

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МОДЕЛІ КОНТРОЛЬОВАНОГО ГРАВІТАЦІЙНОГО РУХУ ЗЕРНА В ПОХИЛОМУ КАНАЛІ З ТРЬОМА ЗМІННИМИ КУТАМИ НАХИЛУ

### Анатолій Антонєць

кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри будівництва та професійної освіти  
Полтавський державний аграрний університет, вул. Сковороди, 1/3, Полтава, Україна, 36003,  
[anatolii.antonets@pdau.edu.ua](mailto:anatolii.antonets@pdau.edu.ua)  
**ORCID: 0000-0002-2332-6711**

### Сергій Яхін

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівництва та професійної освіти  
Полтавський державний аграрний університет, вул. Сковороди, 1/3, Полтава, Україна, 36003,  
[sergii.iakhin@pdau.edu.ua](mailto:sergii.iakhin@pdau.edu.ua)  
**ORCID: 0000-0002-0042-0844**

### Сергій Кучеренко

аспірант кафедри механічної та електричної інженерії  
Полтавський державний аграрний університет, вул. Сковороди, 1/3, Полтава, Україна, 36003,  
[serhii.v.kucherenko@pdau.edu.ua](mailto:serhii.v.kucherenko@pdau.edu.ua)  
**ORCID: 0009-0009-2308-0182**

### Богдан Ярошенко

аспірант кафедри механічної та електричної інженерії  
Полтавський державний аграрний університет, вул. Сковороди, 1/3, Полтава, Україна, 36003,  
[bohdan.yaroshenko@pdau.edu.ua](mailto:bohdan.yaroshenko@pdau.edu.ua)  
**ORCID: 0009-0006-0169-1909**

### Богдан Ступак

аспірант кафедри механічної та електричної інженерії  
Полтавський державний аграрний університет, вул. Сковороди, 1/3, Полтава, Україна, 36003,  
[bohdan.stupak@pdau.edu.ua](mailto:bohdan.stupak@pdau.edu.ua)  
**ORCID: 0009-0009-8015-2605**

У статті досліджено адекватність моделі переміщення зернової маси в похилому прямолінійному каналі з трьома змінними кутами нахилу, що дають змогу ефективно регулювати її швидкість. Це забезпечується завдяки виведеним аналітичним залежностям між кутами нахилу однієї розгінної та двох гальмівних ділянок гравітаційного пристрою.

Для зменшення пошкодження зерна застосовують різноманітні спеціалізовані пристрої, серед них і гравітаційних гальмівні системи, які можуть забезпечити контрольоване уповільнення руху зерна й запобігти його передчасному сходу. За допомогою теоретичної моделі запропоновано технічний опис похилого відкритого прямого каналу, який складається з трьох ділянок зі змінними кутами нахилу. Відповідно до цього, виготовлено лабораторний зразок для проведення експериментальних досліджень.

На початку дослідження вивчено діапазон зміни кутів нахилу  $\beta$  та  $\gamma$  гальмівних ділянок залежно від кута нахилу  $\alpha$  розгінної ділянки. Також проаналізовано вплив початкової висоти падіння зерна  $h_0$  та довжини  $l$  ділянок каналу. Наступним етапом було дослідження кінцевої швидкості зерна з вологістю 12 % за 10 різних варіацій кутів нахилу розгінної та гальмівних ділянок при незмінності інших параметрів. Щоб забезпечити достовірність результатів з рівнем значущості 5 %, для кожного набору змінних виконували по п'ять повторюваних дослідів.

Подальший статистичний аналіз містив перевірку однорідності дисперсій результатів експериментів, перевірку нормальності розподілу залишків, обчислення відносної похибки залишків і їх статистичних характеристик. Отримані результати підтвердили адекватність аналітичної моделі та прийнятний рівень її точності. Розбіжність між теоретичними й експериментальними даними не перевищила 9 %. Дослідження дали змогу встановити залежності між основними параметрами гравітаційної установки.

**Ключові слова:** рух зерна, аналітична моделі, похилий канал, кути нахилу, статистичний аналіз.

**Актуальність роботи.** Однією з головних проблем сучасного аграрного виробництва України є нарощування обсягів зберігання зерна високої якості. Саме від його кількості та якості залежить продовольча безпека держави, а також стабільний розвиток переробної й харчової промисловості [1].

У процесі транспортування зерна до силосів і його вільного падіння під дією сили тяжіння відбувається зіткнення зернівок із робочими елементами транспортерів, стінками, бетонною основою силосу, а також із зерною масою, що накопичується всередині споруди [2].

Під час гравітаційного завантаження силосів зерно зазнає ударів об дно, стінки або зерновий насип. Ушкоджене зерно має меншу стійкість до зберігання й характеризується підвищеною інтенсивністю дихання. Інтенсивне гравітаційне завантаження впливає на деформацію зерна та визначає характер його пошкоджень у всьому об'ємі [3, 4]. З метою зменшення пошкодження зерна під час його завантаження часто застосовують пересипні полиці, концентричні кільця з вертикальними лопатями, вертикальні шнекові конвеєри з отворами, стаціонарні жолоби й порожнисті усічені конуси [5]. У праці [6] представлено результати теоретичних досліджень гравітаційного переміщення зерна по різних робочих елементах сільськогосподарських машин. Одним із підходів до вирішення проблеми безударного завантаження силосів зерном є дослідження гравітаційного руху частинок по гвинтовій поверхні каналу [7].

Попри значну кількість наукових праць, питання створення конструктивно простого гравітаційного пристрою для обережного завантаження ємностей зерном залишаються актуальними. Для комплексного розв'язання проблеми обережного завантаження зерна в силоси доцільно спроектувати й дослідити роботу відкритого похилого каналу прямої форми, що складається з трьох ділянок зі змінними кутами нахилу. Це, своєю чергою, вимагає розроблення й перевірки відповідної аналітичної моделі руху зерна по поверхні такого похилого каналу.

**Метою статті** є експериментальна перевірка адекватності аналітичної моделі контрольованого гравітаційного руху зерна в похилому прямому каналі, що має три ділянки з різними кутами нахилу. Для досягнення цієї мети необхідно виконати такі завдання:

– на основі попередніх досліджень [8; 9] надати технічний опис похилого каналу з трьох секцій із регульованими кутами нахилу;

– побудувати лабораторний зразок гравітаційної установки;

– провести статистичний аналіз теоретичних та експериментальних результатів з метою підтвердження адекватності й достатньої точності запропонованої моделі.

**Матеріал і результати досліджень.** Дослідження швидкості контрольованого руху зерна проводили для відкритого похилого прямого каналу, що має три ділянки з відповідними трьома змінними кутами нахилу.

Математичні співвідношення, що описують залежність між кутами нахилу трьох ділянок  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $\gamma$  відповідно до умови безпечного завантаження зерна в силос без його травмування  $V_{поч} = V_{кин} = V_0$ , представлені в попередніх дослідженнях [8; 9]. Для встановлення зв'язку між кутами нахилу розгінної та двох гальмівних ділянок  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $\gamma$  розв'язано систему рівнянь, яка ґрунтується на перетворенні механічної енергії зернової маси:

$$\left\{ \begin{aligned} mgh_0 &= \frac{mV_0^2}{2} \\ \frac{mV_0^2}{2} + mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha &= \frac{mV_{max}^2}{2} \\ \frac{mV_{max}^2}{2} + mgl_2 \sin \beta - \mu mgl_2 \cos \beta &= \frac{m(V_{max} + V_0)^2}{8} \\ \frac{m(V_{max} + V_0)^2}{8} + mgl_3 \sin \gamma - \mu mgl_3 \cos \gamma &= \frac{mV_0^2}{2} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

На основі теоретичних досліджень [8; 9], що стосуються руху зерна у відкритому похилому каналі з різними кутами нахилу, та із застосуванням фізико-математичних перетворень запропоновано аналітичну модель контрольованої швидкості руху зерна похилим каналом через знайдені співвідношення між кутами нахилу його ділянок:

$$\left\{ \begin{aligned} \beta &= 2 \arctg \left( \frac{-1 + \sqrt{1 + (\mu^2 - b^2)}}{\mu - b} \right) + 2\pi k, \text{ де} \\ b &= \frac{\sqrt{h_0^2 + h_0 l_1 \sin \alpha - h_0 \mu l_1 \cos \alpha} - h_0}{2l_2} - \frac{3l_1 (\sin \alpha - \mu \cos \alpha)}{4l_2}; \\ \gamma &= 2 \arctg \left( \frac{-1 + \sqrt{1 + (\mu^2 - c^2)}}{\mu - c} \right) + 2\pi k, \text{ де} \\ c &= \frac{h_0 - \sqrt{h_0^2 + l_1 h_0 \sin \alpha - \mu l_1 h_0 \cos \alpha}}{2l_3} - \frac{l_1 \sin \alpha - \mu l_1 \cos \alpha}{4l_3}. \end{aligned} \right. \quad (2)$$

Співвідношення (2) описують взаємозалежності кутів  $\beta$  та  $\gamma$  від кута  $\alpha$  й дають можливість розрахувати параметри гравітаційного пристрою

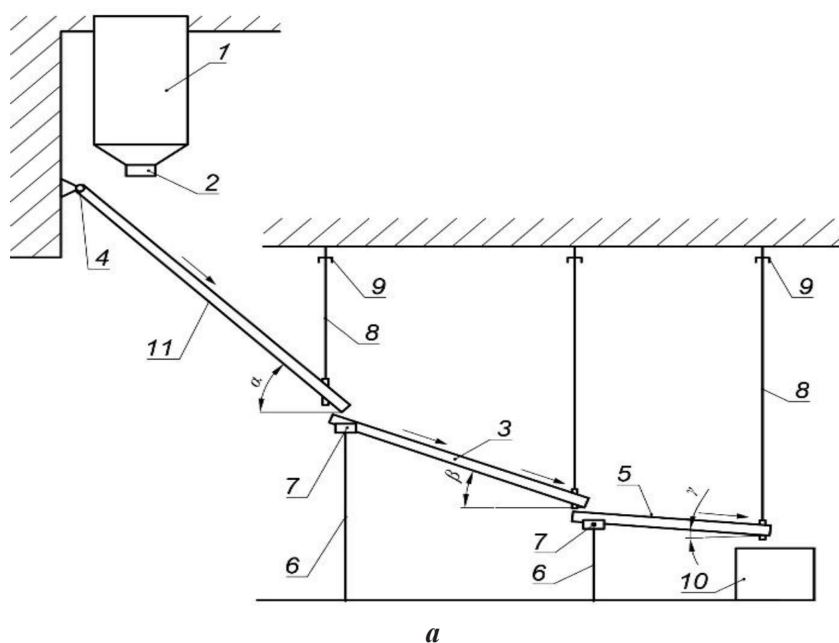
так, щоб початкова й кінцева швидкість зерна були однакові, що, у свою чергу, запобігає травмуванню зерна.

Для аналізу контрольованого руху зерна на основі вищенаведеної аналітичної моделі запропонована гравітаційна установка (рис. 1), що містить таке: ємність із зерном – 1; плоску шиберну заслінку – 2; ділянку розгону похилого каналу – 11; дві гальмівні ділянки каналу – 3 та 5; рухомий шарнір – 4; нерухомі стійки – 6, з гвинтовими каретками – 7; тяги – 8, котрі з'єднані з пристроями – 9, що потрібні для регулювання по висоті нижніх частин ділянок каналу; ємність для приймання зерна – 10.

Канал має форму подовжнього зрізу циліндра, відкритий бік якого спрямований догори. Робоча

частина жолобу має певну шорсткістю, яка визначається типом матеріалу, з якого виготовлені його окремі ділянки. Три ділянки похилого каналу фіксуються за допомогою тяг 8, закріплених на кінцях жолобів і здатних змінювати довжину завдяки регулювальним пристроям 9. Початкова (розгінна) ділянка, розташована біля ємності 1, кріпиться до поверхні через шарнір 4. Гальмівні канали з одного боку закріплені на каретках 7, які можуть переміщуватися вгору або вниз вздовж нерухомих стійок 6. Розгінна ділянка встановлюється під кутом  $\alpha$ , а гальмівні – під кутами  $\beta$  та  $\gamma$ .

Ділянки каналу розміщені шляхом використання тяг 8, які завдяки регулюванням 9 можуть змінювати власну довжину. Верх розгінної частини каналу розміщений під ємністю 1, крі-



**Рис. 1. Гравітаційна установка щодо дослідження контрольованого руху зерна на розгінному і двох гальмівних ділянках прямого каналу**

питься до опори через шарнір 4. Гальмівні частини каналу розміщені на каретках 7, що можуть підіймати чи опускати вздовж стійок 6. Перша розгінна частина каналу нахилена під кутом  $\alpha$ , а дві інші – під кутом  $\beta$  і  $\gamma$  відповідно,  $\alpha > \beta > \gamma$  (рис. 1, а).

Сипуча суміш падає з висоти  $h_0$  ємності й верхню частину першої ділянки каналу, на двох наступних ділянках зернова маса сповільнює швидкість, яка наприкінці руху по похилому каналу стає близькою до початкової швидкості падіння зерна на гравітаційну установку.

**Методика проведення досліджень.** На початковому етапі експерименту вивчали динаміку зміни кутів нахилу між  $\alpha$  для розгінної ділянки та  $\beta$  й  $\gamma$  для гальмівних частин каналу при постійному значенні початкової висоти  $h_0$ , з якої зернова маса падала на першу секцію похилого каналу.

Наступний етап присвячений дослідженню кінцевої швидкості зерна на виході з каналу. При цьому змінювалися кути нахилу розгінної та гальмівних частин каналу, тоді як інші параметри залишалися сталими. Для забезпечення достовірності результатів при кожному наборі змінних факторів планувалося проведення п'яти паралельних дослідів за рівнем значущості 5 %.

Обробка отриманих результатів здійснювалася за стандартною методикою: перевірка однорідності дисперсій, перевірка залишків на умову

нормального розподілу за RS-критерієм, розрахунок відносної похибки залишків і їхніх статистичних характеристик, порівняння експериментальних і теоретичних результатів за величиною відносних похибок і перевірка адекватності моделі за F-критерієм Фішера. Дослідження дали змогу оцінити точність та адекватність розробленої аналітичної моделі.

Переміщення зернового потоку в часі, а саме окремих частинок, позначених яскравою фарбою, по ділянках каналу під час експерименту фіксували за допомогою відеотехніки високої частотності. Як дослідний матеріал використовували озиме зерно пшениці із середнім рівнем вологості 12 %.

**Результати експериментальних досліджень і їх аналіз.** Формування геометричної конфігурації гравітаційного каналу насамперед передбачає визначення кутів нахилу його розгінної та гальмівних ділянок. На основі залежностей (2), що описують взаємозв'язок між цими кутами, побудовано діаграму (рис. 2), яка відображає зміну кутів нахилу гальмівних ділянок залежно від кута нахилу розгінної частини.

Кути нахилу гальмівних ділянок каналу повинні бути більшими від кута тертя зерна сільськогосподарської культури  $\xi$  [10]. Ця умова забезпечує неперервний рух зернової маси по похилому каналу, тому вибір співвід-

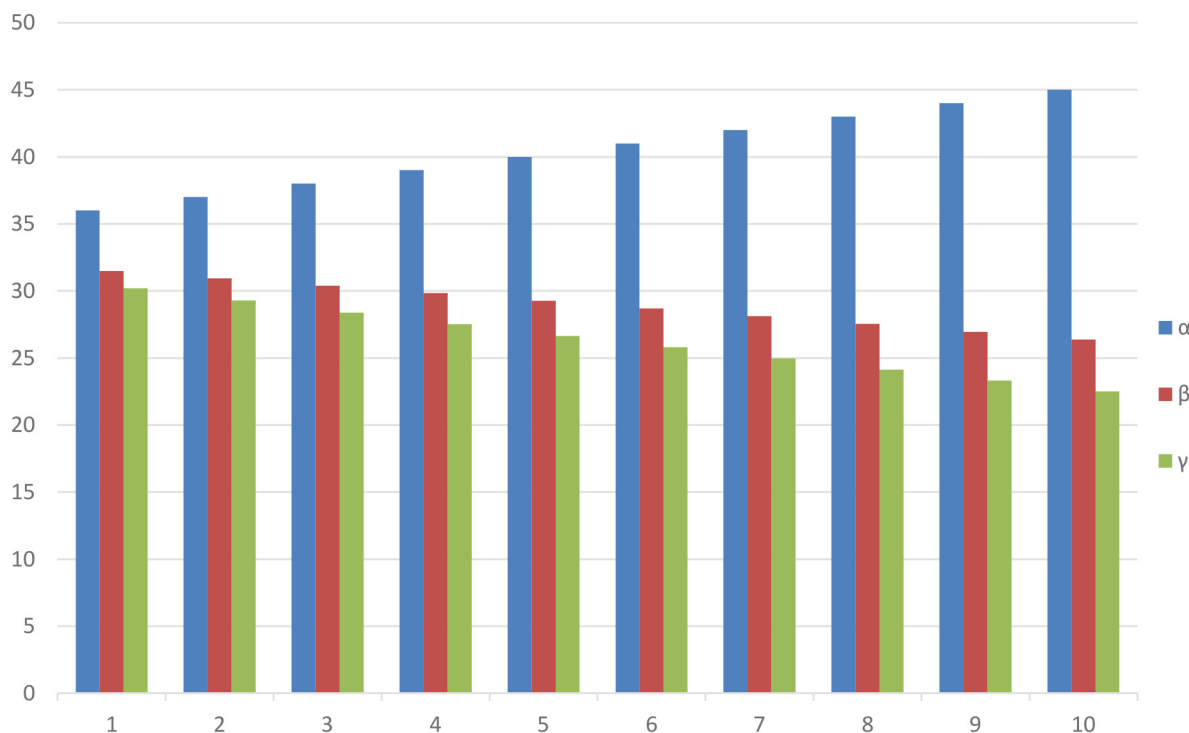


Рис. 2. Співвідношення кутів нахилу ділянок каналу

ношень кутів нахилу трьох ділянок похилого каналу залежить від співвідношень (2) і сорту зерна з відповідним кутом тертя  $\xi$ . Для більшості видів зерен кут тертя перебуває в межах від  $15^\circ \dots 22^\circ$  залежно від їх фізико-механічних властивостей і рівня вологості. З огляду на це, кути гальмівних ділянок запропонованого гравітаційного пристрою доцільно робити більшими від указанного діапазону, тобто дотримуватися вимоги  $\beta > \xi$ ,  $\gamma > \xi$ . В умовах проведеного експерименту кут  $\beta > 26^\circ$ , кут  $\gamma > 22^\circ$ , що більше за верхню межу  $\xi$ .

У ході експерименту встановлено, що кут  $\alpha$  не повинен перевищувати  $45^\circ$ , оскільки подальше його збільшення спричиняє накопичення зерна на початку гальмівної ділянки внаслідок надто інтенсивного гравітаційного прискорення потоку по розгінній ділянці.

Для перевірки адекватності розробленої моделі руху зерна по похилому прямолінійному каналу, а також для оцінювання ступеня відповідності теоретично отриманих параметрів швидкості руху їх фактичним значенням у реальних умовах, проведено серію паралельних дослідів. Випробування здійснювалися на лабораторному дослідному зразку (рис. 1, б) похилого гравітаційного каналу прямої форми, що мав три ділянки з різними кутами нахилу.

На початку експериментальних досліджень прийнято такі вихідні умови:  $h_0 = 0,15$  м; довжина ділянок –  $l_1 = 1$  м,  $l_2 = 1$  м та  $l_3 = 0,5$  м, кут  $\alpha$  змінювали з кроком в  $1^\circ$  від  $36^\circ$  до  $45^\circ$ ; коефіцієнт тертя зернової маси при русі по металевій поверхні каналу –  $\mu = 0,4$ . Для подальшого дослідження кінцевої швидкості зерна при виході з каналу використовували вищенаведені вихідні умови та значення кутів нахилу. Для кожного з 10 варіантів значень кутів проводили по 5 паралельних дослідів. Результати досліджень щодо кінцевої швидкості руху зерна та їх статистичний аналіз подано в таблицях 1 і 2.

Статистична обробка експериментальних даних (таблиця 1) показала, що варіативність швидкостей для кожного значення кута  $\alpha$  є незначною, а відхилення окремих значень від середнього не перевищує 5 %. Перевірка однорідності дисперсій за критерієм Кохрена засвідчила, що спостережене значення  $G = 0,1945$  є меншим за табличне  $G_{табл.} = 0,3733$ , визначене з урахуванням кількості проведених дослідів, паралельних експериментів і кількості факторів впливу. Це підтверджує якість і повторюваність результатів експерименту.

Отримані значення відносних похибок знаходяться в межах 9 % між експериментальними й теоретичними значеннями кінцевої швидкості зерна на

Таблиця 1

Швидкість руху зерна в моменту його сходу з похилого каналу

Кут $\alpha$	Кут $\beta$	Кут $\gamma$	Кінцева швидкість $V_{кін}$ , м/с					Кінцева швидкість $V_{кін}$ , середня	Дисперсія дослідів $D_i$	Теоретична кінцева швидкість $V_{кін}$ , м/с	Відносна похибка, $\delta$ , %
			1,6	1,5	1,9	1,8	1,7				
36	31,5	30,2	1,6	1,5	1,9	1,8	1,7	1,7	0,025	1,715517	0,90453262
37	30,9	29,2	1,8	1,5	1,7	1,7	1,9	1,72	0,022	1,715517	0,26129640
38	30,4	28,4	1,7	1,8	1,6	1,7	1,3	1,62	0,037	1,715517	5,56784873
39	29,8	27,5	1,4	1,7	1,5	1,6	1,6	1,56	0,013	1,715517	9,06533581
40	29,3	26,7	1,6	1,9	1,7	1,5	1,6	1,66	0,023	1,715517	3,23619067
41	28,7	25,8	1,6	1,7	1,7	1,6	1,8	1,68	0,007	1,715517	2,07036165
42	28,1	25,1	1,5	1,4	1,7	1,8	1,9	1,66	0,043	1,715517	3,23619067
43	27,5	24,1	1,7	1,9	1,7	1,8	1,5	1,72	0,022	1,715517	0,26129640
44	27,1	23,3	1,8	1,7	1,6	1,6	1,7	1,68	0,007	1,715517	2,07036165
45	26,4	22,5	1,5	1,8	1,7	1,9	1,7	1,72	0,022	1,715517	0,26129640
Похибка експерименту									0,148660687		
Максимальна дисперсія, $D_{max}$									0,043		
Сума дисперсій, $\sum D$									0,221		
Спостережене значення критерію Кохрена, $G$									0,194570136		

Значення залишків швидкості руху зерна в момент сходу з каналу

Залишки $V_{кінц}$ м/с				
0,115517	0,215517	-0,184483	-0,08448	0,015517
-0,084483	0,215517	0,0155174	0,015517	-0,184483
0,015517	-0,08448	0,1155174	0,015517	0,415517
0,315517	0,015517	0,2155174	0,115517	0,115517
0,115517	-0,18448	0,0155174	0,215517	0,115517
0,115517	0,015517	0,0155174	0,115517	-0,084483
0,215517	0,315517	0,0155174	-0,08448	-0,184483
0,015517	-0,18448	0,0155174	-0,08448	0,215517
-0,084483	0,015517	0,1155174	0,115517	0,015517
0,215517	-0,08448	0,0155174	-0,18448	0,015517
Відносні похибки, %				
7,219838416	14,36782764	9,709609755	4,693476963	0,912789098
4,693476963	14,36782764	0,912789098	0,912789098	9,709609755
0,912789098	4,693476963	7,219838416	0,912789098	31,96287805
22,53695819	0,912789098	14,36782764	7,219838416	7,219838416
7,219838416	9,709609755	0,912789098	14,36782764	7,219838416
7,219838416	0,912789098	0,912789098	7,219838416	4,693476963
14,36782764	22,53695819	0,912789098	4,693476963	9,709609755
0,912789098	9,709609755	0,912789098	4,693476963	14,36782764
4,693476963	0,912789098	7,219838416	7,219838416	0,912789098
14,36782764	4,693476963	0,912789098	9,709609755	0,912789098
Середня відносна похибка, %	7,2			
$e_{max}$	0,415517			
$e_{min}$	-0,184483			
Дисперсія адекватності	0,03			
Сума квадратів залишків	1,095			
RS критерій нормального розподілу	4,01 € (3,83;5,14)			

виході з каналу і свідчать про прийнятний рівень точності для багатофакторного експерименту з урахуванням складності його практичної реалізації.

Статистичний аналіз експериментальних даних і залишків кінцевої швидкості (таблиці 1–2) підтверджує достовірність і точність проведених вимірювань. Згідно з RS-критерієм, залишковий ряд має нормальний розподіл при рівні значущості 0,05 і кількості спостережень  $n = 50$ .

Однорідність дисперсій досліджень, виконання F-критерію Фішера ( $F_{спостер} = 1,367086418$  менше за  $F_{табл.} = 2,249024325$ ), середня відносна похибка залишків 7,2 % та їх нормальний розподіл свідчать про адекватність розробленої моделі.

У ході експериментів виявлено, що кінцева швидкість сходу зерна з каналу знаходилася в межах від 1,4 м/с до 1,9 м/с при розрахунковій середній по кожному набору змінних від 1,56 до 1,72 м/с. Ця кінцева швидкість є близькою до теоретичної 1,715517 м/с, що свідчить про достовірність аналітичної моделі.

**Висновки.** На основі розробленої аналітичної моделі сформовано технічний опис конструкції похилого гравітаційного каналу й виготовлено його лабораторний зразок. Обґрунтовано значення рекомендованих кутів нахилу для розгінної  $36^\circ \dots 45^\circ$  та для гальмівних ділянок –  $31,5^\circ \dots 26,4^\circ$  і  $30,2^\circ \dots 22,5^\circ$  відповідно.

Запропонований гравітаційний завантажувальний пристрій не є конструкційно складним і за рахунок трьох регульованих кутів нахилу ділянок вирішує проблему контрольованого зменшення швидкості руху зерна для його завантаження в ємності без травмування.

Дослідження дало змогу порівняти експериментальні значення швидкості руху зерен пшениці з теоретичними. Результати статистичного аналізу підтвердили адекватність і достатню точність запропонованої моделі, що дає змогу її використання в подальших наукових дослідженнях і практичних виробничих застосуваннях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Загірняк Д., Стефківська Ю. Аналіз напрямів оптимізації експорту й імпорту зернових та олійних культур в аспекті інституціоналізації апк України. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2025. Вип. 1(150). С. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.1.7>.
2. Fręczek J., Ślipek Z. Fatigue strength of wheat grains. Part 1. The analysis of grain deformation at multiple loads. *International Agrophysics*. 1999. Вип. 13(1). С. 93–97.
3. Nurmagamбетov A., Kurmanov A., Ryspayev K., Bekmyrza Z., Keklis A. Analysis of Grain Damage by the Bucket Elevator during Loading/Unloading. *Communications. Scientific letters of the University of Zilina*. 2024. № 26(1). P. 54–62. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.c.2024.013>
4. Chen Z., Wassgren C., Ambrose K. A. Review of Grain Kernel Damage: Mechanisms, Modeling, and Testing Procedures. *Transactions of the ASABE*. 2020. № 63(2). P. 455–475. DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.13643.10>
5. Мельник В. І., Самойленко Т. В. Аналіз напрямків удосконалення конструкції пристроїв для завантаження силосів. *Інженерія природокористування*. 2018. № 1(9). С. 83–91.
6. Morozov I. V., Dudin O. V. Model of grain trajectory on the surfaces of agricultural machines. *Bulletin of Kharkiv State Technical University of Agriculture "Mechanization of Agricultural Production"*. 2003. № 21. P. 124–131.
7. Pylypaka S., Nesvidomin V., Zaharova T., Pavlenko O., Klendiy M. The investigation of particle movement on a helical surface. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. С. 671–681.
8. Арендаренко В. М., Антонєць А. В., Савченко Н. К., Самойленко Т. В., Іванов О. М. Розрахункова модель гравітаційного руху зернового матеріалу в похилому каналі з дискретно змінним кутом нахилу. *Вісник ПДАА*. 2020. № 4. С. 273–282. DOI: [10.31210/visnyk2020.04.35](https://doi.org/10.31210/visnyk2020.04.35)
9. Антонєць А. В., Флегантов Л. О., Іванов О. М., Арендаренко В. М., Кошова О. П. Дослідження контрольованого гравітаційного руху зерна у похилому каналі з трьома змінними кутами нахилу. *Вісник ПДАА*. 2021. № 3. С. 265–273. DOI: [10.31210/visnyk.2021.03.33](https://doi.org/10.31210/visnyk.2021.03.33)
10. Бурлака О. А., Яхін С. В. Теоретичні аспекти процесу відцентрового розвантаження зерна у елеваторі зернозбирального комбайну. *Вісник ПДАА*. 2017. № 1–2. С. 133–137.

**EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE MODEL  
OF CONTROLLED GRAVITY GRAIN MOVEMENT  
IN AN INCLINED CHANNEL WITH THREE VARIABLE ANGLES OF INCLINE**

**Anatolii Antonets**

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Construction and Vocational Education  
Poltava State Agrarian University, 1/3 Skovorody str., Poltava, Ukraine, 36003, [anatolii.antonets@pdau.edu.ua](mailto:anatolii.antonets@pdau.edu.ua)  
**ORCID: 0000-0002-2332-6711**

**Sergii Yakhin**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Construction and Vocational Education  
Poltava State Agrarian University, 1/3 Skovorody str., Poltava, Ukraine, 36003, [sergii.iakhin@pdau.edu.ua](mailto:sergii.iakhin@pdau.edu.ua)  
**ORCID: 0000-0002-0042-0844**

**Serhii Kucherenko**

Postgraduate Student at the Department of Mechanical and Electrical Engineering  
Poltava State Agrarian University, 1/3 Skovorody str., Poltava, Ukraine, 36003,  
[serhii.v.kucherenko@pdau.edu.ua](mailto:serhii.v.kucherenko@pdau.edu.ua)  
**ORCID: 0009-0009-2308-0182**

**Bohdan Yaroshenko**

Postgraduate Student at the Department of Mechanical and Electrical Engineering  
Poltava State Agrarian University, 1/3 Skovorody str., Poltava, Ukraine, 36003,  
[bohdan.yaroshenko@pdau.edu.ua](mailto:bohdan.yaroshenko@pdau.edu.ua)  
**ORCID: 0009-0006-0169-1909**

**Bohdan Stupak**

Postgraduate Student at the Department of Mechanical and Electrical Engineering  
Poltava State Agrarian University, 1/3 Skovorody str., Poltava, Ukraine, 36003, [bohdan.stupak@pdau.edu.ua](mailto:bohdan.stupak@pdau.edu.ua)  
**ORCID: 0009-0009-8015-2605**

The article investigates the adequacy of the model of grain mass movement in an inclined straight channel with three variable angles of inclination, which allows for effective regulation of its speed. This is ensured by the derived analytical dependencies between the angles of inclination of one accelerating and two braking sections of the gravity device.

Using the theoretical model, a technical description of an inclined open straight channel was proposed, which consists of three sections with variable angles of inclination. Accordingly, a laboratory sample was manufactured for experimental research. At the beginning of the study, the range of changes in the angles of inclination  $\beta$  and  $\gamma$  of the braking sections depending on the angle of inclination  $\alpha$  of the acceleration section was studied. The influence of the initial height of grain fall  $h_0$  and the length  $l$  of the channel sections was also analyzed. The next stage was the study of the final velocity of grain with a humidity of 12 % for 10 different variations of the angles of inclination of the acceleration and braking sections with other parameters unchanged. To ensure the reliability of the results with a significance level of 5 %, five repeated experiments were performed for each set of variables.

Further statistical analysis included checking the homogeneity of variances of the experimental results, checking the normality of the distribution of residuals, calculating the relative error of the residuals and their statistical characteristics. The results obtained confirmed the adequacy of the analytical model and an acceptable level of its accuracy. The discrepancy between the theoretical and experimental data did not exceed 9 %. The conducted studies allowed us to establish the dependencies between the main parameters of the gravity installation.

**Key words:** grain movement, analytical models, inclined channel, inclination angles, statistical analysis.

## REFERENCES

- Zahirnyak, D., Stefkiivska, Yu. (2025). Analiz napryamiv optymizatsiyi eksportu y importu zernovykh ta oliynykh kul'tur v aspekti instytutstionalizatsiyi apk ukrayiny [Analysis of directions for optimizing the export and import of grain and oilseed crops in the aspect of institutionalization of the Ukrainian agricultural sector]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 1(150). 57–64. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.1.72> [in Ukrainian].
- Fręczek, 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.
- Nurmagametov, A., Kurmanov, A., Ryspayev, K., Bekmyrza, Z., & Keklis, A. (2024). Analysis of Grain Damage by the Bucket Elevator during Loading/Unloading. *Communications. Scientific letters of the University of Zilina*, 26(1), 54–62. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.c.2024.013>
- Chen, Z., Wassgren, C., & Ambrose, K. (2020). A Review of Grain Kernel Damage: Mechanisms, Modeling, and Testing Procedures. *Transactions of the ASABE*, 63(2), 455–475. DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.13643.10>
- Melnyk, V. I., Samoilenko, T. V. (2018). Analiz napryamkiv udoskonalennya konstruktsiyi prystroyiv dlya zavantazhennya sylosiv [Analysis of directions for improving the design of devices for loading silos]. *Inzheneriya pryrodokorystuvannya – Environmental Engineering*, 1(9), 83–91 [in Ukrainian].
- 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.
- Pylypaka, S., Nesvidomin, V., Zaharova, T., Pavlenko, O., Klendiy, M. (2020). The investigation of particle movement on a helical surface. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 671–681.
- Arendarenko, V. M., Antonets, A. V., Savchenko, N. K., Samoilenko, T. V., & Ivanov, O. M. (2020). Rozrakhunkova model' hrvitatsiyynoho rukhu zernovoho materialu v pokhylomu kanali z dyskretno zminnym kutom nakhylyu [Calculation model of grain gravitation movement in sloping passage with discrete variable inclination angle]. *Visnyk PDAA – Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, (4), 273–282. DOI: 10.31210/visnyk2020.04.35 [in Ukrainian].
- Antonets, A. V., Flegantov, L. O., Ivanov, O. M., Arendarenko, V. M., Koshova O. P. (2021). Doslidzhennya kontrol'ovanoho hrvitatsiyynoho rukhu zerna u pokhylomu kanali z tr'oma zminnymy kutamy nakhylyu [Research on controlled gravitational grain movement in an inclined channel with three variable inclination angles]. *Visnyk PDAA – Bulletin of the Ukrainian Agricultural Academy*, 3, 265–273. DOI: 10.31210/visnyk. 2021.03.33 [in Ukrainian].
- Burlaka, O. A., Yakhin, S. V. (2017). Teoretychni aspekty protsesu vidstetrovoho rozvantazhennya zerna u elevatori zernozbyral'noho kombaynu [Theoretical aspects of the process of centrifugal unloading of grain in the elevator of a combine harvester]. *Visnyk PDAA – Bulletin of the Ukrainian Agricultural Academy*, 1–2, 133–137 [in Ukrainian].



Стаття надійшла 11.06.2025  
Стаття прийнята 27.06.2025  
Опубліковано 20.08.2025