\text{ мм}$ ; 2 –  $r_{сеп\ ср} = 5\text{ мм}$ ;  $\sigma_r = 1\text{ мм}$ ; 3 –  $r_{сеп\ ср} = 7\text{ мм}$ ;  $\sigma_r = 1,4\text{ мм}$

Рисунок 4 – Вплив радіуса присмоктувального отвору на рівномірність розподілу насінин у рядку (циліндрична поверхня,  $\omega = 10\text{ с}^{-1}$ )

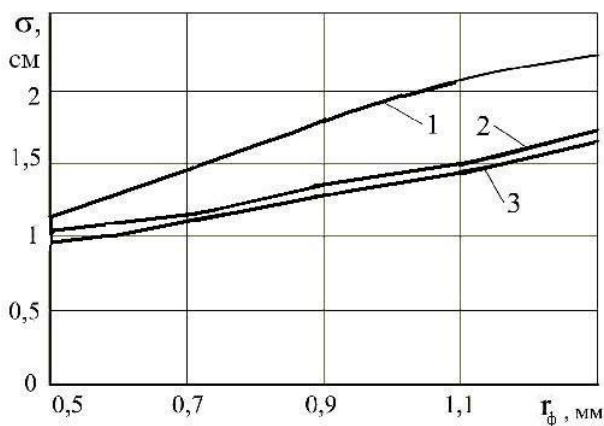
Джерело: розроблено авторами



1 – конічна поверхня; 2 – циліндрична поверхня; 3 – тороїдальна поверхня

Рисунок 5 – Вплив кутової швидкості обертання висівного диска на рівномірність розподілу насінин у рядку ( $r_{отв} = 1\text{ мм}$ ;  $r_{сеп\ ср} = 3\text{ мм}$ ;  $d_{max} = 4\text{ мм}$ ;  $\gamma = \pi/3$ ;  $r_{\phi} = 0,9\text{ мм}$ ;  $k_{mp} = 0,4$ )

Джерело: розроблено авторами



1 –  $k_{mp} = 0,7$ ; 2 –  $k_{mp} = 0,4$ ; 3 –  $k_{mp} = 0,3$

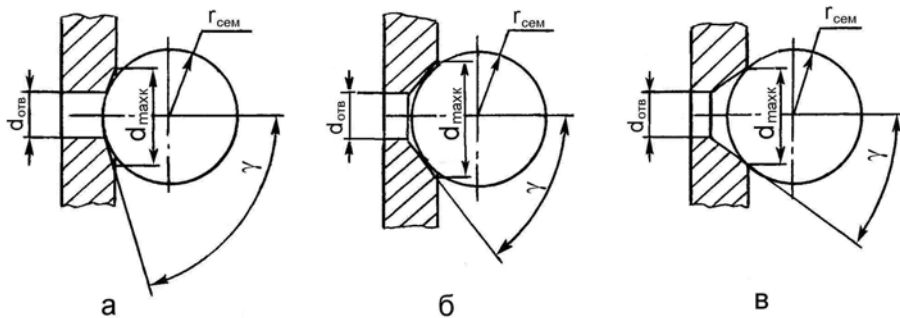
Рисунок 6 – Вплив радіуса закруглення тороїдальної поверхні в перерізі на рівномірність розподілу насінин ( $\omega = 10\text{ с}^{-1}$ ;  $r_{отв} = 1\text{ мм}$ ;  $r_{сеп\ ср} = 3\text{ мм}$ )

Джерело: розроблено авторами

При відокремленні насінини від тороїдальної поверхні присмоктувального отвору збільшення його радіуса негативно впливає на якість розподілу насінин у рядку (рис. 6).

Радіус закруглення тороїдальної поверхні в перерізі (рис. 6) і коефіцієнт тертя між насінною та поверхнею отвору лінійно зменшують точність висіву (рис. 6). Тому для підвищення якості розподілу бажано закругляти гострі кромки присмоктувальних отворів і обробляти їх поверхню до необхідної чистоти.

При відокремленні насінини від конічної поверхні отвору можливі три варіанти розташування насінини на отворі у початковий момент у залежності від співвідношення розмірів отвору, насінини і кута конуса (рис. 7). При першому, якщо виконується співвідношення  $r_{отв} > r_{сем} \cos \gamma$ , де  $\gamma$  – кут конусності,



а– від внутрішньої кромки; б– від поверхні конуса; в– від зовнішньої кромки

Рисунок 7 – Схема відокремлення насінини від конічної поверхні отвору

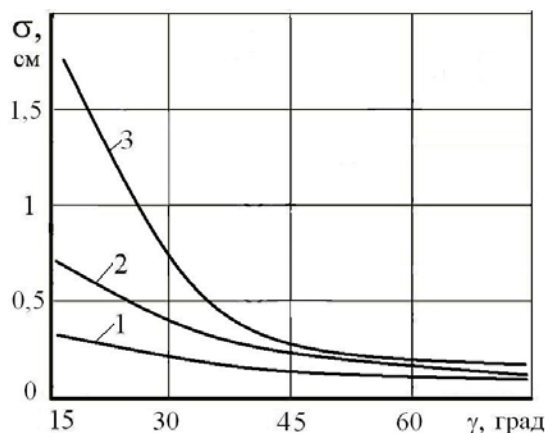
Джерело: розроблено авторами

то насінина торкається внутрішньої кромки конічної поверхні (рис. 7,а) і починає відокремлюватись від неї. При другому, коли виконується подвійна нерівність

$$r_{отв} \leq r_{сем} \cos \gamma < d_{maxк} / 2,$$

насінина починає рух по конічній поверхні (рис. 7,б). При третьому  $d_{maxк} \leq 2r_{сем} \cos \gamma$ , – насінина відокремлюється від зовнішньої кромки конічної поверхні отвору (рис. 7,в), тобто процес аналогічний відокремленню від гострої кромки.

При третьому варіанті діаметр кола контакту між насінною і отвором дорівнює максимальному діаметру конусної поверхні  $d_{maxк}$ , тому кут конуса мало впливає на рівномірність розподілу насінин (рис. 8).



1–  $d_{maxк} = 3$  мм; 2–  $d_{maxк} = 5$  мм; 3–  $d_{maxк} = 7$  мм

Рисунок 8 – Вплив кута конусної поверхні присмоктувального отвору на рівномірність розподілу насінин у рядку ( $\omega = 10 \text{ c}^{-1}$ ;  $r_{отв} = 1$  мм;  $r_{сем\text{ ср}} = 3$  мм;  $\sigma_r = 0,6$  мм)

Джерело: розроблено авторами

При більших значеннях  $d_{maxk}=5-7$  мм рівномірність розподілу покращується зі збільшенням кута конуса і досягає оптимального значення при  $\gamma=\pi/3$ . Таким чином, можна рекомендувати при  $r_{sem\ cp}=3$  мм виконувати конусну поверхню з  $d_{maxk}=5$  мм та  $\gamma=\pi/3$ .

#### Висновки:

1. Створено математичну модель відокремлення насінин від циліндричної, конічної та тороїдальної поверхонь присмоктувальних отворів та падіння їх на дно борозни.

2. Рівномірність розподілу насінин по довжині рядка погіршується зі зменшенням середнього діаметра насінин та збільшення радіуса присмоктувального отвору.

3. При конічній поверхні присмоктувального отвору найвища рівномірність розподілу насінин по довжині рядка досягається при куті конуса  $\gamma=60^\circ$  та максимальному діаметрі  $d_{maxk}=(1,7-2,0) r_{sem}$ .

4. При тороїдальній поверхні присмоктувального отвору найвищу рівномірність розподілу насінин по довжині рядка можливо отримати при мінімальному радіусі радіального перерізу тора.

#### Список літератури

1. Шварц А. А., Шварц С. А., Сейтджанов Д. Т. Формализация математической модели аппарата точного высева. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2012. Вып. 4. С.73–75. URL: <https://ur.booksc.org/book/36366073/5f8e74> (дата обращения: 06.10.2021)
2. Золотовская Е.В., Миронов А.С. Моделирование параметров высевающего аппарата овощной сеялки. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб.* 2015. Вып. 45, ч.І. С.78-86.
3. Полонецкий С.Д. Статистическое моделирование урожайности по точности распределения семян. *Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства*. 1975. №5. С.52–54.
4. Волоха М. П. Технологічний комплекс машин для виробництва буряків цукрових: ширина міжрядь. Теорія, моделювання, результати випробувань : монографія. Київ : ТОВ «Центр учбової літератури», 2015. 220 с.
5. Чичкин В.П. Овощные сеялки и комбинированные агрегаты: теория, конструкция, расчет. Кишинев: Штиинца, 1984. 392 с. URL: <https://sejalki.ru/articles/elementi-teorii-protsessov-viseva-i/raspredelenie-semyan-seyalkami-tochnogo.html> (дата обращения: 12.10.2021)
6. Кошурников, А.Ф. Пунктирный посев пропашных культур и формирование густоты насаждений : монография. Пермь : ИПЦ «Прокрость», 2015. 218 с.
7. Амосов В.В. Аналіз процесу відокремлення насінин від присмоктувальних отворів вакуумного пневмомеханічного висівного апарата. *Техніка в с.-г. виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоград. нац. техн. ун-ту*. 2004. Вып. 15. С.438–444.
8. Херхагер М., Партоль Х. Mathcad 2000: полное руководство : пер. с нем. Киев : Издат. группа BHV, 2000. 416 с.

#### References

1. Shvarts, A.A., Shvarts, S.A. & Seyitdzhanov, D.T. (2012). Formalizatsiya matematicheskoy modeli apparata tochnogo vyseva. [Formalization of the mathematical model of the precision seeding apparatus.] *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii – Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy, Vol. 4, 73-75*. Retrieved from <https://ur.booksc.org/book/36366073/5f8e74> [in Russian]
2. Zolotovskaya, Ye.V. & Mironov, A.S. (2015). Modelirovaniye parametrov vysevayushchego apparata ovoshchnoy seyalki. [Modeling the parameters of the seeding unit of a vegetable seeder.] *Konstruyuvannya, vyrobnyctvo ta ekspluatatsiya sil'skohospodars'kyx mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery, Vol. 45, 1, 78-86* [in Russian].
3. Polonetskiy, S.D. (1975). Statisticheskoye modelirovaniye urozhaynosti po tochnosti raspredeleniya semyan. [Statistical modeling of yield based on the accuracy of seed distribution]. *Mekhanizatsiya i*



- elektrifikatsiya sotsialisticheskogo sel'skogo khozyaystva – Mechanization and electrification of socialist agriculture, 5, 52–54 [in Russian].
4. Volokha, M.P. (2015). *Tekhnolohichnyy kompleks mashyn dlya vyrobnytstva buryakiv tsukrovyykh: shyryna mizhryad'. Teoriya, modelyuvannya, rezul'taty vyprobuvan'* [Technological complex of machines for the production of sugar beets: row spacing. Theory, modeling, test results]. Kyiv : TOV «Tsentr uchbovoyi literatury» [in Ukrainian].
  5. Chichkin, V.P. (1984). *Ovoshchnyye seyalki i kombinirovannyye agregaty: teoriya, konstruktsiya, raschet* [Vegetable seeders and combined units: theory, design, calculation]. Kishinev: Shtiintsa, Retrieved from <https://sejalki.ru/articles/elementi-teorii-protsesov-viseva-i/raspredelenie-semyan-seyalkami-tochnogo.html> [in Russian].
  6. Koshurnikov, A.F. (2015). *Punktirnyy posev propashnykh kul'tur i formirovaniye gustoty nasazhdeniy : monografiya* [Dotted sowing of row crops and the formation of plantation density]. Perm' : IPTS «Prokrost'» [in Russian].
  7. Amosov, V.V. (2004). Analiz protsesu vidokremlennya nasynyn vid prysmoktuval'nykh otvoriv vakuumnoho pnevmomekhanichnoho vysivnoho aparata. [Analysis of the process of separating seeds from the suction holes of the vacuum pneumomechanical sowing machine]. *Tekhnika v s.-h. vyrobnytstvi, haluzeve mashynobudivannya, avtomatyzatsiya: Zb. nauk. pr. Kirovohrad. nats. tekhn. un-tu – Machinery in Agricultural Production, Industry Machine Building, Automation: Coll. Works of Kirovohrad State Technical University, Vol. 15*, 438–444 [in Ukrainian].
  8. Kherkhager, M. & Partol', K.H. (2000). *Mathtcad 2000: a complete guide*. (Ed.). Kiyev : Izdat. gruppa BHV [in Russian].

**Mykhailo Chernovol**, Prof., Academician of the NAAS of Ukraine, DSci., **Mykola Sviren**, Prof., DSci., **Volodymyr Amosov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Simulation of the Process of Single-grain Dosing by a Vacuum Pneumatic Mechanical Sowing Device**

The aim of this work is to determine the influence of the surface shape and geometric parameters of the suction hole on the uniformity of seed distribution along the length of the row and determine its rational parameters.

The use of mathematical modeling significantly speeds up the research process. An algorithm and a program in the Mathcad system have been developed for simulating the process of separating seeds from the cylindrical, conical and toroidal surfaces of the suction holes of a vacuum pneumomechanical sowing device and their fall to the bottom of the furrow. The algorithm is based on the results of previous studies by the authors. Its initial data is the simulation with the help of a generator of random numbers of spherical seed sizes, which are distributed according to the truncated normal law. Each seed undergoes a process of separation from the surface of the suction hole and free fall to the bottom of the furrow. Computer experiments are repeated, changing the average seed diameters, surface type and geometric parameters of the suction hole surface. As a result of statistical processing of the obtained vector of intervals between adjacent seeds at the bottom of the furrow, the mean sample value of the interval between seeds and the standard deviation of the intervals are determined. The last indicator is chosen by the criterion of uniformity of distribution of seeds on length of a line. Graphs of dependence of this indicator on the investigated parameters are constructed.

As a result of the analysis of graphs it was found that the uniformity of seed distribution along the length of the row deteriorates with decreasing average seed diameter and increasing the radius of the suction hole. With a conical surface of the suction hole, the highest uniformity of seed distribution along the row length is achieved at a cone angle  $\gamma = 60^\circ$  and a maximum diameter  $d_{max} = (1,7-2,0) r_{sem}$ . The highest uniformity of seed distribution along the length of the row can be achieved with a toroidal surface of the suction hole, in particular, with a minimum radius of the radial section of the torus.

**mathematical model, single-grain dosing, pneumatic mechanical sowing device, suction hole, quality of seed distribution**

*Одержано (Received) 06.10.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 18.10.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021*