

УДК 621.928

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.59-68>**І.М. Дударев**, проф., д-р техн. наук, **В.О. Ольховський**, асп.*Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна**e-mail: i\_dudarev@ukr.net*

## Моделювання подачі сипкого матеріалу на решето сепаратора ножичного типу

У статті запропонована конструкція сепаратор сипких матеріалів ножичного типу. Ефективність роботи сепаратора залежить від рівномірності подачі сипкого матеріалу на поверхню решіт. Тому обґрунтування раціональних параметрів сепаратора є надзвичайно актуальним завданням. Запропонована математична модель подачі сипкого матеріалу з бункера на решето дозволяє визначити траєкторію падіння частинки сипкого матеріалу та описати положення решета, що змінюється внаслідок обертання ексцентрика. А це, у свою чергу, дозволяє обґрунтувати раціональні параметри сепаратора з урахуванням кінематичного режиму його роботи. За цих параметрів на решеті буде сформований шар матеріалу однакової висоти, що забезпечить сприятливі умови для процесу сепарування.

**сепаратор сипких матеріалів, подача сипкого матеріалу, параметри решета, моделювання завантаження сепаратора, ефективність використання решета**

**И.Н. Дударев**, проф., д-р техн. наук, **В.О. Ольховский**, асп.*Луцкий национальный технический университет, г. Луцк, Украина*

## Моделирование подачи сыпучего материала на решето сепаратора ножичного типа

В статье предложена конструкция сепаратора сыпучих материалов ножичного типа. Эффективность работы сепаратора зависит от равномерности подачи сыпучего материала на поверхность решет. Поэтому обоснование рациональных параметров сепаратора является чрезвычайно актуальной задачей. Предложенная математическая модель подачи сыпучего материала из бункера на решето позволяет определить траекторию падения частицы сыпучего материала и описать положение решета, которое изменяется в результате вращения эксцентрика. А это, в свою очередь, позволяет обосновать рациональные параметры сепаратора с учетом кинематического режима его работы. При этих параметрах на решете будет сформирован слой материала одинаковой высоты, что обеспечит благоприятные условия для процесса сепарации.

**сепаратор сыпучих материалов, подача сыпучего материала, параметры решета, моделирование загрузки сепаратора, эффективность использования решета**

**Постановка проблеми.** У сільському господарстві та виробництві комбікормів як посівний матеріал і сировину використовують насіння та зерно різних сільськогосподарських культур, що потребують очищення та сепарування. Ці технологічні операції надзвичайно важливі, оскільки від них залежать якісні показники урожаю, сировини та кінцевого продукту. Сепаратори, що здійснюють очищення та сепарування насіння і зерна (сипких матеріалів), поділяють за способом сепарування на гравітаційні, повітряні, вібраційні, магнітні та інші [1–4]. Принцип роботи переважної більшості сепараторів, які використовуються у сільському господарстві, заснований на поєднанні різних способів сепарування, що передбачають урахування фізико-механічних властивостей складових зернової (насінневої) маси, зокрема, таких як [5]: розмір зерна, маса зерна, форма зерна, текстура поверхні зерна, аеродинамічні характеристики зерна, електропровідність зерна, вологість зерна, фрикційні властивості

зерна тощо. Сепаратори, як і більшість машин та обладнання в сільському господарстві, мають періодичне (сезонне) використання, тому важливо, щоб вони були компактними та транспортабельними. Тоді їх можна переміщати між сільськогосподарськими підприємствами, що збільшить їх завантаження. Такі переваги має сепаратор сипких матеріалів ножичного типу, який внаслідок конструктивних особливостей має невеликі габаритні розміри та зручний в обслуговуванні. Важливим є обґрунтування раціональних параметрів такого сепаратора, зокрема, взаємного розташування бункера і решіт верхніх секцій. Таким чином, дослідження, які спрямовані на обґрунтування конструктивних параметрів сепаратора ножичного типу, є актуальними.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для визначення швидкості потоку сипкого матеріалу у різних частинах бункера під час вивантаження, а також його подачі на робочі поверхні технологічного обладнання, науковці широко використовують метод математичного моделювання. За допомогою цього методу були отримані рівняння для визначення швидкості потоку сипкого матеріалу залежно від форми бункера, його конструктивних параметрів та розмірів вивантажувального отвору [6]. Одним із найбільш поширених методів моделювання, який використовують для визначення швидкості потоку сипких матеріалів на виході із бункерів різної форми, є метод дискретних елементів (DEM) [7].

На процес витікання сипких матеріалів із бункера впливають фізико-механічні властивості матеріалу, температура та відносна вологість зовнішнього середовища, кут нахилу стінок та днища бункера, розмір та форма вивантажувального отвору, матеріал бункера тощо [8]. У випадку нормального витікання швидкість сипкого матеріалу на виході із бункера можна розрахувати за залежністю [9]:

$$V_0 = \mu \sqrt{3,2gR_z}, \quad (1)$$

де  $V_0$  – швидкість потоку матеріалу на виході із отвору бункера, м/с;

$\mu$  – коефіцієнт витікання ( $\mu = 0,55-0,65$ );

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$R_z$  – гідравлічний радіус вивантажувального отвору, м.

Гідравлічний радіус прямокутного вивантажувального отвору бункера згідно [9]:

$$R_z = \frac{(a - kd_{екв.})(b - kd_{екв.})}{2(a + b - 2kd_{екв.})}, \quad (2)$$

де  $a$  – ширина вивантажувального отвору бункера, м;

$b$  – довжина вивантажувального отвору бункера, м;

$k$  – емпіричний коефіцієнт ( $k = 1,25-1,7$ );

$d_{екв.}$  – діаметр частинки матеріалу або її еквівалентний діаметр, м.

Еквівалентний діаметр частинки сипкого матеріалу визначають згідно [10]:

$$d_{екв.} = k_{ф.} \xi_{с.г.р.}, \quad (3)$$

де  $k_{ф.}$  – коефіцієнт форми реальної частинки сипкого матеріалу;

$\xi_{с.г.р.}$  – середній геометричний розмір реальної частинки сипкого матеріалу, м.

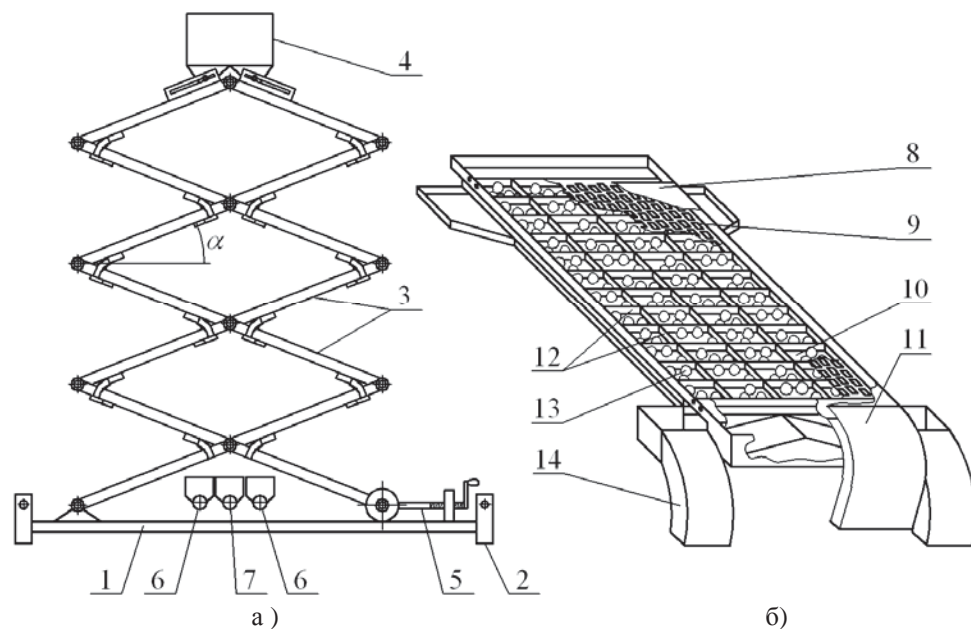
Якщо частинка сипкого матеріалу має сферичну форму, тоді коефіцієнт форми  $k_{ф.} = 1$ ; якщо у формі циліндра –  $k_{ф.} = 1,14$ ; якщо у формі параболічної бочки, тоді значення  $k_{ф.} = 0,47$ ; якщо у формі еліпсоїда –  $k_{ф.} = 0,73$  [10].

Від швидкості сипкого матеріалу на виході із бункера залежить дальність польоту частинок сипкого матеріалу та перебіг технологічного процесу сепарування. Тому надзвичайно важливо враховувати цей параметр під час обґрунтування подачі сипкого матеріалу на робочі поверхні технологічного обладнання, зокрема сепаратора.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є змоделювати процес подачі частинок сипкого матеріалу з вивантажувального отвору бункера на похиле плоске решето сепаратора ножичного типу, що здійснює коливний рух.

**Виклад основного матеріалу.** Для сепарування сипких матеріалів, зокрема насіння та зерна сільськогосподарських культур, пропонується конструкція сепаратора ножичного типу (рис. 1), що містить платформу, на якій розташований механізм сепарування. До платформи нерухомо прикріплені чотири повзунки, які з'єднані за допомогою шатунів із чотирма ексцентриками. Ексцентрики розташовані в чотирьох опорах платформи. В опорах також розташовані вертикальні спрямовувачі для повзунків, чим забезпечена можливість коливного руху платформи з механізмом сепарування вздовж вертикалі.

Механізм сепарування містить систему секцій-важелів трьох різних конструкцій, які з'єднані навхрест (по типу “ножиці”). Над парою верхніх секцій-важелів розташовано бункер із двома вивантажувальними отворами. Секції-важелі обладнані пересипними полицями, кожна з яких містить плоске решето, під яким розташований піддон. Над плоским решетом передбачено кришку, а між плоским решетом і піддоном встановлені поздовжні та поперечні перегородки, які утворюють секції прямокутної форми, в кожній з яких розміщені декілька гумових кульок. Пересипні полиці обладнані рукавами для відокремленої дрібної фракції сипкого матеріалу та для сипкого матеріалу. Рукави усіх пересипних полиць, окрім полиць нижніх секцій-важелів, розташовані таким чином, що спрямовують складові матеріалу на плоскі решета та піддони полиць, які розташовані під ними. Рукави пересипних полиць нижніх секцій-важелів розташовані таким чином, що спрямовують сипкий матеріал у вивантажувальний механізм, а відокремлену дрібну фракцію – в її накопичувачі. Зміна кута встановлення решіт відбувається за допомогою передачі “гвинт-гайка”.



а) – конструкція сепаратора; б) – конструкція пересипної полиці  
 1 – платформа; 2 – опора; 3 – секції-важелі; 4 – бункер; 5 – передача “гвинт-гайка”; 6 – накопичувачі дрібної фракції; 7 – вивантажувальний механізм; 8 – кришка полиці; 9 – плоске решето; 10 – піддон полиці; 11 – рукав для сипкого матеріалу; 12 – поздовжні та поперечні перегородки; 13 – гумові кульки; 14 – рукави для відокремленої дрібної фракції

Рисунок 1 – Сепаратор сипких матеріалів ножичного типу

Джерело: розроблено авторами

Змодельємо процес подачі сипкого матеріалу на поверхню решета сепаратора ножичного типу. Решета сепаратора здійснюють коливний рух вздовж вертикалі. У коливний рух механізм сепарування приводиться за допомогою чотирьох ексцентриків, які синхронно обертаються в один бік зі сталою кутовою швидкістю  $\omega$ . Оскільки ексцентрики функціонують однаково, то розглянемо кінематику одного з них. Рівняння переміщення повзунка з початкового положення  $B_0$ , який за допомогою шатуна з'єднаний з ексцентриком, має вигляд (рис. 2, а):

$$y_n = r + l - (r \cos \varphi + l \cos \beta), \quad (4)$$

де  $y_n$  – переміщення повзунка вздовж вертикальної осі  $y$ , м;

$r$  – радіус ексцентрика ( $OA = r$ ), м;

$l$  – довжина шатуна ( $AB = l$ ), м;

$\varphi$  – кут повороту ексцентрика, що відраховується від осі  $y$  за годинниковою стрілкою, починаючи з крайнього нижнього положення повзунка, град.;

$\beta$  – кут між шатуном та віссю  $y$ , град.

Необхідно зазначити, що у науковій праці [11] представлено аналітичні залежності, що дозволяють визначити точні значення переміщення  $y_n$ , швидкості  $V_n$  та прискорення  $a_n$  механізму приводу в коливний рух повзунка, але ці вирази громіздкі, що ускладнює їх подальше використання під час математичного моделювання технологічних процесів. Також у цій праці визначено похибки використання методу спрощення рівняння (4) за рахунок припущення, що кут  $\beta$  в окремих конструкціях сільськогосподарських машин та обладнання настільки малий, що ним можна знехтувати. За результатами знаходження похибки було встановлено, що її величина є в межах 6–18%, що допустимо не для всіх інженерних розрахунків. Тому скористаємося методом знаходження кута  $\beta$ , який представлений у джерелі [12].

Позначимо  $r/l$  через  $\lambda$ , тоді з трикутника  $\Delta ABO$  матимемо (рис. 2, а):

$$\sin \beta = \frac{r}{l} \sin \varphi = \lambda \sin \varphi. \quad (5)$$

Косинус кута  $\beta$  визначається із урахуванням рівняння (5):

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi}. \quad (6)$$

Вираз  $(1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}$  є біномом Ньютона, який можна розкласти у ряд [12]:

$$\cos \beta = (1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi)^{1/2} = 1 - \frac{1}{2} \lambda^2 \sin^2 \varphi - \frac{1}{8} \lambda^4 \sin^4 \varphi - \dots \quad (7)$$

Ураховуючи можливі значення  $\lambda$ , членами ряду (7), що вищі другого порядку, можна знехтувати, тоді отримаємо:

$$\cos \beta = 1 - \frac{1}{2} \lambda^2 \sin^2 \varphi. \quad (8)$$

Після підстановки виразу (8) у рівняння (4), матимемо:

$$y_n = r \left( 1 - \cos \varphi + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right). \quad (9)$$

Рівняння (9) описує переміщення вздовж вертикалі усіх чотирьох повзунків сепаратора і, відповідно, механізму сепарування з решетами та бункером.

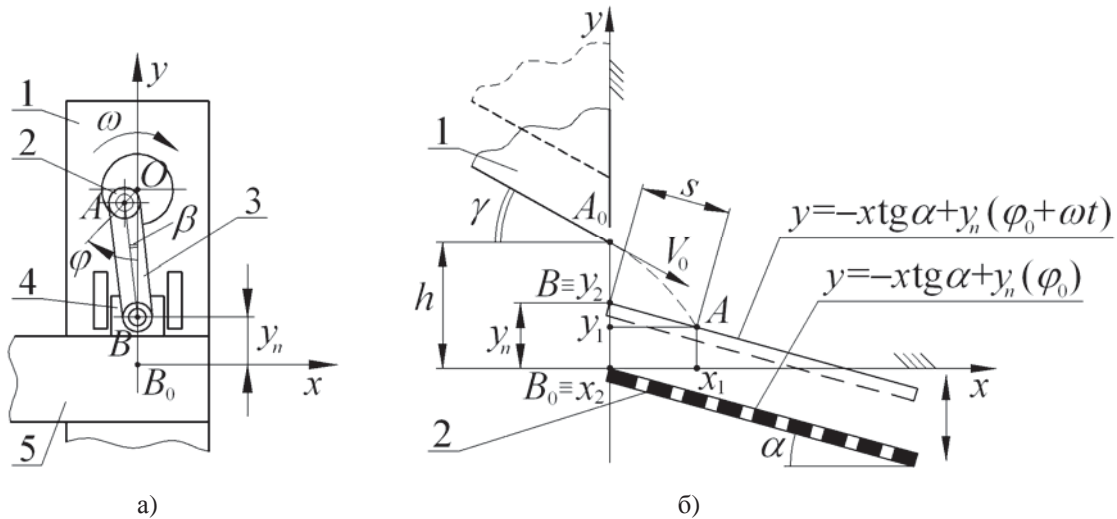
Знайшовши першу та другу похідні від  $y_n$  за часом  $t$ , ураховуючи, що  $\varphi = \omega t$ , отримаємо рівняння, відповідно, швидкості та прискорення повзунка [12]:

$$V_n = r\omega \left( \sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right), \quad (10)$$

$$a_n = r\omega^2 (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi), \quad (11)$$

де  $V_n$  – швидкість повзунка вздовж вертикальної осі  $y$ , м/с;  
 $a_n$  – прискорення повзунка вздовж вертикальної осі  $y$ , м/с<sup>2</sup>.

Визначимо дальність польоту частинки сипкого матеріалу вздовж решета, яка виходить з бокового вивантажувального отвору бункера з початковою швидкістю  $V_0$  та здійснює вільне падіння до моменту контакту з поверхнею решета. Нехай, під час падіння на частинку сипкого матеріалу, яку приймаємо за матеріальну точку, діє лише сила ваги  $mg$ . Силою опору повітряного потоку переміщенню частинки сипкого матеріалу нехтуємо. Кут між днищем бункера (у площині рис. 2, б) та горизонталлю позначимо через  $\gamma$ , а кут між решетою та горизонталлю – через  $\alpha$ . Решето разом із бункером здійснює коливання вздовж вертикалі за законом, що описується рівнянням (9). Початкове положення верхнього краю решета характеризує точка  $B_0$  (рис. 2, б).



а) – схема до визначення кінематичних параметрів ексцентрика (1 – опора платформи; 2 – ексцентрик; 3 – шатун; 4 – повзунк; 5 – платформа сепаратора); б) – схема до визначення координат точки падіння частинки сипкого матеріалу на решето (1 – бункер; 2 – плоске решето)

Рисунок 2 – Розрахункові схеми

Джерело: розроблено авторами

Розташуємо нерухому систему координат  $xu$  таким чином, що початок її координат співпадає з початковим положенням (на рис. 2, б – це точка  $B_0$ ) верхнього краю решета в момент, коли кут повороту ексцентрика  $\varphi = 0$ . Нехай, у початковий момент часу  $t_0 = 0$  ексцентрик знаходиться в положенні, що характеризується кутом  $\varphi_0$ . При обертанні ексцентрика зі сталою кутовою швидкістю обертання  $\omega$ , решето за час  $t$  переміститься вздовж осі  $y$  на відстань  $y_n$ , яка визначається за рівнянням (9), в якому  $\varphi = \varphi_0 + \omega t$ . У цей же час частинка сипкого матеріалу, яка зійшла з днища бункера (на рис. 2, б – початкове положення частинки матеріалу позначене  $A_0$ ), здійснює вільне падіння до моменту контакту з решетою (на рис. 2, б – це точка  $A$ ). Вектор швидкості  $V_0$  частинки матеріалу (в момент її сходження з днища бункера) спрямована під кутом  $\gamma$  до горизонталі. Необхідно зазначити, що відстань між верхнім краєм решета та нижнім краєм днища бункера є сталою, оскільки вони розташовані на механізмі сепарування, та

дорівнює  $h$ , причому з конструктивних міркувань  $h > 2r$ . Рівняння, які описують вільне падіння частинки матеріалу в нерухомій системі координат  $xu$ , матимуть вигляд:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = 0; \\ m\ddot{y} = -mg, \end{cases} \quad (12)$$

де  $m$  – маса частинки сипкого матеріалу, кг;

$\ddot{x}$ ,  $\ddot{y}$  – проекції прискорення частинки сипкого матеріалу на осі  $x$  та  $y$ , м/с<sup>2</sup>;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

Двічі інтегруючи рівняння (12) за початкових умов  $t_0 = 0$ ,  $x_0 = 0$ ,  $y_0 = h + y_n(\varphi_0)$ ,  $\dot{x}_0 = V_0 \cos \gamma$ ,  $\dot{y}_0 = -V_0 \sin \gamma$ , отримуємо рівняння для швидкості та переміщення частинки сипкого матеріалу вздовж осей  $x$  та  $y$ :

$$\begin{cases} \dot{x} = V_0 \cos \gamma; \\ \dot{y} = -gt - V_0 \sin \gamma, \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} x = V_0 t \cos \gamma; \\ y = -\frac{gt^2}{2} - V_0 t \sin \gamma + h + r \left( 1 - \cos \varphi_0 + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi_0) \right), \end{cases} \quad (14)$$

де  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$  – проекції швидкості частинки сипкого матеріалу на осі  $x$  та  $y$ , м/с;

$x$ ,  $y$  – переміщення частинки сипкого матеріалу вздовж відповідних осей, м.

Складемо рівняння, яке описує пряму, що проходить вздовж верхньої поверхні решета (в площині рис. 2, б) незалежно від його положення в системі координат  $xu$ :

$$y = -xtg\alpha + r \left( 1 - \cos(\varphi_0 + \omega t) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos(2(\varphi_0 + \omega t))) \right), \quad (15)$$

де  $x$ ,  $y$  – координати прямої по осях  $x$  та  $y$ , м;

$\varphi_0$  – початковий кут повороту ексцентрика (за якого частинка матеріалу розпочинає вільне падіння) у момент часу  $t = 0$ , град.

Визначимо координати точки падіння частинки сипкого матеріалу на решето в системі координат  $xu$ . Для цього складемо систему з рівнянь (14) та (15):

$$\begin{cases} x = V_0 t \cos \gamma; \\ y = -\frac{gt^2}{2} - V_0 t \sin \gamma + h + r \left( 1 - \cos \varphi_0 + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi_0) \right); \\ y = -xtg\alpha + r \left( 1 - \cos(\varphi_0 + \omega t) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos(2(\varphi_0 + \omega t))) \right). \end{cases} \quad (16)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (16), можна знайти координати точки перетину траєкторії польоту частинки сипкого матеріалу та прямої, яка описує положення верхньої поверхні решета в момент часу  $t$ . Тобто знайти координати точки  $A(x_1, y_1)$  падіння частинки сипкого матеріалу на решето та тривалість падіння  $t$ . За допомогою координат точки  $A(x_1, y_1)$  та визначеної за рівнянням (15) координати  $y_2$  точки  $B(x_2, y_2)$ , що характеризує положення верхнього кінця решета в момент часу  $t$  (тобто точки перетину прямої, що описує положення верхньої поверхні решета в момент часу  $t$ , з віссю координат  $y$  ( $x_2 = 0$ )). Із урахуванням зазначеного, частинка матеріалу впаде на решето на відстані від його верхнього краю (відстань вимірюється вздовж решета):

$$s = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \quad (17)$$

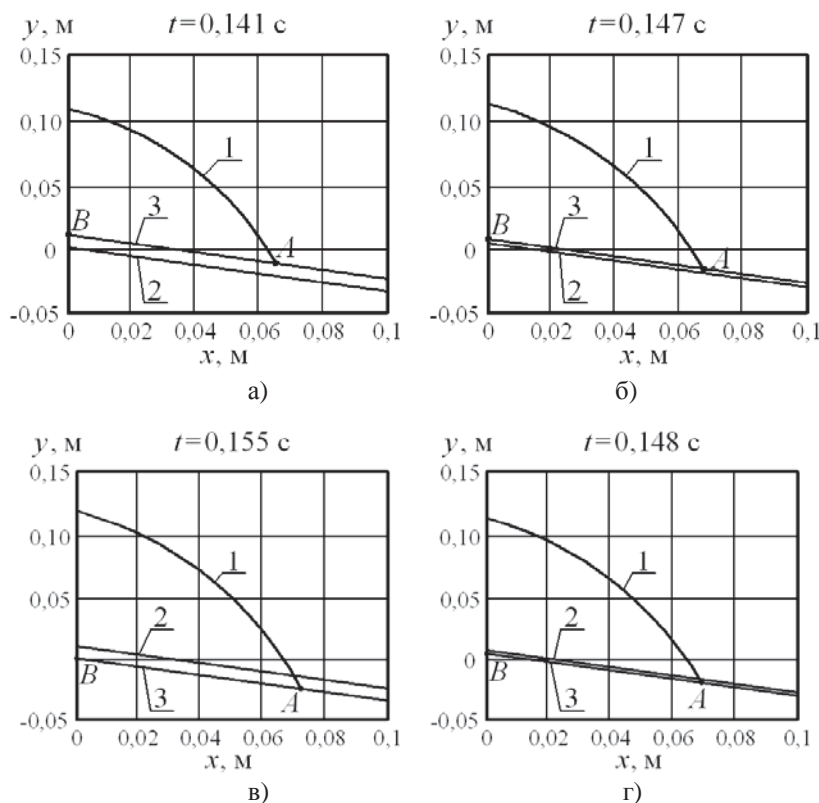
де  $s$  – відстань вздовж решета від його верхнього краю до місця падіння частинки сипкого матеріалу на його поверхню, м.

Аналітичний розв'язок рівнянь (16) ускладнений, тому використовуючи систему комп'ютерної математики MathCAD 14 були знайдені розв'язки рівнянь для різних значень кутової швидкості ексцентрика, що представлені в таблиці. Як приклад, за рівняннями (16) побудовані траєкторії падіння частинки матеріалу на решето з бункера при  $r = 0,005$  м,  $l = 0,1$  м,  $\lambda = 0,015$ ,  $\alpha = 18$  град.,  $\gamma = 20$  град.,  $h = 0,11$  м,  $V_0 = 0,5$  м та  $\omega = 20$  рад./с, а також за різних значень початкового кута повороту ексцентрика  $\varphi_0$ , тобто з якого розпочинається падіння частинки матеріалу (рис. 3). Аналіз даних, які представлені в таблиці, показує, що в досліджуваному діапазоні кутових швидкостей обертання ексцентрика, під час сепарування не використовується від 6,9 см до 7,7 см довжини решета. Крім того, на значення координати (по осі  $x$ ) падіння частинки матеріалу на решето суттєвий вплив має початковий кут повороту ексцентрика. Значний розкид координат вздовж осі  $x$  може зумовити формування на решеті шару сипкого матеріалу із різною висотою, що створить несприятливі умови для процесу сепарування.

Таблиця 1 – Результати моделювання подачі сипкого матеріалу на решето з бункера

Параметри, що визначають умови та результати моделювання			
$\omega = 20$ рад./с			
$\varphi_0 = 0$ рад.	$\varphi_0 = \pi/2$ рад.	$\varphi_0 = \pi$ рад.	$\varphi_0 = 3\pi/2$ рад.
$t = 0,141$ с	$t = 0,147$ с	$t = 0,155$ с	$t = 0,148$ с
$\varphi(t) = 2,82$ рад.	$\varphi(t) = 2,94$ рад.	$\varphi(t) = 3,1$ рад.	$\varphi(t) = 2,96$ рад.
$x_1 = 0,066$ м	$x_1 = 0,069$ м	$x_1 = 0,073$ м	$x_1 = 0,07$ м
$y_1 = -0,012$ м	$y_1 = -0,016$ м	$y_1 = -0,024$ м	$y_1 = -0,018$ м
$x_2 = 0$ м	$x_2 = 0$ м	$x_2 = 0$ м	$x_2 = 0$ м
$y_2 = 0,0097$ м	$y_2 = 0,0061$ м	$y_2 = 0,000004$ м	$y_2 = 0,0042$ м
$s = 0,069$ м	$s = 0,072$ м	$s = 0,077$ м	$s = 0,073$ м
$\omega = 40$ рад./с			
$\varphi_0 = 0$ рад.	$\varphi_0 = \pi/2$ рад.	$\varphi_0 = \pi$ рад.	$\varphi_0 = 3\pi/2$ рад.
$t = 0,148$ с	$t = 0,149$ с	$t = 0,148$ с	$t = 0,147$ с
$\varphi(t) = 5,92$ рад.	$\varphi(t) = 5,96$ рад.	$\varphi(t) = 5,92$ рад.	$\varphi(t) = 5,88$ рад.
$x_1 = 0,069$ м	$x_1 = 0,07$ м	$x_1 = 0,07$ м	$x_1 = 0,069$ м
$y_1 = -0,022$ м	$y_1 = -0,019$ м	$y_1 = -0,013$ м	$y_1 = -0,015$ м
$x_2 = 0$ м	$x_2 = 0$ м	$x_2 = 0$ м	$x_2 = 0$ м
$y_2 = 0,001$ м	$y_2 = 0,0031$ м	$y_2 = 0,0099$ м	$y_2 = 0,0068$ м
$s = 0,073$ м	$s = 0,073$ м	$s = 0,074$ м	$s = 0,072$ м
$\omega = 60$ рад./с			
$\varphi_0 = 0$ рад.	$\varphi_0 = \pi/2$ рад.	$\varphi_0 = \pi$ рад.	$\varphi_0 = 3\pi/2$ рад.
$t = 0,142$ с	$t = 0,146$ с	$t = 0,155$ с	$t = 0,149$ с
$\varphi(t) = 8,52$ рад.	$\varphi(t) = 8,76$ рад.	$\varphi(t) = 9,3$ рад.	$\varphi(t) = 8,94$ рад.
$x_1 = 0,067$ м	$x_1 = 0,068$ м	$x_1 = 0,073$ м	$x_1 = 0,07$ м
$y_1 = -0,013$ м	$y_1 = -0,014$ м	$y_1 = -0,024$ м	$y_1 = -0,02$ м
$x_2 = 0$ м	$x_2 = 0$ м	$x_2 = 0$ м	$x_2 = 0$ м
$y_2 = 0,0079$ м	$y_2 = 0,0079$ м	$y_2 = 0,00004$ м	$y_2 = 0,0025$ м
$s = 0,07$ м	$s = 0,071$ м	$s = 0,077$ м	$s = 0,074$ м

Джерело: розроблено авторами



а) –  $\varphi_0 = 0$  рад.; б) –  $\varphi_0 = \pi/2$  рад.; в) –  $\varphi_0 = \pi$  рад.; г) –  $\varphi_0 = 3\pi/2$  рад.

1 – траєкторія падіння частинки матеріалу; 2 – пряма, що визначає початкове положення решета;  
3 – пряма, що визначає положення решета в момент падіння на нього частинки матеріалу

Рисунок 3 – Траєкторія падіння частинки сипкого матеріалу А на решето з бункера

Джерело: розроблено авторами

Із досліджених варіантів найменший розкид координат  $x_1$  спостерігається для випадку з  $\omega = 40$  рад./с, де  $x_1$  змінюється в межах від 0,069 м до 0,07 м. Тобто частинки матеріалу, не залежно від початкового положення ексцентрика, падають на решето поряд і в цьому випадку шар сипкого матеріалу має однакову висоту на плоскому решеті сепаратора.

Необхідно зауважити, що чим менше значення відстані  $s$ , тим ефективніше використовується решето, оскільки частина решета (довжиною  $s$ ) не використовується для процесу сепарування. Таким чином, у запропонований вище спосіб можна обґрунтувати розташування бункера над решетом, беручи до уваги низку конструктивних та кінематичних параметрів сепаратора.

**Висновки.** У статті запропонована конструкція сепаратора сипких матеріалів ножичного типу. Крім того, отримана математична модель процесу подачі сипкого матеріалу на решето з бункера, що дозволяє визначити раціональні параметри сепаратора ножичного типу із урахуванням кінематичного режиму його роботи. За цих параметрів буде сформовано шар матеріалу на решеті однакової висоти, що забезпечить сприятливі умови для процесу сепарування. Математична модель також дозволяє визначити раціональні параметри взаємного розташування бункера та решета для того, щоб уся поверхня решета ефективного використовувалася.



## Список літератури

1. Giyevskiy A.M., Orobinsky V.I., Tarasenko A.P., Chernyshov A.V., Kurilov, D.O. Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018. Vol. 327. P. 042035.
2. Kugbei S., Avungana M., Hugo W. Seeds Toolkit. Module 2: Seed processing: principles, equipment and practice. The FAO of the UN and AfricaSeeds: Rome, 2018.
3. Vasylykovskiy O., Vasylykovska K., Moroz S., Sviren M., Storozhyk L. The influence of basic parameters of separating conveyor operation on grain cleaning quality. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 57(1). P. 63–70.
4. Basiry M., Esehaghbeygi A. Cleaning and charging of seeds with an electrostatic separator. *Applied Engineering in Agriculture*. 2012. Vol. 28(1). P. 143–147. DOI: 10.13031/2013.41274
5. Bracacescu C., Gageanu I., Popescu S., Selvi K.C. Researches concerning impurities separation process from mass of cereal seeds using vibrating sieves in air flow currents. *Engineering for Rural Development*. Jelgava, 2016. P. 364–370.
6. Magalhaes F.G.R., Atman A.P.F., Moreira J.G., Herrmann H.J. Analysis of the velocity field of granular hopper flow. *Granular Matter*. 2016. Vol. 18(33). DOI: 10.1007/s10035-016-0636-y
7. Balevicius R., Kacianauskas R., Mroz Z., Sielamowicz I. Analysis and DEM simulation of granular material flow patterns in hopper models of different shapes. *Advanced Powder Technology*. 2011. Vol. 22. P. 226–235. DOI: 10.1016/j.apt.2010.12.005
8. Савенков Д.Н. Повышение равномерности выгрузки зерновых материалов из бункеров с боковым выпускным отверстием : дисс. ... канд. техн. наук : ФГБОУВПО “Донской государственный технический университет”. Ростов-на-Дону, 2015. 186 с.
9. Зенков Р.Л., Гриневич Г.П., Исаев В.С. Бункерные устройства. М. : Машиностроение, 1977. 224 с.
10. Богомягих В.А., Несмиян А.Ю. Функционирование бункеров максимального расхода в условиях сводообразующего истечения зерновых материалов : монография. Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВПО ДГАУ, Зерноград, 2015. 179 с.
11. Гутров М.А. Уравнение движения кривошипно-ползунного привода режущего аппарата жаток с учетом кинематики шатуна. *Достижение науки и техники АПК*. 2010. Вып. 2. С. 66–69.
12. Гоц А.Н. Кинематика и динамика кривошипно-шатунного механизма поршневых двигателей: учеб. пособие. Владимирский гос. ун-т. Владимир : Редакционно-издательский комплекс ВлГУ, 2005. 124 с.

## References

1. Giyevskiy, A.M., Orobinsky, V.I., Tarasenko, A.P., Chernyshov, A.V., & Kurilov D.O. (2018). Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 327, 042035. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042035>
2. Kugbei, S., Avungana, M., & Hugo, W. (2018). Seeds Toolkit. Module 2: Seed processing: principles, equipment and practice. *The FAO of the UN and AfricaSeeds*. Rome.
3. Vasylykovskiy, O., Vasylykovska, K., Moroz, S., Sviren, M., & Storozhyk, L. (2019). The influence of basic parameters of separating conveyor operation on grain cleaning quality. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 57(1), 63–70.
4. Basiry, M., & Esehaghbeygi, A. (2012). Cleaning and charging of seeds with an electrostatic separator. *Applied Engineering in Agriculture*, 28(1), 143–147. <https://doi.org/10.13031/2013.41274>
5. Bracacescu C., Gageanu I., Popescu S., & Selvi K.C. (2016). Researches concerning impurities separation process from mass of cereal seeds using vibrating sieves in air flow currents. *Engineering for Rural Development*. Jelgava, 364–370.
6. Magalhaes, F.G.R., Atman, A.P.F., Moreira, J.G., & Herrmann, H.J. (2016). Analysis of the velocity field of granular hopper flow. *Granular Matter*, 18(33). <https://doi.org/10.1007/s10035-016-0636-y>
7. Balevicius, R., Kacianauskas, R., Mroz, Z., & Sielamowicz, I. (2011). Analysis and DEM simulation of granular material flow patterns in hopper models of different shapes. *Advanced Powder Technology*, 22, 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2010.12.005>
8. Savenkov, D.N. (2015). *Povyshenie ravnomernosti vygruzki zernovykh materialov iz bunkerov s bokovym vypusknyim otverstiem [Improving the uniformity of unloading grain materials from hoppers with a side outlet]*. FGBOUVPO “Donskoj gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet”, Rostov-na-Donu [in Russian].

9. Zenkov, R.L., Grinevich, G.P., & Isaev, V.S. (1977). *Bunkernye ustrojstva [Hopper devices]*. Mashinostroenie, Moskva [in Russian].
10. Bogomyagkih, V.A., & Nesmiyan, A.Yu. (2015). *Funkcionirovanie bunkerov maksimal'nogo raskhoda v usloviyah svodoobrazuyushchego istecheniya zernovykh materialov [Functioning of maximum flow hoppers under conditions of arch-forming outflow of grain materials: monograph]*. Azovo-CHernomorskij inzhenernyj institut FGBOU VPO DGAU v g. Zernograde, Zernograd [in Russian].
11. Gutrov, M.A. (2010). *Uravnenie dvizheniya krivoshipno-polzunnogo privoda rezhushchego apparata zhatok s uchetom kinematiki shatuna [The equation of motion of the crank-slider drive of the cutterbar of the headers taking into account the kinematics of the connecting rod]*. Dostizhenie nauki i tekhniki APK, 2, 66-69 [in Russian].
12. Gocz, A.N. (2005). *Kinematika i dinamika krivoshipno-shatunnogo mekhanizma porshnevykh dvigatelej [Kinematics and dynamics of the crank mechanism of piston engines]*. Vladimirskij gos. un-t. Vladimir: Redakcionno-izdatel'skij kompleks VIGU [in Russian].

**Igor Dudarev**, Prof., DSc., **Vasyl Olkhovskiy**, post-graduate

*Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine*

### **Modeling of Bulk Material Loading Into Sieve of the Scissor-type Separator**

In agriculture and feed production, seeds and grains of various crops that require cleaning and separation are used as sowing material and raw materials. For seed and grain cleaning and separation the separators of different type are used. During operation, these separators take into account the physical and mechanical properties of the raw material. The article proposes the design of bulk material separator of scissor type, which has small dimensions and is easy to maintain. The efficiency of separator depends on the uniformity of the bulk material loading on the sieve surface. Therefore, substantiation of rational parameters of separator is an extremely important task.

So, the aim of the study is to model the loading process of bulk material from the unloading hole of the hopper on an inclined flat sieve of the scissor-type separator, which performs oscillating motion.

The proposed mathematical model of the bulk material loading from the hopper to the separator sieve allows us to determine the trajectory of the particle falling and to describe the position of the sieve, which changes due to the rotation of the eccentric. Also, modeling allows us to justify the rational parameters of the separator, taking into account the kinematic mode of its operation. Under these parameters, a layer of material of the same height will be formed on the sieve, which will provide favorable conditions for the separation process. In addition, the mathematical model allows us to determine the rational parameters of the relative position of the hopper and the sieve. In this case the entire surface of the sieve is used effectively.

**bulk material separator, bulk material loading, sieve parameters, modeling of separator loading, sieve efficiency**

*Одержано (Received) 25.11.2020*

*Прорецензовано (Reviewed) 05.11.2020*

*Прийнято до друку (Approved) 21.12.2020*