




original article | UDC 531.1:633.1:691.88 | doi: 10.31210/visnyk2022.02.33

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE ADEQUACY OF THE ANALYTICAL MODEL OF GRAVITATIONAL GRAIN MOVEMENT IN A SCREW CHANNEL WITH TWO VARIABLE ANGLES


A. Antonets*

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


L. Flegantov

ORCID  [0000-0002-4689-1457](https://orcid.org/0000-0002-4689-1457)


V. Arendarenko

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

O. Ivanov

ORCID  [0000-0002-1761-9913](https://orcid.org/0000-0002-1761-9913)

T. Yaprnyets

ORCID  [0000-0002-5844-3520](https://orcid.org/0000-0002-5844-3520)

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

*Corresponding author

E-mail: anatoliyantons1@gmail.com

How to Cite

Antonets, A., Flegantov, L., Arendarenko, V., Ivanov, O., & Yaprnyets, T. (2022). *Experimental verification of the adequacy of the analytical model of gravitational grain movement in a screw channel with two variable angles. Bulletin of Poltava State Agrarian Academy, (2), 277–286. doi: 10.31210/visnyk2022.02.33*

The problem of injuring the grain during its loading into the silo remains relevant. One of the ways to solve it is to ensure controlled gravitational movement of grain in a spiral with acceleration and braking areas. The analytical model, which is suggested, makes it possible to determine the speed of grain flow at any time, both on the acceleration and the braking part of the screw channel. The model also takes into account the dependency between the angles α and β of the acceleration and braking areas. Based on the theoretical model, a technical description of the peripheral open screw channel (POSC) is proposed. The channel has acceleration and braking areas with discretely variable descent angles. A suitable laboratory sample for experimental research was built on this basis. The first stage of the research defined the nature of the change in the braking area angle β from the change in the acceleration area angle α . The influence of the initial grain height h_0 and the radius r of the channel spiral on these dependencies is shown. In the second stage, the final speed of winter wheat with 14% moisture was investigated by varying the angles of the acceleration and braking areas and holding other parameters constant. The ratio that determines the relationship between the angles was maintained. Five parallel experiments were planned to obtain reliable data in each combination of variables with a significance level of 5%. The statistical analysis included checking the homogeneity of variances of Cochran's experiments, checking the normal distribution of the residual series by the RS criterion, finding the relative error of residues and their statistical estimates and determining the multiple correlation coefficient. The analysis showed the adequacy and acceptable accuracy of the proposed analytical model. The difference between the obtained results does not exceed 10%. The results of the experimental and theoretical studies made it possible to establish relationships between key parameters of POSC, in particular, the recommended angles of $41^\circ \dots 45^\circ$ for acceleration and $39^\circ \dots 35^\circ$ for braking areas, respectively, and a h/r ratio of at least $0.6 \dots 0.7$ are justified.

Key words: model adequacy, grain injury, screw channel.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ АНАЛІТИЧНОЇ МОДЕЛІ ГРАВІТАЦІЙНОГО РУХУ ЗЕРНА У ГВИНТОВОМУ КАНАЛІ З ДВОМА ЗМІННИМИ КУТАМИ НАХИЛУ*А. В. Антоненко, Л. О. Флегантов, В. М. Арендаренко, О. М. Іванов, Т. С. Япринець*

Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна

Проблема травмування зерна під час його завантаження у силос залишається актуальною. Одним зі шляхів її вирішення є забезпечення контрольованого гравітаційного руху зерна по спіралі з розгінною та гальмівною ділянкою. Запропонована аналітична модель дає змогу визначати швидкість руху потоку зерна в будь-який момент часу як по розгінній, так і по гальмівній частині гвинтового каналу. Модель також враховує залежність між кутами α і β нахилу розгінної та гальмівної ділянки. На основі теоретичної моделі запропоновано технічний опис периферійного відкритого гвинтового каналу (ПВГК). Канал має розгінну та гальмівну ділянки із дискретно змінними кутами спуску. На цій основі побудовано відповідний лабораторний зразок для експериментальних досліджень. На першому етапі досліджень визначали характер зміни величини кута β гальмівної ділянки від зміни кута α розгінної ділянки. Показано вплив на ці залежності початкової висоти h_0 падіння зерна та радіуса r спіралі каналу. На другому етапі досліджували кінцеву швидкість озимої пшениці вологістю 14 % при зміні кутів нахилу розгінної та гальмівної ділянок та сталість інших параметрів. Співвідношення, що визначає залежність між кутами зберігалось. Для отримання достовірних даних у кожній комбінації змінних факторів з рівнем значущості 5 %, було заплановано проведення п'яти паралельних експериментів. Проведений статистичний аналіз включав перевірку на однорідність дисперсій дослідів за критерієм Кохрена, перевірку нормального розподілу залишкового ряду за RS критерієм, знаходження відносної похибки залишків та їх статистичних оцінок, визначення коефіцієнта множинної кореляції. Аналіз засвідчив адекватність та прийнятну точність запропонованої аналітичної моделі. Відмінність отриманих результатів не перевищує 10 %. Результати експериментальних та теоретичних досліджень дали змогу встановити взаємозв'язки між ключовими параметрами ПВГК, зокрема обґрунтовано значення рекомендованих кутів $41^\circ \dots 45^\circ$ для розгінної та $39^\circ \dots 35^\circ$ для гальмівної ділянок відповідно, а також відношення h_0/r не менше 0.6...0.7.

Ключові слова: адекватність моделі, травмування зерна, гвинтовий канал

Вступ

Важливою проблемою сучасного сільського господарства України є збільшення валового виробництва високоякісного зерна. Від його кількості і якості залежить продовольча безпека країни і сталий розвиток переробної і харчової промисловості [1].

Під час транспортування зерна до завантажувального отвору силосу і його гравітаційного падіння відбувається зіткнення зернівок зернового вантажу з робочими органами транспортерів, стінками та бетонним дном силосу і зерновим насипом, що утворюється у середині споруди [2–6]. У роботах [7–11] розглядається вплив технічних засобів механізації сільськогосподарського виробництва на ступінь ушкодження насіння різних культур.

Гравітаційне завантаження силосів супроводжується ударом зерна об дно, стіну або зерновий насип. Ударна взаємодія ушкодженого і неушкодженого зерна в середині силосу збільшує кількість травмованого зерна. Травмоване зерно менш стійке до зберігання і має більшу інтенсивність дихання. Швидке гравітаційне завантаження силосів зерном впливає на його деформацію і характер ушкодження по всьому об'єму [9].

Незважаючи на значну кількість наукових досліджень [12–16], присвячених питанням травмування зерна при його обробці, транспортуванні та завантаженні в силос, проблема досі залишається не до кінця вирішеною. Актуальними залишаються питання, пов'язані із розробкою пристрою для обережного завантаження силосів зерном. Для комплексного вирішення задачі обережного завантаження зерна у силоси доцільно розробити та дослідити роботу периферійного відкритого гвинтового каналу зі змінними кутами нахилу розгінної та гальмівної ділянок. Це також потребує розробки та апробації відповідної аналітичної моделі руху зерна по поверхні цього гвинтового каналу.

Метою роботи є експериментальна перевірка адекватності аналітичної моделі гравітаційного руху зерна у відкритому гвинтовому каналі із двома змінними кутами нахилу. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- на основі раніше проведених теоретичних досліджень [4, 5, 17–21] представити технічний опис периферійного відкритого гвинтового каналу із різними кутами нахилу розгінної і гальмівної ділянок;
- отримати результати експериментальних досліджень та порівняти їх з розрахунковими теоретичними даними досліджуваної аналітичної моделі;
- провести статистичний аналіз теоретичних та експериментальних даних, який обґрунтує адекватність та прийнятну точність запропонованої моделі.

Матеріали і методи досліджень

Дослідження швидкості руху зерна проводили для відкритого гвинтового каналу, що має розгінну та гальмівну ділянки із відповідними змінними кутами нахилу. Така модель ґрунтується на системі сил, діючих на елементарний об'єм зернового потоку у гвинтовому каналі, у циліндричній системі координат (рис. 1).

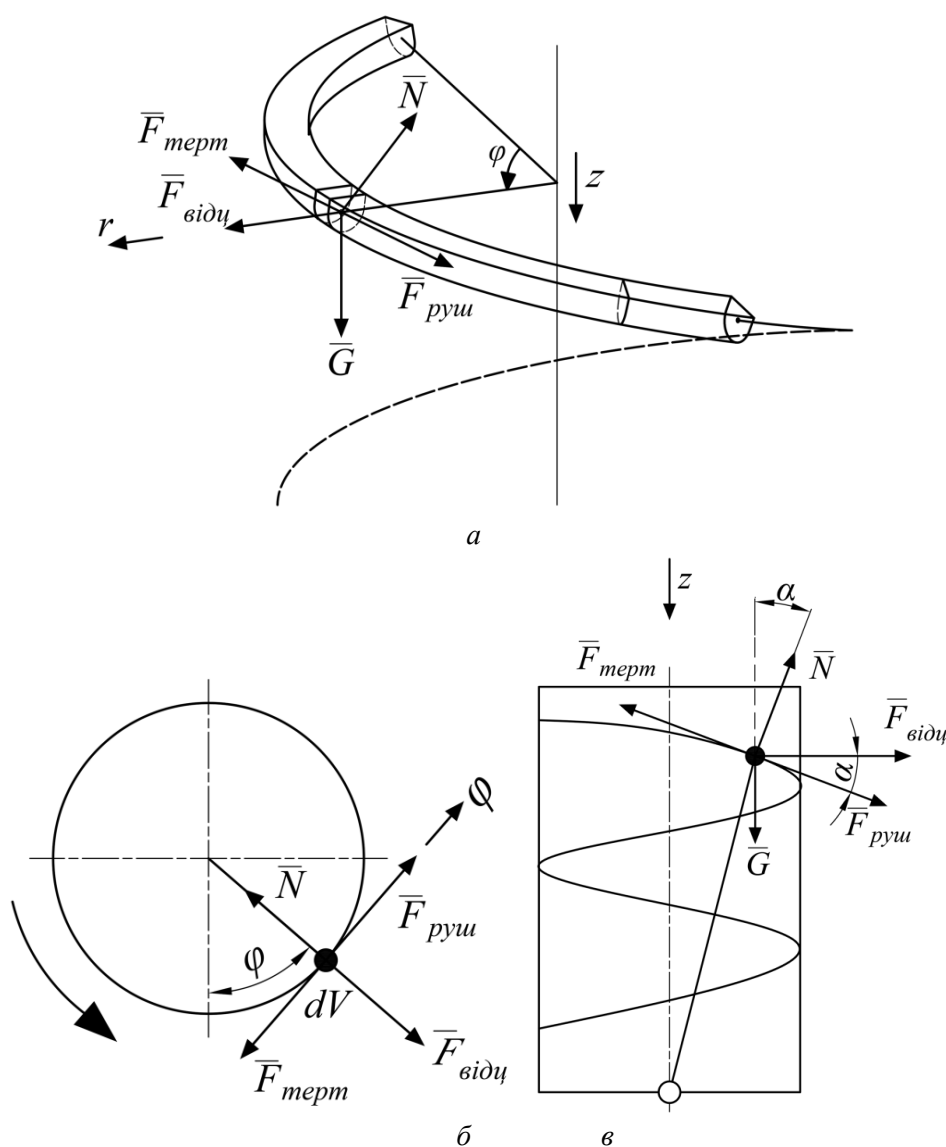


Рис. 1. Система сил, діючих на елементарний об'єм зернового потоку у гвинтовому каналі, у циліндричній системі координат:

а – у просторовому відображенні; б – у горизонтальному відображенні; в – у вертикальному відображенні

Гравітаційне переміщення зернової маси по гвинтовому каналу відбувається під впливом рушійної сили $\vec{F}_{руш} = m\vec{a}$, що визначається з балансу сил, діючих на окреслену рухома масу:

$$\vec{F}_{руш} = \sum \vec{F}_k \text{ або } m\vec{a} = \sum \vec{F}_k, \quad (1)$$

де $\sum \vec{F}_k$ – сума всіх сил, що діють на виокремлену масу зернового потоку у гвинтовому каналу.

Із врахуванням обертально-поступального характеру руху зерна у гвинтовому каналі баланс сил у векторній формі буде таким:

$$m\vec{a} = \vec{F}_{терт} + \vec{F}_{відц} + \vec{N} + \vec{G}, \quad (2)$$

де $\vec{F}_{терт}$ – сила тертя зернового потоку о поверхню гвинтового каналу; $\vec{F}_{відц}$ – відцентрова сила, що діє на зерновий потік при обертальному русі зернового потоку навколо центральної осі гвинтового каналу; \vec{N} – сила нормальної реакції поверхні гвинтового каналу; \vec{G} – сила гравітаційного тяжіння.

Здійснюючи проектування усіх складників на відповідні напрямки циліндричної системи координат, баланс сил може бути представлений так:

$$\begin{cases} ma_r = F_{відц}^r - N^r, \\ ma_\varphi = -F_{терт}^\varphi + N^\varphi, \\ ma_z = -F_{терт}^z - N^z + G^z, \end{cases} \quad (3)$$

де a_r, a_φ, a_z – проекції прискорення зернової маси m за радіальним, кутовим та висотним напрямком циліндричної системи координат; $F_{відц}^r, N^r$ – проекції відцентрової сили та нормальної сили реакції опори за радіальним напрямком; $F_{терт}^\varphi, N^\varphi$ – проекції сили тертя та нормальної сили реакції опори за кутовим напрямком; $F_{терт}^z, N^z, G^z$ – проекції сили тертя, нормальної сили реакції опори та сили гравітаційного тяжіння за висотним напрямком.

Співвідношення, що визначає математичну залежність між кутами нахилу розгінної та гальмівної ділянки α і β , відповідно до умови $V_{поч} = V_{кин} = V_0$, наведені у попередніх дослідженнях [4, 17, 18]. Для його отримання було розв'язано систему рівнянь, що описує перетворення кінетичної та потенціальної енергії зернового потоку на розгінній та гальмівній ділянці циліндричної спіралі. Як результат отримано таку залежність:

$$\beta = 2 \arctg \mu \left(1 + \frac{2h_0}{r} \right) - \alpha. \quad (4)$$

Відповідно до проведених теоретичних досліджень [4, 5, 17, 18] руху зерна у відкритому гвинтовому каналі з різними кутами нахилу ділянок спуску остаточно отримано аналітичну модель швидкості руху зерна по гвинтовому каналу у вигляді системи рівнянь:

$$V = \begin{cases} \sqrt{2gh_0}, \text{ нпу } t = 0, \\ \frac{r^2 \varphi^p(t) \frac{d}{dt} \varphi^p(t) + z^p(t) \frac{d}{dt} z^p(t)}{2\sqrt{r^2 \varphi^p(t)^2 + (z^p(t))^2}}, \text{ нпу } t \in (0; t_p], \\ \frac{r^2 \varphi^p(t_p) \frac{d}{dt} \varphi^p(t_p) + z^p(t_p) \frac{d}{dt} z^p(t_p)}{2\sqrt{r^2 \varphi^p(t_p)^2 + (z^p(t_p))^2}} - \\ \frac{r^2 \varphi^\Gamma(t-t_p) \frac{d}{dt} \varphi^\Gamma(t-t_p) + z^\Gamma(t-t_p) \frac{d}{dt} z^\Gamma(t-t_p)}{2\sqrt{r^2 (\varphi^\Gamma(t-t_p))^2 + (z^\Gamma(t-t_p))^2}}, \text{ нпу } t \in (t_p; t_{max}), \\ \sqrt{2gh_0}, \text{ нпу } t = t_{max}. \end{cases} \quad (5)$$

Наведена модель визначає швидкість руху зерна у будь-який момент часу як по розгінній, так і по гальмівній частині гвинтового каналу із дискретно змінними двома кутами нахилу спіралей.

Результати досліджень та їх обговорення

На основі вищенаведеної моделі для зменшення травмування зерна був запропонований периферійний відкритий гвинтовий завантажувальний пристрій (ПВГК) зі змінними кутами спуску. Завантажувальний пристрій складається із розгінної і гвинтової гальмівної ділянок, які встановлюються під різним кутом до горизонту. ПВГК кріпиться на внутрішній частині силосу з можливістю регулювання кутів спуску. По мірі заповнення силосу зерном засипається і відкритий гвинтовий канал.

Силос із ПВГК (рис. 2) складається із циліндричної ємності 1, завантажувального отвору 2, периферійного відкритого гвинтового каналу 3 з дискретно змінними кутами нахилу. Завантажувальний патрубок 2 спрямовує зерновий матеріал з верхньої частини силосу до ПВГК. Тіло гвинтового каналу 3 утворено шляхом повертання U- подібного профілю за гвинтовою лінією зі змінними кутами на розгінній 4 і гальмівній 5 ділянках пристрою.

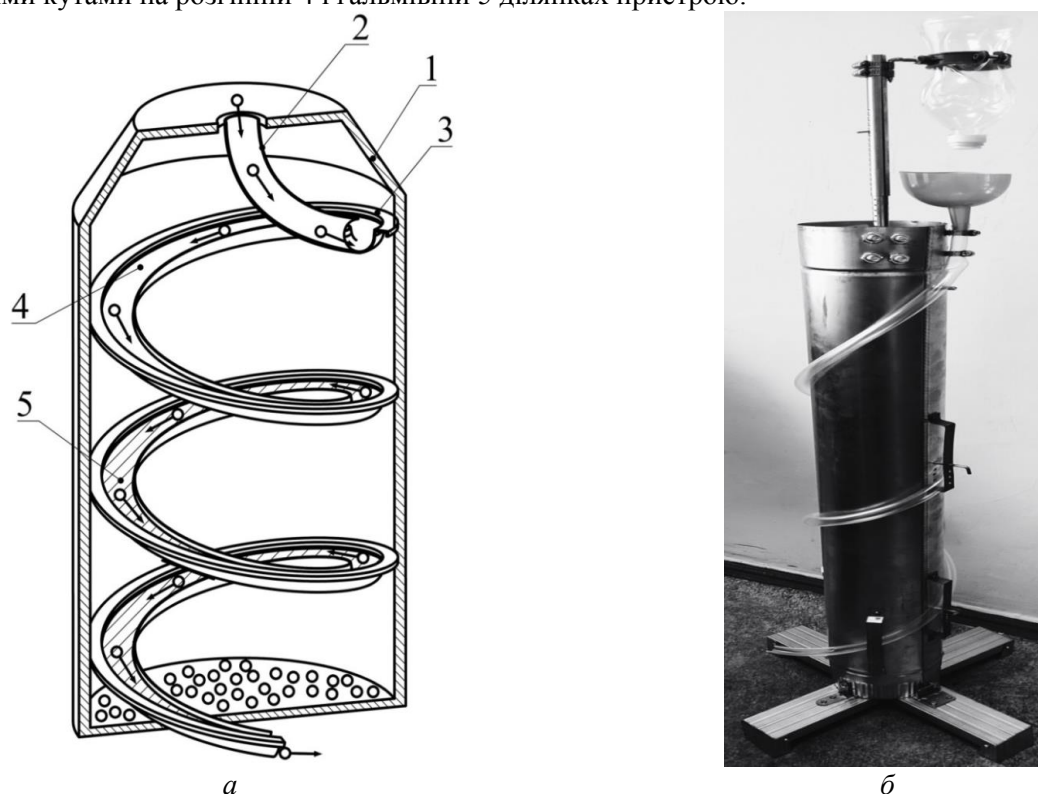


Рис. 2. Силос із периферійним відкритим гвинтовим каналом:

1 – циліндрична ємність; 2 – завантажувальний патрубок; 3 – периферійний відкритий гвинтовий канал; 4 – розгінна ділянка; 5 – гальмівна ділянка.

Головним показником, що визначає геометричну будову гвинтового каналу, є кількість витків розгінної та гальмівної ділянок. Початково задається кількість витків розгінної ділянки n_p . При рівності довжин каналів ($l_p=l_\Gamma$) розрахунок кількості витків гальмівної ділянки проводиться за формулами (7) і (8):

$$l_p = n_p 2\pi r \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}, \quad (7)$$

$$n_\Gamma = \frac{l_p}{2\pi r \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}}. \quad (8)$$

Методика проведення експериментальних досліджень

На першому етапі експериментальних досліджень визначали характер зміни величин кутів α розгінної та β гальмівної ділянки та співвідношення початкової висоти h_0 падіння зерна у гвинтовий канал до радіуса r цього каналу.

На другому етапі досліджували кінцеву швидкість зерна при сході з каналу. Дослідження здійснювали при зміні кута нахилу розгінної та гальмівної ділянок та фіксованих інших параметрах. Співвідношення, що визначає залежність між кутами, зберігалось. Для отримання достовірних даних у кожній комбінації змінних факторів з рівнем значущості 5% було заплановано проведення п'яти паралельних експериментів.

Результати експериментальних досліджень опрацьовували відповідно до стандартної методики: перевірка на однорідність дисперсій дослідів за критерієм Кохрена, перевірка нормального розподілу залишкового ряду за RS критерієм, знаходження відносної похибки залишків та їх статистичних оцінок, визначення коефіцієнта множинної кореляції, зіставлення результатів експериментальних та теоретичних досліджень за величиною відносних похибок між ними. Такі дослідження є підставою для оцінки точності та адекватності запропонованої аналітичної моделі.

Як зерновий матеріал було вибрано зерно пшениці озимої із середньою вологістю 14%.

Відстеження у часі переміщення зернового потоку (окремо виділених яскравою фарбою його частинок) по гвинтовому каналу при експериментальних дослідженнях здійснювали з використанням високочастотної відеотехніки.

Результати експериментальних досліджень та їх аналіз

Формування геометрії гвинтового каналу спочатку вимагає визначитися з кутами нахилу розгінної та гальмівної ділянок. Використовуючи залежність (4) між даними кутами параметрами, була побудована поверхня відгуку (рис. 3), що ілюструє характер зміни кута нахилу гальмівної ділянки від кутового параметра ділянки розгону та співвідношення початкової висоти h_0 падіння зерна у гвинтовий канал до радіуса r цього каналу.

З метою перевірки адекватності складеної моделі руху зернового потоку по гвинтовому каналу та визначення ступеня відповідності отриманих розрахунковим шляхом параметрів руху їх еквівалентним величинам у реальних умовах протікання гравітаційного руху зерна було здійснено низку експериментальних досліджень. Дослідження проводили на лабораторному зразку (рис 2, б) периферійного відкритого гвинтового каналу з різними кутами нахилу ділянок спуску.

Стосовно дискретності зміни факторів впливу, то для першого етапу досліджень було взято таке: висота гвинтового каналу – 2 м; співвідношення h_0/r вибиралось дискретно (0.7, 0.8, 0.9); кількість витків $n_p=1$; кут α змінювалась від 41° до 45° з кроком в 1° ; коефіцієнт тертя зернового матеріалу при русі по металевому каналу приймався рівним $\mu = 0.3$.

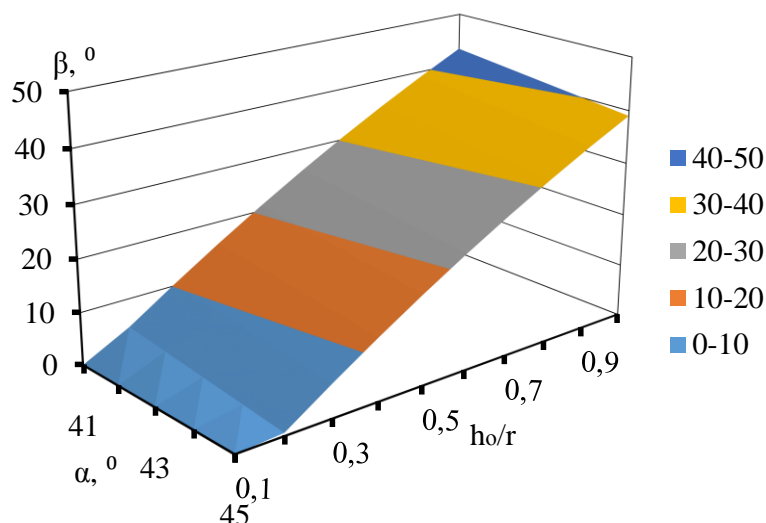


Рис. 3. Співвідношення кутів α розгінної та β гальмівної ділянки з урахуванням співвідношення h_0/r

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

Для другого етапу програми досліджень фактори впливу набували таких же самих значень як і на першому етапі, при $h_0=0.1$ м, $r=0.13$ м, співвідношення $h_0/r=0.77$. Кут β при цьому обраховувався на підставі величини кута α за виразом (4). Правило п'ятикратного повторення експерименту для кожного варіанту значення кутів зберігалось для цього етапу. На цьому етапі досліджували кінцеву швидкість зерна при сході з каналу.

Результати експериментів з визначення поточної швидкості руху зерна в момент його сходу з гвинтового каналу ($h_0/r = 0.77$)

Кут α	Кут β	Кінцева швидкість $V_{кін}$, м/с					Кінцева швидкість $V_{кін}$, середня	Дисперсія дослідів D_i	Теоретична кінцева швидкість $V_{кін}$, м/с	Відносна похибка, δ , %
		1,3	1,4	1,2	1,7	1,1				
41	39	1,3	1,4	1,2	1,7	1,1	1,34	0,053	1,386707	3,368
42	38	1,3	1,6	1,3	1,7	1,3	1,44	0,038	1,414721	1,787
43	37	1,4	1,3	1,6	1,2	1,4	1,38	0,022	1,400714	1,479
44	36	1,3	1,6	1,4	1,6	1,5	1,48	0,017	1,414721	4,614
45	35	1,6	1,4	1,2	1,5	1,3	1,4	0,025	1,428728	2,011
Похибка експерименту								0,1761		
Максимальна дисперсія, D_{max}								0,053		
Сума дисперсій, ΣD								0,155		
Спостережене значення критерію Кохрена, G								0,34194		

2. Результати дослідження значень залишків експериментальних та теоретичних даних кінцевої швидкості руху зерна в момент сходу з каналу

Залишки $V_{кінц}$, м/с				
0,114721245	-0,013293037	0,186706963	-0,313293037	0,286706963
0,086706963	-0,213293037	0,086706963	-0,313293037	0,086706963
0,000714104	0,100714104	-0,199285896	0,200714104	0,000714104
0,114721245	-0,185278755	0,014721245	-0,185278755	-0,085278755
-0,171271614	0,028728386	0,228728	-0,071271614	0,128728386
Відносні похибки, %				
8,824711125	0,949502675	15,55891355	18,4290022	26,06426932
6,66976635	13,33081484	6,66976635	18,4290022	6,66976635
0,051007399	7,747238738	12,45536853	16,7261753	0,051007399
8,824711125	11,57992221	1,051517473	11,57992221	5,685250358
10,7044759	2,052027547	19,06069881	4,751440956	9,902183513
Середня відносна похибка, %			9,75	
Математичне сподівання			-0,004	
Дисперсія			0,028	
Довірчий інтервал			(-0,34; 0,33)	
Сума квадратів залишків			0,678329858	
RS критерій нормального розподілу			3,56 € (3,34;4,53)	

Кут нахилу гальмівної ділянки β повинен бути більшим від кута тертя зерна сільськогосподарської культури ξ [17], яке завантажується в силос. Ця умова забезпечує сталий рух зернового вантажу по поверхні каналу. Отже, вибір і співвідношення кутів нахилу розгінної та гальмівної ділянок ПВГК залежить від формули (4) та конкретного сорту зерна з відповідним кутом тертя ξ . Для більшості різновидів зерна сільськогосподарських культур кут тертя перебуває в межах від 15° до 25° залежно від фізико-механічних властивостей та рівня зволоженості зернової маси. Зважаючи на це, формуючі кути ключових ділянок ПВГК повинні бути більшими від указанного кутового діапазону, тобто для гальмівної ділянки слід дотримуватися наступної вимоги $\beta > \xi$. У найбільш невідповідних умовах переміщення зернового потоку кут β приймає значення, що перевищує верхню межу діапазону варіації кута тертя, а саме – $\beta > 25^\circ$. При цьому, зважаючи на взаємозалежність (4) між кутами гальмівної та розгінної ділянки ПВГК, кут α буде більшим від 41° .

З аналізу проілюстрованої залежності на рис. 3 встановлено, що головним чинником формування величини кута β є співвідношення між ключовими габаритними параметрами ПВГК – радіусом r каналу та висотою падіння зерна h_0 . Беручи до уваги застосовані вище обмежувальні умови на значення кутів нахилу ділянок каналу, кут β потрібно формувати, відштовхуючись від значення співвідношення h_0/r рівних 0.6...0.7 та вище. У цьому випадку цей кут буде гарантовано перевищувати обмежувальну границю у 25° .

Експериментально було встановлено, що кут α не повинен перевищувати 45° , адже подальше його збільшення призводило до згруження зерна на початку гальмівної ділянки внаслідок швидкого гравітаційного зсуву зернового потоку по розгінному каналу. Ця теза також підтверджується теоретично, оскільки відповідно до (28) при куті нахилу $\alpha > 45^\circ$ кут $\beta < 21^\circ$, що є менше за нижню межу кута природного відкосу ξ для зерен пшениці.

Зі статистичної оцінки отриманих експериментальних даних (табл. 1) видно, що варіативність зміни швидкостей для кожного кута α є доволі невелика, а відхилення поточних значень від середнього показника не перевищує 10 %. При перевірці однорідності дисперсій досліджень було встановлено, що спостережене значення Кохрена $G=0,34194$ не перевищує його критичної величини $G_{\text{табл.}}=0.6838$, вибраного, виходячи з кількості дослідів, паралельних досліджень та прийнятих факторів впливу. Це свідчить про належний рівень якості і повторюваності проведеного експерименту.

Значення похибки експерименту та відносних похибок ($< 10\%$) дослідних та теоретичних значень кінцевої швидкості зернового потоку при сході з гвинтового каналу засвідчують цілком допустимі межі відхилень для цього багатофакторного експерименту з наявною складністю його натурної реалізації.

Статистичний аналіз експериментальних даних та значень залишків кінцевої швидкості сходу зерна (табл. 1–2) вказує на достатній рівень та точність проведених досліджень. Згідно з RS критерієм значення залишкового ряду є нормально розподіленими для рівня значущості 0.05 та $n=25$.

Однорідність дисперсій досліджень, коефіцієнт множинної кореляції експериментальних та теоретичних даних кінцевої швидкості $R=0,993$, середня відносна похибка залишків 9.75% та їх нормальний розподіл свідчать про адекватність розробленої моделі. Зіставлення теоретичних та експериментальних значень кінцевої швидкості руху зерна за величиною відносних похибок також вказує на допустимий рівень точності представленої теоретичної моделі.

Під час проведених експериментів було виявлено, що кінцева швидкість сходу зерна з каналу перебувала в межах від 1.1 м/с до 1.7 м/с при середніх розрахункових значеннях близько 1.41 м/с. Ця кінцева швидкість є близькою до початкової 1,4007 м/с, що свідчить про правильність співвідношень між кутами α і β , та достовірність аналітичної моделі (5).

Висновки

На основі аналітичної моделі запропоновано технічний опис периферійного відкритого гвинтового каналу та побудовано його лабораторний зразок. Обґрунтовано значення рекомендованих кутів $41^\circ \dots 45^\circ$ для розгінної та $39^\circ \dots 35^\circ$ для гальмівної ділянок відповідно, відношення h_0/r повинно бути не менше 0.6...0.7.

Запропонований ПВГК не має громіздкої конструкції та за рахунок двох змінних кутів спіралей вирішує проблему контрольованого зменшення швидкості руху зерна для його завантаження у силоси без травмування.

Проведений комплекс досліджень дав змогу порівняти експериментальні результати швидкості руху озимої пшениці вологістю 14 % у ПВГК з розрахунковими теоретичними значеннями. Статистичний аналіз теоретичних та експериментальних даних засвідчив адекватність та прийнятну точність запропонованої аналітичної моделі, що дає можливість її застосування для подальших дослідницьких та виробничих цілей.

Перспективи подальших досліджень – вивчення доцільності розробки ПВГК з трьома різними кутами нахилу та дослідження потреби його виготовлення з різних матеріалів залежно від їх фрикційних властивостей.

References

1. Kong, E., Liu, D., Guo, X., Yang, W., Sun, J., Li, X., Zhan, K., Cui, D., Lin, J., & Zhang, A. (2013) Anatomical and chemical characteristic associated with lodging resistance in wheat. *The Crop Journal*, 1 (10), 43–45. doi: 10.1016/j.cj.2013.07.012

2. Komchenko, E. V., & Basyuk, S. P. (2003). The influence of the material of the walls of the bunker on the outflow of various bulk materials. *Energy Saving and Energy Saving Technologies in the Agroindustrial Complex*, 1, 145–149.
3. Goryushinsky, I. V., & Mosina, N. N. (2001). On the issue of assessing the process of loading containers with bulk materials. *Collection of Scientific Works of Students, Graduate Students and Young Scientists of Samiit*, 3, 83–84.
4. Arendarenko, V. M., Antonets, A. V., Savchenko, N. K., Samoilenko, T. V., & Ivanov, O. M. (2020). Rozrakhunkova model' hrovitatsiynoho rukhu zernovoho materialu v pokhylomu kanali z dyskretno zminnym kutom nakhylyu. *Visnyk Poltavskoyi Derzhavnoyi Ahrarnoyi Akademiyi*, 4, 273–282. doi: 10.31210/visnyk2020.04.35 [In Ukrainian].
5. Samoilenko, T. V., Arendarenko, V. M., & Antonets, A. V. (2020). Kinematyka rukhu zerna za spiral'nym prystroyem zi zminenym kutovym spuskom. *Visnyk Poltavskoyi Derzhavnoyi Ahrarnoyi Akademiyi*, 1, 267–274. doi: 10.31210/visnyk2020.01.31 [In Ukrainian].
6. Samoilenko, T. V., Antonets, A. V., Arendarenko, V. M., & Melnyk, V. I. (2021). Modelyuvannya udarnoyi vzayemodiyi zerna z plaskoyu tverdoyu poverkhneyu. *Inzheneriya Pryrodokorystuvanny*, 1 (19), 63–68. doi.org/10.37700/enm.2021.1(19).63-68 [In Ukrainian].
7. Tarasenko, A. P., Orobinsky, V. I., Gievsky, A. M., Baskakov I. V., Chernyshov, A. V., & Kharitonov, M. K. (2019). Reducing grain trauma during post-harvest processing. *Don Agrarian Science Bulletin*, 1 (45), 63–68. [In Russian].
8. Derevyanko, D. A., Sukmanyuk, O. V., Sarana, V. V., & Derevyanko, O. D. (2020). Substantiation of influence of working bodies of combine harvesters on damage and quality of seeds. *Bulletin of Agricultural Science*, 2 (803), 64–71. doi: 10.31073/agrovisnyk202002-10 [In Ukrainian].
9. Omarov, A., Müller, P., Tomas, J. (2013) Influence of loading rate on the deformation and fracture behavior of wheat grains. *Chemie-Ingenieur-Technik*, 85 (6), 907–913 doi: 10.1002/cite.201200054
10. Frączek, J., & Ślipek, Z. (1999) Fatigue strength of wheat grains. Part 1. The analysis of grain deformation at multiple loads. *International Agrophysics*, 13 (1), 93–97.
11. Sevidzh, S. (1985). Gravitacionnoe techenie nesvyazannykh granulirovannykh materialov v lotkah i kanalah. In: I. V. Shirko (Sostavitel/perevod). *Sbornik statej Mehanika granulirovannykh sred: Teoriya bystrykh techenij*. (p. 86–146). Moskva: Mir [In Russian].
12. Negi, S. C., Lu Z., & Jofriet J. C. (1997). A Numerical Model for Flow of Granular Materials in Silos. *Model Validation School of Engineering*, 68 (3), 231–236. doi: 10.1006/jaer.1997.0197
13. Morozov, I. V., & Dudin, O. V. (2003). Model of grain trajectory on the surfaces of agricultural machines. *Bulletin of Kharkiv State Technical University of Agriculture "Mechanization of Agricultural Production"*, 21, 124–131. [In Ukrainian].
14. Gevko, B. M. (2012). Mathematical model of grain movement on moving surfaces of sowing machines. *Collection of Scientific Works of Vinnytsia National Agrarian University. Technical Sciences*, 11 (1), 113–118. [In Ukrainian].
15. Lezhenkin, O., Golovlev, V., Mikhailenko, O., & Rubtsov, M. (2019). Mathematical model of the motion of a combed heap particle cereals in an air stream. *Proceedings of the Tavriya State Agrotechnological University*, 19 (3), 14–21 [In Ukrainian].
16. Naumenko, M. M., Sokol, S. P., Filipenko, D. V., & Guridova, V. O. (2017). Mathematical model of grain mixture motion in a cylindrical sieve rotating around an axis. *Geotechnical Mechanics*, 133, 250–256. [In Ukrainian].
17. Arendarenko, V., Antonets, A., Ivanov, O., Dudnikov, I., & Samoilenko, T. (2021). Building an analytical model of the gravitational grain movement in an open screw channel with variable inclination angles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7 (111)), 100–112. doi: 10.15587/1729-4061.2021.235451
18. Flehantov, L. O., & Antonets, A. V. (2017). Kompyuterne modelyuvannya mekhanichnoho rukhu tila zasobamy MATHCAD. *Informatsiyi Tekhnolohiyi v Osviti*, 30, 97–109. doi: 10.14308/ite000622 [In Ukrainian].
19. Antonets, A. V., Arendarenko, V. M., & Savchenko, N. K. (2021). Optymal'ne spivvidnoshennya kutiv nakhylyu pry rusi zerna u pokhylomu kanali. *Zbirnyk naukovykh prats' nauково-praktychnoyi konferentsiyi profesors'ko-vykladats'koho skladu Poltavs'koyi derzhavnoyi ahrarnoyi akademiyi*. Poltava. [In Ukrainian].

20. Samoylenko, T. V., Arendarenko, V. M., Antonets, A. V., & Koshova, O. P. (2021). Pro udarnu vzayemodiyu padayuchoho zerna pshenytsi na zhorstku betonnu osnovu sylosu. *Visnyk Poltavskoyi Derzhavnoyi Ahrarnoyi Akademiyi*, 2, 259-265. doi: 10.31210/visnyk2021.02.34 [In Ukrainian].

21. Flehantov, L. O., Ovsiienko, Y. I., Antonets, A. V., & Soloviev, V. N. (2022) Using Dynamic Vector Diagrams to Study Mechanical Motion Models at Agrarian University with GeoGebra *In Proceedings of the 1st Symposium on Advances in Educational Technology*, 1, АЕТ, 336–353. doi: 10.5220/0000155000003364

Стаття надійшла до редакції: 15.04.2022 р.

Бібліографічний опис для цитування:

Антонець А. В., Флегантов Л. О., Арндаренко В. М., Іванов О. М., Япринець Т. С.
Експериментальна перевірка адекватності аналітичної моделі гравітаційного руху зерна у гвинтовому каналі з двома змінними кутами нахилу. *Вісник ПДАА*. 2022. № 2. С. 277–286.

© Антонець Анатолій Вікторович, Флегантов Леонід Олексійович, Арндаренко Володимир Миколайович, Іванов Олег Миколайович, Япринець Тетяна Сергіївна, 2022