




original article | UDC 631.361:631.53.01 | doi: 10.31210/visnyk2020.01.31

KINEMATICS OF GRAIN MOVEMENT ON A SPIRAL DEVICE WITH VARIABLE ANGLE OF DESCENT


T. V. Samoilenko

ORCID  [0000-0003-4756-6223](https://orcid.org/0000-0003-4756-6223)

V. M. Arendarenko

ORCID  [0000-0003-0701-7983](https://orcid.org/0000-0003-0701-7983)

*A. V. Antonets**

ORCID  [0000-0002-2332-6711](https://orcid.org/0000-0002-2332-6711)

Poltava State Agrarian Academy, 1/3, Skovorody str., Poltava, 36003, Ukraine

*Corresponding author

E-mail: anatoliyantone1@gmail.com

Cylindrical tanks, called siloes, are used to store grain material. The height of such structures is limited by soil bearing capacity and does not exceed 30 ... 60 m. The loading of siloes with grain is usually conducted by gravitation method in a compact flow. In this case, the stability of functioning cylindrical tank capacities depends on certain internal and external factors. The internal factors include physical, mechanical and biological properties of grain material, and the external ones include environmental conditions and structural parameters of silo itself. The loading of siloes with a compact flow results in grain hitting concrete bottom and inner side surface of the structure and damaging. Under such loading, intensive settlement of damaged grain at the bottom of the silo is observed. This negative phenomenon leads to grain spoilage or death. To eliminate this drawback, various devices are used to reduce the speed of falling grain material to the bottom of silo. The purpose of this article is theoretical studies of grain material movement along the peripheral open screw channel (POSC) U – of the like shape. The descent angle (α) of screw channel constantly changes from the maximum value (α_{max}) to the minimum one (α_{min}). The angle α within 30 ... 40 degrees in the area of grain mass acceleration is accepted. In the lower part of the POSC, the angle α decreases and is 10...20 % smaller than α_{max} . This enables to stabilize the linear speed of grain movement. Practical experience has made it possible to draw up a scheme of forces affecting grain material, which, under the action of gravitational force, descends on a screw chute. The presented scheme of forces enables to consider the main and auxiliary factors, which influence this technological process. The equation, obtained using mathematical modeling, describes the speed of grain material movement along the POSC with a variable descent angle. The movement of grain material takes place at almost constant linear speed at the bottom of the device. When deriving the equation to determine the speed of grain movement on a spiral device with a variable angle of descent, there was a need in developing a stand to study the technological process of filling siloes with grain without its damaging

Key words: grain, silo, screw channel, angle of descent, equation of movement.

КІНЕМАТИКА РУХУ ЗЕРНА ПО СПІРАЛЬНОМУ ПРИСТРОЮ ЗІ ЗМІННИМ КУТОМ СПУСКУ

T. V. Самойленко, В. М. Арендаренко, А. В. Антонєць,

Полтавська державна аграрна академія, м. Полтава, Україна

Для зберігання зернового матеріалу використовуються циліндричні ємності, котрі називаються силосами. Висота цих споруд обмежується несучою здатністю ґрунтів і не перевищує 30...60 м. Завантаження силосів зерном, як правило, відбувається гравітаційним способом компактним струме-

нем. При цьому стабільність функціонування ємностей циліндричної форми залежить від певних внутрішніх і зовнішніх факторів. До внутрішніх факторів відносяться фізико-механічні й біологічні властивості зернового матеріалу, а до зовнішніх – умови навколишнього середовища і конструктивно-технологічні параметри самого силосу. Завантаження силосів компактним струменем призводить до того, що зерно вдаряється об бетонне дно і внутрішню бокову поверхню споруди та травмується. При такому завантаженні відбувається інтенсивне осідання травмованого зерна в нижній частині силосу. Це негативне явище призводить до псування зерна або його гибелі. Для усунення цього недоліку використовуються різні пристрої, за допомогою яких зменшують швидкість падіння зернового матеріалу на дно силосу. Метою цієї роботи є теоретичні дослідження руху зернового матеріалу по периферійному відкритому гвинтовому каналі (ПВГК) U – схожій форми. При цьому кут спуску (α) гвинтового каналу постійно змінюється від максимального значення (α_{max}) до мінімального (α_{min}). На ділянці розгону зернової маси кут α приймається в межах $30...40^\circ$. У нижній частині ПВГК кут α зменшується і приймається на $10...20\%$ меншим від α_{max} . Це дає змогу стабілізувати лінійну швидкість руху зерна. Практичний досвід дозволив скласти схему сил, які діють на зерновий матеріал, що під дією гравітаційної сили спускається по гвинтовому жолобу. Ця схема сил дає змогу врахувати основні й допоміжні фактори, які впливають на цей технологічний процес. Рівняння, отримане на основі математичного моделювання, описує швидкість руху зернового матеріалу по ПВГК зі змінним кутом спуску. В нижній частині пристрою рух зернового матеріалу відбувається практично з постійною лінійною швидкістю. При складанні рівняння для визначення швидкості руху зерна по спіральному пристрою зі змінним кутом спуску виникла необхідність у розробці стенда для вивчення технологічного процесу заповнення силосів зерном без його травмування.

Ключові слова: зерно, силос, гвинтовий канал, кут спуску, рівняння руху.

КИНЕМАТИКА ДВИЖЕНИЯ ЗЕРНА ПО СПИРАЛЬНОМУ УСТРОЙСТВУ С ИЗМЕНЯЕМЫМ УГЛОМ СПУСКА

Т. В. Самойленко, В. М. Арендаренко, А. В. Антонец,

Полтавская государственная аграрная академия, ул. Г. Сковороды, 1/3, г. Полтава, 36003, Украина

Для хранения зернового материала используются цилиндрические емкости. Загрузка силосов зерном, как правило, происходит гравитационным способом компактной струей. Зерно, ударяясь о внутреннюю поверхность сооружения, травмируется, что приводит к его порче. Для устранения этого недостатка используются различные устройства, с помощью которых уменьшают скорость падения зернового материала на дно силоса. Целью работы является теоретическое исследование движения зернового материала по периферийному открытому винтовому каналу (ПОВК) U -похожей формы. Составлена схема сил, действующих на зерновой материал, что под действием гравитационной силы спускается по винтовому желобу. Данная схема позволяет учесть основные и вспомогательные факторы, которые влияют на этот технологический процесс. Полученное уравнение описывает скорость движения зернового материала по ПОВК с переменным углом спуска. При составлении уравнения возникла необходимость в разработке стенда для изучения технологического процесса заполнения силосов зерном без его травмирования.

Ключевые слова: зерно, силос, винтовой канал, угол спуска, уравнение движения.

Вступ

Зерно – це жива біологічна система, в якій відбуваються різні фізіолого-біохімічні процеси, інтенсивність яких залежить від умов завантаження і зберігання зерна у сховищах [1–3, 6, 7, 21]. Професор Л. О. Трисвятський [13] встановив, що після нетривалого зберігання на ушкодженому зерні кількість бактерій в 3,5 рази більше, ніж у цілих.

Завантаження зерном високих ємностей (силосів) нині відбувається за рахунок потенціальної енергії зернового матеріалу. Падаючи зі значної висоти, зерно багаторазово вдаряється об бетонну основу споруди та його внутрішні бокові поверхні. Таке гравітаційне завантаження силосів зерновим матеріалом призводить до того, що в нижній частині ємностей накопичується зерно, котре має механічні пошкодження.

Травмоване зерно має знижену стійкість при його зберіганні [11]. Порушення цілісності зерна

призводить до різкого збільшення інтенсивності дихання, внаслідок більш вільного доступу повітря до клітин і розвитку мікроорганізмів на пошкоджених частинах зерна. При довготривалому зберіганні травмованого зерна внаслідок інтенсивного дихання виділяється велика кількість тепла, яке може спричинити самозігрівання зернової маси в нижній частині силосу, що призведе до псування зерна або його гибелі. Самозігрівання зерна в силосах може його обвуглити, спричинити повну втрату силучості зернової маси, яка інколи перетворюється на моноліт [7].

Гравітаційне завантаження силосів зерновим матеріалом призводить до більшого ущільнення зернового насипу та утворенню сегрегації [8, 19]. Ці явища негативно впливають на випускню здатність силоса і наслідком цього може бути зменшення економічної ефективності технологічного процесу завантаження та зберігання зерна [15, 17, 18].

Учені довели, що для зерна кожної культури і кожного сорту є своя мінімальна швидкість руху [5, 10, 12, 14], за якої починається його травмування. Отже, кількість механічних пошкоджень зерна, яке завантажувється гравітаційним способом у циліндричні ємності, залежить від швидкості його падіння, а сама швидкість залежить від висоти падіння.

Метою цієї роботи є теоретичне дослідження руху зернового матеріалу по пристрою, зробленому як гвинтовий відкритий канал, який має можливість змінювати кути спуску. *Основні завдання:* зменшення пошкодження зерна при його завантаженні в ємності значної висоти, зменшення втрат врожаю, котрий перебуває на зберіганні та збереженні насінневого матеріалу.

Матеріали і методи досліджень

На кафедрі технологій та обладнання переробних і харчових виробництв Полтавської державної аграрної академії був розроблений завантажувальний пристрій зі змінним кутом спуску для зменшення травмування зерна (рис. 1). Спіральний завантажувальний пристрій кріпиться на внутрішній частині силосу і має можливість регулювати кути спуску зерна. Пристрій є периферійним відкритим гвинтовим каналом (ПВГК). Силос складається з ємності 1, яка має циліндричну форму, у верхній частині силосу знаходиться завантажувальний патрубок 2.

Завантажувальний патрубок 2 спрямовує зерновий потік від верхньої частини ємності 1 до внутрішнього простору каналу 3. Тіло гвинтового каналу 3 утворено провертанням U-подібного профілю за гвинтовою лінією зі змінним кутом, який зменшується послідовно від найбільшого значення α_{max} (вибирається дещо більшим від динамічного кута тертя зернової культури, яка зберігається в силосі), і береться в межах 30...40 градусів. У нижній частині ПВГК кут α зменшується і береться на 10...20 % меншим від α_{max} .

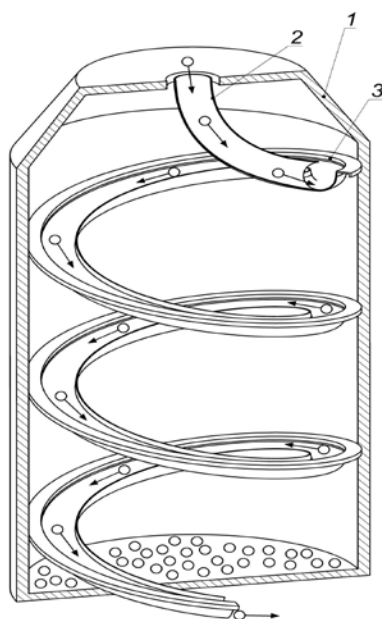


Рис. 1. Силос зі спіральним завантажувачем

Позначення: 1-циліндрична ємність; 2 – завантажувальний патрубок;
3 – периферійний відкритий гвинтовий канал

Силос функціонує таким чином. Зерно із завантажувального патрубку 2 самопливом переміщається до входу гвинтового каналу 2, у верхній частині якого під дією гравітації зерновий потік отримує суттєвий приріст своєї швидкості, зважаючи на значний кут спуску. Збільшення швидкості у верхній частині силосу обумовлено потребою забезпечити утворення зернових застоїв та забезпечити пересипання зерна через краї зернового каналу 3 з подальшим неконтрольованим падінням у нижню частину ємності 1 з високою ймовірністю отримання механічних деформацій.

На початку свого руху по гвинтовій поверхні зерновий потік має певну потенційну енергію, котра під дією гравітаційної сили перетворюється на кінетичну енергію, а невелика її частина внаслідок тертя [20] витрачається на нагрів робочої поверхні гвинтового каналу. В подальшому теплова енергія розсіюється в середині силосу. Більша частина кінетичної енергії рухомого зернового потоку іде на завантаження силосу зерном.

Для нормального руху зернового потоку по жолобу гвинтової поверхні кут α у верхній частині ПВГК повинен бути більшим від кута природного відкосу ξ [22]. Така умова забезпечує утворення сталого зернового потоку. Пройшовши першу ділянку гвинтового каналу з кроком h_1 , швидкість зернового потоку зменшується, зважаючи на зменшення кута α . По досягненні кінцевої ділянки спуску зерновий потік плавно висипається в нижню частину ємності, заповнюючи рівномірно увесь її об'єм. При цьому швидкість сходу зерна з каналу 3 повною мірою зменшена, зважаючи на зменшення кута спуску від α_{max} до α_{min} . Плавне зменшення кута спуску запобігає виникненню критичних значень ударних сил зерна об стінки та днище ємності 1, що своєю чергою зменшує вірогідність механічного травмування зерна. По мірі заповнення ємності силосу 1 зерном засипається і гвинтовий канал 3.

Використання в циліндричних ємностях для зберігання зерна гвинтового каналу сприяє створенню протягом усього руху зернового потоку необхідного для виконання технологічного процесу градієнта швидкості. Створений цим пристроєм градієнт швидкості забезпечує безперешкодний та швидкий рух зернового потоку у верхній частині гвинтового каналу та сповільнення його в нижніх частинах пристрою. Така конструкція робочого органу мінімізує деформаційні руйнування зерна та значно зменшує рівень його травмування. На пристрій, що наведений на рис. 2, отриманий патент на корисну модель [9]. Він кріпиться на внутрішній стороні силосу і має можливість регулювати кути спуску зерна.

Для опису процесу руху зернового потоку по відкритому гвинтовому каналу, враховуючи взаємодію зерна з матеріалом, з якого виготовлений жолоб гвинтового каналу, ми використали такі припущення:

- рух зерна у гвинтовому жолобі відбувається суцільним потоком;
- відцентрові сили, котрі можуть виникати, не дуже впливають на характер руху і не враховуються в математичній моделі руху;
- між опорною поверхнею, по якій рухається маса зерна і по ній самій виникає сила тертя ковзання, яка визначається коефіцієнтом тертя для даного матеріалу і жолоба;
- при русі зернового матеріалу по гвинтовому жолобу не відбувається накопичення зернових мас у пристрої, у протилежному випадку відбувається втрата інерції руху.

Результати досліджень та їх обговорення

Використавши другий закон Ньютона [4, 16] для виділеного елементарного об'єму зернової маси складемо рівняння його руху уздовж профілю гвинтового каналу.

Розглянемо у плоскій системі координат дві точки з координатами А (x_0, y_0) і В (x_k, y_k). Необхідно визначити профіль гвинтового каналу зі змінним кутом спуску, по якому зернова маса буде спускатися від точки А до точки В. На початку процесу завантаження (точка А) зерновий матеріал знаходиться над ємністю, в результаті завантаження він опиняється в ємності в тому чи тому горизонтальному шарі, розміщеному нижче початкового положення (рис. 2).

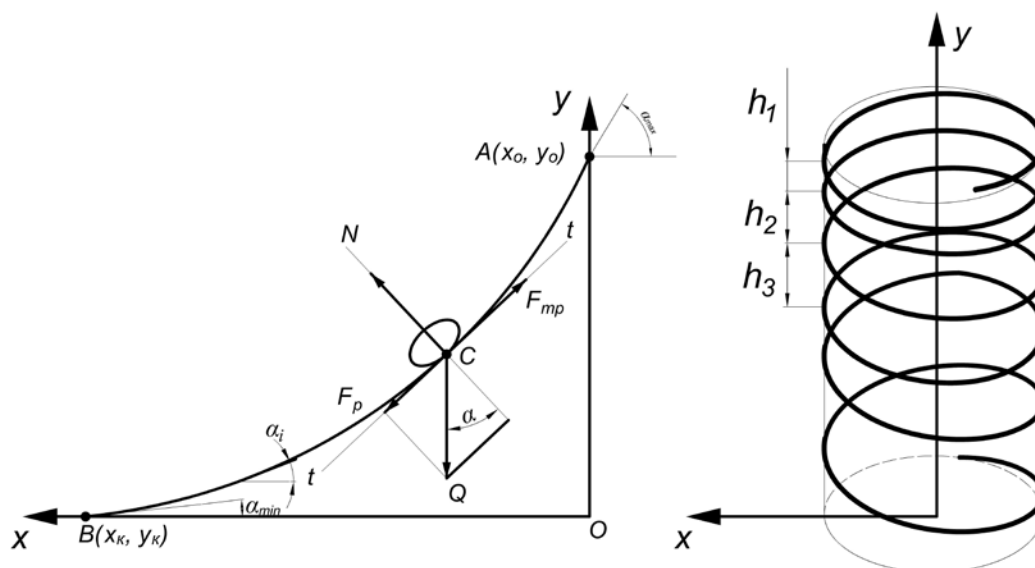


Рис. 2. Схема сил, що діють на елемент зернової маси під час руху по гвинтовій поверхні

Нехай зерновий матеріал, рухаючись по ПВГК, доходить до точки С. У цій точці на зернову масу діють три сили: вага виділеного елемента зернової маси Q , нормальна реакція гвинтового каналу N і сила тертя F_T [20].

Закон руху елемента зернової маси в напрямку дотичної, яка позначена на рис. 2, як вісь $t-t$ має вид:

$$m \frac{d^2 l}{dt^2} = Q \cdot \sin \alpha(l) - Q \cdot f_T \cdot \cos \alpha(l), \quad (1)$$

або

$$\frac{d^2 l}{dt^2} = g \cdot \sin \alpha(l) - g \cdot f_T \cdot \cos \alpha(l)$$

Прийнявши, що $\alpha(l)$ змінюється за законом $\alpha(l) = -a \cdot l + \alpha_{\max}$, де a – постійний коефіцієнт, α_{\max} – найменший кут спуску.

$$\frac{d^2 l}{dt^2} = g \cdot \sin(-a \cdot l + \alpha_{\max}) - g \cdot f_T \cdot \cos(-a \cdot l + \alpha_{\max})$$

Рознесемо диференціали по різні сторони рівняння та проінтегруємо:

$$\frac{d^2 l}{g \cdot \sin(-a \cdot l + \alpha_{\max}) - g \cdot f_T \cdot \cos(-a \cdot l + \alpha_{\max})} = dt^2 \quad (2)$$

або

$$\left(\int \frac{dl}{g \cdot \sin(-a \cdot l + \alpha_{\max}) - g \cdot f_T \cdot \cos(-a \cdot l + \alpha_{\max})} \right) dl = \left(\int dt \right) dt.$$

Введемо наступну заміну: $x = -a \cdot l + \alpha_{\max}$; $dx = -a \cdot dl$, тоді

$$\left(-\frac{1}{ag} \int \frac{dx}{\sin x - f_T \cos x} \right) dl = (t + C) dt. \quad (3)$$

Розглянемо лівий інтеграл. Введемо універсальну тригонометричну підстановку:

$$\left[\begin{array}{l} \operatorname{tg} \frac{x}{2} = t \\ \sin x = \frac{2t}{1+t^2} \\ \cos x = \frac{1-t^2}{1+t^2} \\ dx = \frac{2dt}{1+t^2} \end{array} \right] = -\frac{1}{a \cdot g} \int \frac{\frac{2}{1+t^2} dt}{\frac{2t}{1+t^2} - f_T \cdot \frac{1-t^2}{1+t^2}} = -\frac{1}{a \cdot g} \int \frac{2t}{2t - f_T + f_T \cdot t^2} = -\frac{2}{a \cdot f_T \cdot g} \int \frac{dt}{t^2 + \frac{2}{f_T} \cdot t - 1} =$$

$$= \frac{-2}{af_T g} \int \frac{dt}{\left(t^2 + \frac{2t}{f_T} + \frac{1}{f_T^2}\right) - \frac{1}{f_T^2} - 1} = -\frac{2}{af_T g} \int \frac{dt}{\left(t + \frac{1}{f_T}\right)^2 - \left(1 + \frac{1}{f_T^2}\right)}.$$

Використаємо табличний інтеграл:

$$\int \frac{dx}{x^2 - z^2} = \frac{1}{2z} \ln \left| \frac{x-z}{x+z} \right| + C, \text{ де } z = \frac{\sqrt{f_T^2 + 1}}{f_T}.$$

Ліва частина інтегралу набуде такого виду:

$$-\frac{2}{2af_T g \frac{\sqrt{f_T^2 + 1}}{f_T}} \ln \left| \frac{t + \frac{1}{f_T} - \frac{\sqrt{f_T^2 + 1}}{f_T}}{t + \frac{1}{f_T} + \frac{\sqrt{f_T^2 + 1}}{f_T}} \right| + C = \frac{-1}{ag\sqrt{f_T^2 + 1}} \ln \left| \frac{f_T t - \sqrt{f_T^2 + 1} + 1}{f_T t + \sqrt{f_T^2 + 1} + 1} \right| + C =$$

$$= -\frac{1}{ag\sqrt{f_T^2 + 1}} \ln \left| \frac{f_T \operatorname{tg} \frac{x}{2} - \sqrt{f_T^2 + 1} + 1}{f_T \operatorname{tg} \frac{x}{2} + \sqrt{f_T^2 + 1} + 1} \right| + C. \quad (4)$$

При $x = -al + \alpha_{\max}$ маємо:

$$-\frac{1}{ag\sqrt{f_T^2 + 1}} \ln \left| \frac{f_T \operatorname{tg} \left(\frac{-al + \alpha_{\max}}{2} \right) - \sqrt{f_T^2 + 1} + 1}{f_T \operatorname{tg} \left(\frac{-al - \alpha_{\max}}{2} \right) + \sqrt{f_T^2 + 1} + 1} \right| + C.$$

Тоді, повернувшись до формули 3, отримаємо:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{t + C}{-\frac{1}{ag\sqrt{f_T^2 + 1}} \ln \left| \frac{f_T \operatorname{tg} \left(\frac{-al + \alpha_{\max}}{2} \right) - \sqrt{f_T^2 + 1} + 1}{f_T \operatorname{tg} \left(\frac{-al + \alpha_{\max}}{2} \right) + \sqrt{f_T^2 + 1} + 1} \right|}$$

або

$$\frac{dl}{dt} = \frac{ag\sqrt{f_T^2 + 1} (t + C)}{\ln \left| \frac{f_T \operatorname{tg} \left(\frac{-al + \alpha_{\max}}{2} \right) + \sqrt{f_T^2 + 1} + 1}{f_T \operatorname{tg} \left(\frac{-al + \alpha_{\max}}{2} \right) - \sqrt{f_T^2 + 1} + 1} \right|}. \quad (5)$$

Спростивши вираз (5) отримаємо кінцеве значення миттєвої швидкості руху зернового потоку в

даний момент часу по відкритому гвинтовому каналу.

$$V = \frac{dl}{dt} = \frac{ag\sqrt{f_T^2 + 1} (t + C)}{\ln \left| 1 + \frac{2\sqrt{f_T^2 + 1}}{f_T tg \frac{\alpha}{2} + 1 - \sqrt{f_T^2 + 1}} \right|}$$

де C – довільна стала величина, яка визначається з умов: $t = 0; V = V_0$.

Висновки

З отриманого виразу маємо, що зі зменшенням кута α в ПВГК швидкість руху зернового потоку також зменшується і стабілізується. Це відбувається завдяки тому, що підштовхуюча сила верхніх шарів зернової маси зменшується і в нижній частині переходить зі змінної величини на більш постійну. В нижній частині пристрою рух зернового матеріалу відбувається практично з постійною лінійною швидкістю. Внаслідок чого зерно менше травмується, падаючи на дно силосу.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження будуть направлені на обґрунтування необхідного темпу розгону зернової маси у верхній частині гвинтового каналу та зменшення швидкості руху зерна в нижній частині цього пристрою. Така задача розв'язуватиметься шляхом оптимізації за умови компромісу між швидкістю завантаження й теплою, що виділяється. Доцільно також розробити лабораторну установку з визначення ступеня пошкодження зерна, що падає на дно силосу.

References

1. Benson, D., & Uaytkhed, D. (1990). *Transport i dostavka gruzov*. Moskva: Transport [In Russian].
2. Boumans, G. (1991). *Effektivnaya obrabotka i khraneniye zerna*. Moskva: Agropromizdat [In Russian].
3. Goryushinskiy, I. V., & Mosina, N. N. (2003). *Povysheniye kachestva funktsionirovaniya bunkernykh khranilishch uluchsheniyem ikh zagruzki. Puti povysheniya effektivnosti APK.: V 2-kh chastyakh. Chast' 2. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Ufa: BGAU [In Russian].
4. Khalfman, G. (1972). *Dinamika. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literaturi*. Moskva: Nauka [In Russian].
5. Mosina, N. N. (2003). *Metodika opredeleniya pokazateley protsessa zagruzki bunkera sypuchim materialom. Sovremennyye tekhnologii, sredstva mekhanizatsii i tekhnicheskoye obsluzhivaniye v APK: Sb. nauchn. tr. Povolzhskoy mezhvuzovskoy konferentsii*. Samara: SGSKHA [In Russian].
6. Mosina, N. N. (2004). *Sovershenstvovanie zagruzki hranilish i podvizhnogo sostava sypuchimi gruzami (Na primere zernovykh gruzov i produktov pomola). Candidate's thesis*. Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet. Sankt-Peterburg, Pushkin [In Russian].
7. Punkov, S. P., & Starodubtsev, A. I. (1990). *Khraneniye zerna, elevatorno-skladskoye khranyaystvo i zernosusheniye. 2-ye izd. dop. i pererab.* Moskva: Agropromizdat [In Russian].
8. Samoilenko, T. V., Arendarenko, V. M., & Melnyk, V. I. (2019). *Teoretychne modelyuvannya protsesu hravitatsiynoho zavantazhennya sylosu zernom po vidkrytomu hvyntovomu kanali. Inzheneriya Pryrodokorystuvannya, 2 (12), 73–78* [In Ukrainian].
9. Samoilenko, T. V., Ivanov, O. M., Melnyk, V. I., & Arendarenko, V. M. (2018). *Sylos zi spiralnym zavantazhuvachem: Patent Ukrainy № 129364*, Kyiv: Ukrainskyi instytut intelektualnoi vlasnosti «Ukrpatent» [In Ukrainian].
10. Sevidzh, S. (1985). *Gravitatsionnoye techeniye nesvyazannykh granulirovannykh materialov. Mekhanika granulirovannykh sred: Techeniye bystrykh dvizheniy*. Moskva: Mir [In Russian].
11. Shatokhin, I. V. (1986). *Obosnovanie putey snizheniya travmirovaniya semyan kovshovymi elevatorami. Extended abstract of candidate's thesis*. Voronezh [In Russian].
12. Shatskiy, V. P., Orobinskiy, V. I., & Popov, A. Ye. (2015). *Modelirovaniye dvizheniya zernovogo potoka v gravitatsionnom separatore. Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Universiteta, 4 (47), 72–79* [In Russian].
13. Trisvyatskiy, L. A. (1985). *Khraneniye zerna*. Moskva: Agropromizdat [In Russian].

14. Tverdokhlib, I. V. (2017). Dynamika rukhu chastynky v sypkomu zernovomu seredovyshhi. *Vibracija v Tekhnici ta Tekhnologijakh*, 3 (86), 128–135 [In Ukrainian].
15. Vinokurov, K. V., & Nikonov, S. N. (2008). *Elevatory, sklady, zernosusharki: ucheb. posobie*. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t [In Russian].
16. Yablonskiy, A. A., & Nikiforova, V. M. (2001). *Kurs teoreticheskoy mekhaniki. Uchebnik dlya tekhn. Vuzov, 8-ye izd., stereotipnoye*. Sankt-Peterburg: Lan [In Russian].
17. Moya, M., Aguado, P. J., & Ayuga, F. (2013). Mechanical properties of some granular agricultural materials used in silo design. *International Agrophysics*, 27 (2), 181–193. doi: 10.2478/v10247-012-0084-9.
18. Moya, M., Guaita, M., Aguado, P., & Ayuga, F. (2006). Mechanical properties of granular agricultural materials, part 2. *Transactions of the ASABE*, 49 (2), 479–489. doi: 10.13031/2013.20403.
19. Bishara, A. G., Ayoub, S. F., & Mahdy, A. S. (1983). Static pressures in concrete circular silos storing granular materials. *ACI Journal Proceedings*, 80 (3), 210–216.
20. Gao, M., Cheng, X., Hu, M., & Du, X. (2019). Simulation of static stress distribution of wheat piles in silos by the modified Cam-clay model. *International Agrophysics*, 33 (1), 11–19. doi:10.31545/intagr/103749.
21. Negi, S. C., Lu, Z., & Jofriet, J. C. (1997). A Numerical Model for Flow of Granular Materials in Silos. Part 2: Model Validation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 68 (3), 231–236. doi: 10.1006/jaer.1997.0197.
22. Žurovec, D., Hlosta, J., Nečas, J., & Zegzulka, J. (2019). Monitoring bulk material pressure on bottom of storage using DEM. *Open Engineering*, 9 (1), 623–630. doi: 10.1515/eng-2019-0080.

Стаття надійшла до редакції 21.02.2020 р.

Бібліографічний опис для цитування:

Самойленко Т. В., Арендаренко В. М., Антонець А. В. Кінематика руху зерна по спіральному пристрою зі змінним кутом спуску. *Вісник ПДАА*. 2020. № 1. С. 267–274.

© Самойленко Тетяна Володимирівна, Арендаренко Володимир Миколайович, Антонець Анатолій Вікторович, 2020