





original article | UDC 631.361:631.53.01 | doi: 10.31210/visnyk2021.03.33


INVESTIGATING CONTROLLED GRAIN GRAVITATIONAL MOVEMENT IN SLOPING CHANNEL WITH THREE VARIABLE ANGLES
A. V. Antonets^{1*}

 ORCID  [0000-0002-2332-6711](https://orcid.org/0000-0002-2332-6711)
*L. O. Flegantov*¹

 ORCID  [0000-0002-4689-1457](https://orcid.org/0000-0002-4689-1457)
*O. M. Ivanov*¹

 ORCID  [0000-0002-1761-9913](https://orcid.org/0000-0002-1761-9913)
*V. M. Arendarenko*¹

 ORCID  [0000-0003-0701-7983](https://orcid.org/0000-0003-0701-7983)
*O. P. Koshova*²

 ORCID  [0000-0003-0794-6774](https://orcid.org/0000-0003-0794-6774)
¹ Poltava State Agrarian University
1/3, Skovorody str., Poltava, 36003, Ukraine

² Higher Educational Establishment of Ukoopsilka “Poltava University of Economics and Trade”
3, Kovalia Str., Poltava, 36014, Ukraine

*Corresponding author

 E-mail: anatoliyantone1@gmail.com

How to Cite

Antonets, A. V., Flegantov, L. O., Ivanov, O. M., Arendarenko, V. M., & Koshova, O. P. (2021). Investigating controlled grain gravitational movement in sloping channel with three variable angles. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, (3), 265–273. doi: 10.31210/visnyk2021.03.33

Food security of countries depends on grain quality. Special devices are used to prevent the injury of grain mass during its transportation and loading. They can work on the principle of overflow, current, and with the use of gravitational braking devices. In gravitational devices, it is important to solve the problem of controlled reducing grain speed and prevent its untimely unloading. The aim of this paper was to find the relationship between the angles of one acceleration and two brake sections of gravitational unit to obtain the controlled initial grain speed at its exit. The main task was to find and substantiate the relationship between the three angles of one acceleration and two brake sections. The experimental gravitational installation was proposed to study the angles and grain speed. It has an acceleration section located at an angle α to the horizon, where the grain flow has its maximum speed V_{\max} passing the way of length l_1 . On the first brake section with angle β and length l_2 , the grain slows down its movement to the average value between the maximum and final speeds. At the end of the second brake section with an angle γ and length l_3 , the grain speed becomes close to the initial grain speed V_0 as a result of falling from the height h_0 of the hopper to the beginning of the acceleration section. To ensure the controlled speed of grain movement, mathematical correlations between the slope angles of acceleration and braking sections of the gravitation device were found. The analysis of the nature of changing slope angles of brake channels at changing the determining factors forming their sizes was carried out. The ratios between the angles α , β and γ were primarily determined by the value of the coefficient μ of friction-sliding, which depends on the type of grain, its humidity level and roughness of the tray material of the gravitational loading device. The lengths of sections l_1 , l_2 and l_3 also significantly affect the correlation between the slope angles, as well as the shape of the proposed gravitational installation.

Key words: grain, controlled speed, acceleration and braking areas, slope angles.

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТРОЛЬОВАНОГО ГРАВІТАЦІЙНОГО РУХУ ЗЕРНА У ПОХИЛОМУ КАНАЛІ З ТРЬОМА ЗМІННИМИ КУТАМИ НАХИЛУ

А. В. Антоненко¹, Л. О. Флегантов¹, О. М. Іванов¹, В. М. Арендаренко¹, О. П. Кошова²

¹ Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна

² Вищий навчальний заклад Укоопспілки «Полтавський університет економіки і торгівлі», м. Полтава, Україна

Від якості зерна залежить продовольча безпека країн. Для запобігання травмування зернової маси користуються різноманітними спеціальними пристроями. Зокрема, при використанні гравітаційних гальмівних пристроїв важливим є розв'язання проблеми контрольованого зменшення швидкості руху зерна та запобігання його передчасного сходу. Метою цієї роботи є дослідження залежностей між кутами нахилу розгінної та двох гальмівних ділянок гравітаційної установки для отримання контрольованої початкової швидкості руху зерна на її виході. Основне завдання: обґрунтувати залежності між трьома кутами нахилу однієї розгінної та двох гальмівних ділянок. Для дослідження кутів запропонована відповідна гравітаційна установка. Вона має розгінну ділянку, що розташована під кутом α до горизонту, де зерновий потік набуває свою максимальну швидкість V_{\max} , проходячи шлях довжиною l_1 . На першій гальмівній ділянці з кутом β і довжиною l_2 зерно сповільнює свій рух до усередненого значення між максимальною та кінцевою швидкостями. На кінці другої гальмівної ділянки з кутом γ і довжиною l_3 швидкість сходу зерна набуває значення, близького до початкової швидкості руху V_0 , яку зерно набуває в наслідок падіння з висоти h_0 бункера на початок розгінної ділянки. Для контролю швидкості руху зерна знайдені математичні співвідношення між кутами нахилу розгінної та гальмівних ділянок гравітаційного пристрою. Окремо проведено аналіз характеру зміни кутів нахилу гальмівних каналів при зміні визначальних факторів, що формують їх величини. Співвідношення між кутами α , β і γ насамперед визначаються значенням коефіцієнта тертяковзання μ , який залежить від виду зернових, їх рівня вологості та шорсткості матеріалу жолобів. Довжини ділянок l_1 , l_2 та l_3 також суттєво впливають на співвідношення між кутами нахилу, а також на саму форму запропонованої гравітаційної установки.

Ключові слова: зерно, контрольована швидкість, розгінна та гальмівні ділянки, кути нахилу

Вступ

Від кількості і якості зерна залежить продовольча безпека країни і сталий розвиток переробної і харчової промисловості [1]. Під час транспортування та завантаження зернової маси відбувається зіткнення зернівок з робочими органами транспортерів, стінками бункерів та бетонним дном силосів [2–5]. У роботах [6–9] розглядається вплив технічних засобів механізації сільськогосподарського виробництва на ступінь ушкодження насіння різних культур.

Відомо, що травмоване зерно менш стійке до зберігання, а отримані під час завантаження травми слугують осередком розвитку шкідливих бактерій і мікробів. Для зменшення травмування зерна при його завантаженні часто використовують пересипні полиці, концентричні кільця з вертикально розміщеними лопатями, вертикальні гвинтові конвеєри з вікнами, нерухомі жолоби та пустотілі зрізані конуси [10–12]. Окремим варіантом подолання проблеми безударного завантаження силосів зерном є створення різноманітних каскадних пристроїв [13]. У [14, 15] наведено результати теоретичних досліджень гравітаційного руху зерна по різних робочих органах.

Розглянуті вище пристрої зменшують травмування зерна, але є досить громіздкими. Недостатньо висвітленою є також проблема контрольованого зменшення швидкості гравітаційного руху зернової маси. Ці дослідження були розпочаті в роботах [16–19], де наведено зв'язок між кутами розгінної та гальмівної ділянок спускного прямого та гвинтового каналів. Окремо побудована аналітична модель швидкості гравітаційного руху зерна по гвинтовому каналу із двома змінними кутами нахилу [20]. Як показали проведені дослідження, при деяких значеннях кутів відбувається згруження зерна на гальмівній ділянці. Для запобігання цьому виникає необхідність дослідження вдосконаленого пристрою з трьома змінними кутами нахилу, для розгінної та двох гальмівних ділянок спускного прямого каналу.

Метою цієї роботи є пошук та дослідження залежностей між кутами нахилу розгінної та двох гальмівних ділянок гравітаційної установки для контрольованого отримання початкової швидкості руху зерна на її виході.

Матеріали і методи досліджень

Гравітаційна установка (рис. 1) для дослідження руху зерна складається із бункера для зберігання зернового матеріалу 1, шиберної заслінки 2, розгінної ділянки 11 каналу спуску, рухомого циліндричного шарніру 4, двох гальмівних ділянок 3 і 5 каналу спуску, нерухокої стійки 6, на якій встановлена гвинтова каретка 7, еластичних тяг 8, котрі у верхній нерухомій частині установки з'єднуються із регулювальними пристроями 9, які призначені для піднімання та опускання нижніх кінців ділянок спускного каналу, та бункера для збирання зернового матеріалу 10.

Профіль ділянок каналу має форму поздовжньо зрізаного циліндра, що повернутий відкритою стороною нагору. Внутрішня робоча поверхня каналу має певний рівень шорсткості, що залежить від виду матеріалу ділянок.

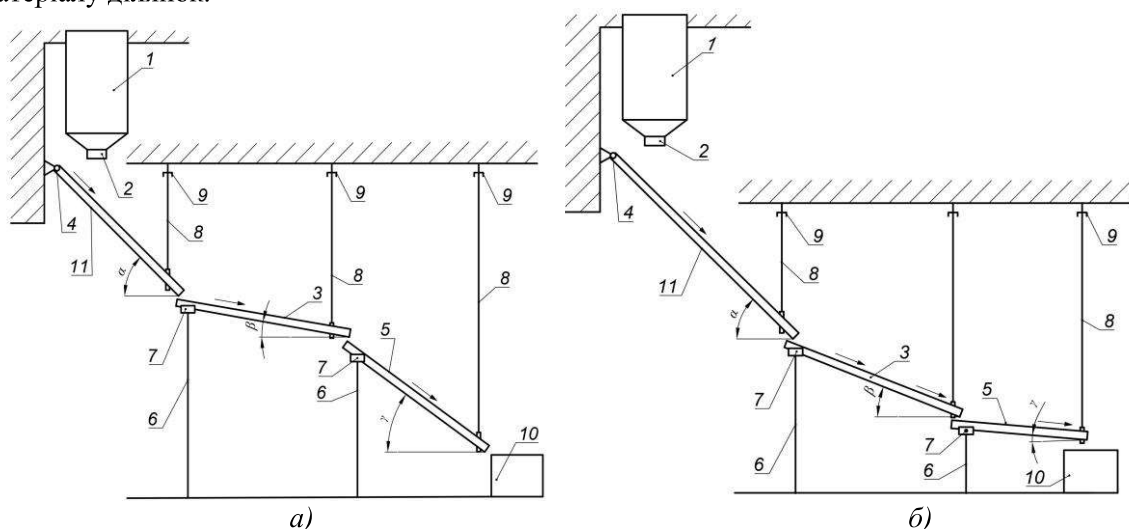


Рис. 1. Гравітаційна установка з дослідження контрольованого руху зерна на розгінному і двох гальмівних ділянках прямого каналу

Три ділянки каналу розташовуються у просторі за допомогою еластичних тяг 8, які кріпляться на кінцях жолобів каналу та можуть змінювати свою довжину завдяки регулюючим тягам 9. Розгінна ділянка біля бункера 1 кріпиться до стінки за допомогою шарніру 4. Гальмівні канали з однієї сторони встановлені на каретки 7, які можуть переміщатись уздовж нерухомих стійок 6 вгору або вниз. Розгінна ділянка встановлюється під кутом α , а гальмівні – під кутами β і γ . Можливі два варіанти розташування ділянок: $\alpha > \beta < \gamma$ (рис. 1, а) і $\alpha > \beta > \gamma$ (рис. 1, б). Зерно з висоти h_0 – висота між бункером та початком розгінної ділянки падає на верхню частину розгінного спускного каналу. На гальмівних ділянках зерно сповільнює свій рух. Швидкість сходу зерна набуває значення близького до початкової швидкості руху зерна по розгінній ділянці каналу.

Результати досліджень та їх обговорення

Рух зерна по розгінній і гальмівним ділянкам будемо вважати ламінарною течією. Під час руху зерна між поверхнею жолоба і зовнішнім шаром зернової маси виникає сила тертя, що залежить від матеріалу каналу і визначається коефіцієнтом тертя-ковзання μ . Вважаємо, що зерно висипається з бункера рівномірно з однаковою швидкістю, тобто маємо стаціонарний потік. Відповідно до рівняння нерозривності течії $V \cdot S = const$, враховуючи однакові поперечні перерізи усіх трьох каналів, маємо умову забезпечення стаціонарності потоку: $V_{поч} \leq V_{кін}$. Для спрощення подальших розрахунків будемо вважати $V_{поч} = V_{кін} = V_0$.

У момент падіння маси з отвору бункера, розташованого на висоті h_0 від краю каналу розгінної ділянки зерно набуває початкової швидкості V_0 . Відповідно до закону збереження енергії

$mgh_0 = \frac{mV_0^2}{2}$. Рухаючись по розгінній ділянці довжиною l_1 , що розташована під кутом α , зерно набирає максимальну швидкість V_{\max} . При цьому частини потенційної енергії зерна $E_{n1} = mgl_1 \sin \alpha$ переходять у кінетичну. Враховуючи роботу сили тертя $A_1 = \mu mgl_1 \cos \alpha$, маємо спрощене рівняння для зерна на розгінній ділянці:

$$\frac{mV_0^2}{2} + mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha = \frac{mV_{\max}^2}{2}.$$

Рух зернового потоку по першій гальмівній ділянці довжиною l_2 , розміщеної під кутом β до горизонту, відбувається за рахунок попередньо набутої максимальної кінетичної енергії та потенціальної енергії зерна $E_{n2} = mgl_2 \sin \beta$. Для запобігання сходження зернової маси та забезпечення контрольованого поступового зменшення швидкості руху будемо вважати, що на кінці першої гальмівної ділянки швидкість руху зерна буде рівною середньому значенню між максимальною V_{\max} і кінцевою швидкістю сходу V_0 . Тобто робота сили тертя $A_2 = \mu mgl_2 \cos \beta$, ($\beta \leq \alpha$) спричиняє зменшення швидкості руху зернового потоку з V_{\max} до $(V_{\max} + V_0)/2$. Із закону збереження енергії маємо:

$$\frac{mV_{\max}^2}{2} + mgl_2 \sin \beta - \mu mgl_2 \cos \beta = \frac{m(V_{\max} + V_0)^2}{8}.$$

Рух зерна по другій гальмівній ділянці довжиною l_3 , розміщеної під кутом γ , відбувається аналогічно до попередньої ділянки, і забезпечує зменшення швидкості руху зерна з $(V_{\max} + V_0)/2$ до V_0 .

Для пошуку залежності між кутами нахилу розгінної та двох гальмівних ділянок α , β і γ розв'яжемо таку систему рівнянь:

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

З другого та третього рівнянь системи (1) знайдемо:

$$\begin{aligned} \frac{mV_0^2}{2} + mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha + mgl_2 \sin \beta - \mu mgl_2 \cos \beta &= \frac{m(V_{\max} + V_0)^2}{8}, \\ mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha + mgl_2 \sin \beta - \mu mgl_2 \cos \beta &= \frac{m(V_{\max}^2 + 2V_{\max}V_0 - 3V_0^2)}{8}, \\ mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha + mgl_2 \sin \beta - \mu mgl_2 \cos \beta &= \\ &= \frac{1}{4} \left(\frac{mV_{\max}^2}{2} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{mV_{\max}V_0}{2} \right) - \frac{3}{4} \left(\frac{mV_0^2}{2} \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha + mgl_2 \sin \beta - \mu mgl_2 \cos \beta &= \\
 &= \frac{1}{4} (mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha) + \frac{1}{2} V_0 \sqrt{\left(\frac{mV_{\max}}{2}\right)^2} - \frac{1}{2} \left(\frac{mV_0^2}{2}\right), \\
 mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha + mgl_2 \sin \beta - \mu mgl_2 \cos \beta &= \frac{1}{4} mgl_1 (\sin \alpha - \mu \cos \alpha) + \\
 &+ \frac{1}{2} V_0 \sqrt{\left(\frac{m}{2} \left(\frac{mV_0^2}{2} + mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha\right)\right)} - \frac{1}{2} \left(\frac{mV_0^2}{2}\right).
 \end{aligned} \tag{2}$$

Використаємо перше рівняння з (1) для спрощення (2), одержимо:

$$\sin \beta - \mu \cos \beta = \frac{\sqrt{h_0^2 + h_0 l_1 \sin \alpha - h_0 \mu l_1 \cos \alpha} - h_0}{2l_2} - \frac{3l_1 (\sin \alpha - \mu \cos \alpha)}{4l_2}. \tag{3}$$

Права частина рівняння (3) буде сталою при заданому куті α , початковій висоті падіння зерна h_0 та довжинах l_1, l_2 першої та другої ділянок пристрою. Позначивши її через b , отримаємо рівняння виду $\sin \beta - \mu \cos \beta = b$. Представимо це рівняння у вигляді:

$$\begin{aligned}
 (\mu - b) \operatorname{tg}^2 \frac{\beta}{2} + 2 \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} - (\mu + b) &= 0, \\
 \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} &= \frac{-1 \pm \sqrt{1 + (\mu^2 - b^2)}}{\mu - b}.
 \end{aligned}$$

Враховуючи, що кути $\alpha, \beta \in \left[0; \frac{\pi}{2}\right]$, маємо:

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

Аналогічно знайдемо залежність між кутами α і γ . Використовуючи друге і четверте рівняння системи (1), отримаємо:

$$\begin{aligned}
 \frac{m(V_{\max} + V_0)^2}{8} + mgl_3 \sin \gamma - \mu mgl_3 \cos \gamma + mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha &= \frac{mV_{\max}^2}{2}, \\
 mgl_3 \sin \gamma - \mu mgl_3 \cos \gamma + mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha &= \frac{3mV_{\max}^2}{8} - \frac{mV_{\max} V_0}{4} - \frac{mV_0^2}{8}, \\
 mgl_3 \sin \gamma - \mu mgl_3 \cos \gamma + mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha &= \\
 &= \frac{3}{4} (mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha) - \frac{1}{2} V_0 \sqrt{\left(\frac{mV_{\max}}{2}\right)^2} + \frac{mV_0^2}{4}, \\
 mgl_3 \sin \gamma - \mu mgl_3 \cos \gamma + mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha &= \\
 &= \frac{3}{4} (mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha) - \frac{1}{2} V_0 \sqrt{\left(\frac{m}{2} \left(\frac{mV_0^2}{2} + mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha\right)\right)} + \frac{mgh_0}{2},
 \end{aligned}$$

$$gl_3 \sin \gamma - \mu gl_3 \cos \gamma + \frac{1}{4}(gl_1 \sin \alpha - \mu gl_1 \cos \alpha) =$$

$$= -\frac{1}{2}\sqrt{gh_0}\sqrt{gh_0 + gl_1 \sin \alpha - \mu gl_1 \cos \alpha} + \frac{gh_0}{2},$$

$$l_3 \sin \gamma - \mu l_3 \cos \gamma + \frac{1}{4}(l_1 \sin \alpha - \mu l_1 \cos \alpha) = -\frac{1}{2}\sqrt{h_0^2 + l_1 h_0 \sin \alpha - \mu l_1 h_0 \cos \alpha} + \frac{h_0}{2}. \quad (5)$$

Рознесемо в (5) кути α і γ по різні сторони рівняння:

$$\sin \gamma - \mu \cos \gamma = -\frac{\sqrt{h_0^2 + l_1 h_0 \sin \alpha - \mu l_1 h_0 \cos \alpha}}{2l_3} + \frac{h_0}{2l_3} - \frac{l_1 \sin \alpha - \mu l_1 \cos \alpha}{4l_3} \quad (6)$$

Позначивши праву частину рівняння (6) через c , отримаємо рівняння виду $\sin \gamma - \mu \cos \gamma = c$, яке розв'яжемо аналогічно до (3):

$$\gamma = 2 \arctg \left(\frac{-1 + \sqrt{1 + (\mu^2 - c^2)}}{\mu - c} \right) + 2\pi k, \quad \text{де}$$

$$c = \frac{h_0 - \sqrt{h_0^2 + l_1 h_0 \sin \alpha - \mu l_1 h_0 \cos \alpha}}{2l_3} - \frac{l_1 \sin \alpha - \mu l_1 \cos \alpha}{4l_3} \quad (7)$$

Таким чином рівняння (4) і (7) визначають залежності кутів β і γ від кута α .

Наведені рівняння дають змогу виконати розрахунок параметрів пристрою гравітаційного спуску, при яких виключається травмування та передчасне сходження зерна, шляхом визначення оптимальних кутів нахилу розгінної та гальмівних ділянок у кожній окремій ситуації. Беручи до уваги кінцеві рівняння (4) та (7), проведемо аналіз характеру зміни кутів нахилу β і γ двох гальмівних каналів при варіативній зміні визначальних факторів, що формують їх величини: α , μ , l_1 , l_2 та l_3

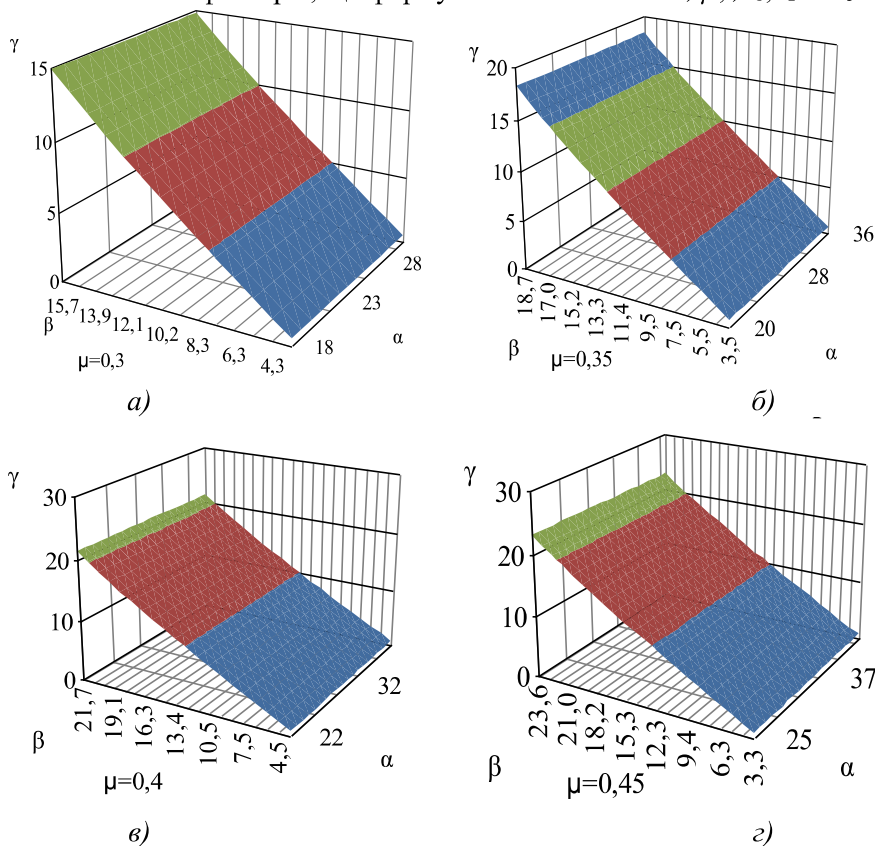


Рис. 2. Характер зміни кутів β і γ двох гальмівних каналів при варіюванні коефіцієнта тертя μ , кута нахилу розгінного каналу α та значення довжин каналі: $l_1 = 3$ м, $l_2 = 2$ м та $l_3 = 1$ м: а) $\mu = 0,3$; б) $\mu = 0,35$; в) $\mu = 0,4$; з) $\mu = 0,45$.

Під час дослідження брали до уваги такі діапазони зміни факторів впливу: $\alpha = 15 \dots 55^\circ$, $\mu = 0,3 \dots 0,45$, $l = 0,5 \dots 3 \text{ м}$, $h_0 = 0,1 \text{ м}$. Межі значень коефіцієнту тертя-ковзання μ були вибрані так, щоб врахувати увесь діапазон зміни залежно від рівня вологості, виду зернових та типу матеріалу жолобів гравітаційного пристрою. Довжини жолобів обрали за двома варіантами: перший – довжина розгінної ділянки рівна сумі довжин гальмівних, тобто $l_1=l_2+l_3$ (рис. 2); другий – всі довжини є однаковими, $l_1=l_2=l_3$ (рис. 3).

Графічне відображення результатів аналітичного аналізу характеру зміни кутів нахилу β і γ гальмівних ділянок представлено у вигляді серії просторових поверхонь відгуку на рисунках 2 і 3. Усі поверхні характеризують лінійну монотонну зміну кутів β і γ від кута α . Спільною характеристикою усіх поверхонь є яскраво виражена тенденція до зменшення кутів β і γ зі зростанням кута нахилу α розгінної ділянки каналу та зменшенні коефіцієнту тертя μ .

Зростання кута нахилу розгінної ділянки та зменшення коефіцієнта тертя-ковзання зумовлює зростання швидкості руху зернового потоку, що обумовлює лінійне зменшення кутів на гальмівних ділянках (рис 2, а-г). Це забезпечує збереження швидкості сходу зерна з гравітаційної установки рівній початковій швидкості зернового потоку при падінні зерна у розгінний канал. Підвищення гальмівного впливу на зерновий потік, а отже і більш поступове і менш різке зменшення кутів β і γ відносно кута α досягається за рахунок збільшення коефіцієнту тертя-ковзання μ (рис. 2), що може бути реалізовано зміною якості та шорсткості поверхні гальмівного каналу та іншого виду зернових.

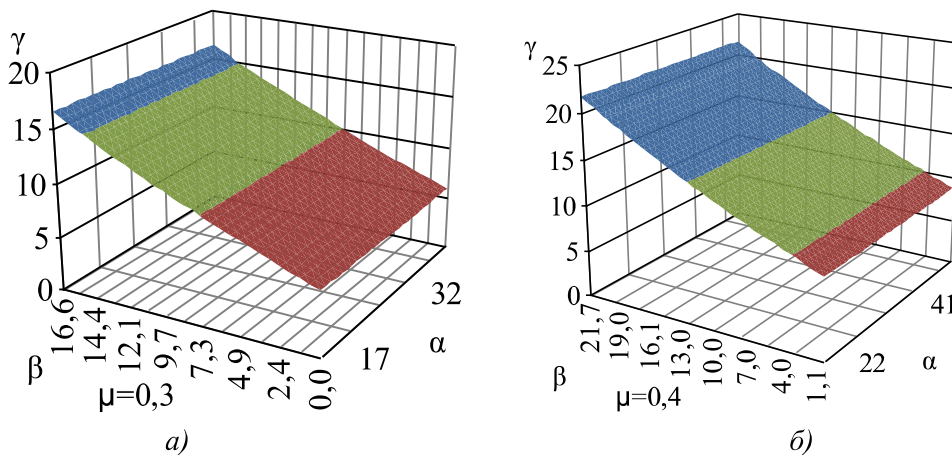


Рис. 3. Характер зміни кутів β і γ двох гальмівних каналів при варіюванні коефіцієнта тертя μ , кута нахилу розгінного каналу α та значення довжин каналів: $l_1 = l_2 = l_3 = 1 \text{ м}$: а) $\mu = 0,3$; б) $\mu = 0,4$.

Дослідження впливу співвідношень довжин розгінної та гальмівних ділянок на значення кутів показали, що за умови $l_1=l_2+l_3$ виконується наступна нерівність $\alpha > \beta > \gamma$ (рис. 2) і установка має вигляд згідно рисунку 1, б. За іншого варіанту, при $l_1=l_2=l_3$ має місце нерівність $\alpha > \beta < \gamma$ (рис. 3) і гальмівна установка має вигляд відповідно рисунку 1, а. Співвідношення, коли $\beta < \gamma$ пояснюється потребою у збільшенні кута нахилу γ для уникнення передчасної зупинки зерна на другій гальмівній ділянці, це запобігає його згруженню і передчасному сходу. Така конструктивна особливість, щодо різних варіантів нахилу гальмівних ділянок (рис. 1), залежить від співвідношення їх довжин і може бути використана для задоволення різних виробничих потреб під час завантаження зерна у ємності різних типів.

Висновки

Для контрольованого зменшення швидкості руху зерна по гравітаційній установці за рахунок забезпечення рівності початкової та кінцевої швидкості були знайдені та обґрунтовані математичні співвідношення (4), (7) між трьома кутами нахилу розгінної та двох гальмівних ділянок прямого каналу установки.

Співвідношення між кутами нахилу α , β і γ у першу чергу визначаються коефіцієнтом μ , який залежить від виду зернових, їх рівня вологості та шорсткості матеріалу жолобів гравітаційного завантажувального пристрою. Довжини відповідних ділянок l_1 , l_2 та l_3 також суттєво впливають на співвідношення між кутами нахилу та форму самої гравітаційної установки.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження будуть направлені на побудову моделі швидкості руху зерна по відкритому гвинтовому каналі з трьома змінними кутами нахилу.

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 characteristics associated with lodging resistance in wheat. *The Crop Journal*, 1 (1), 43–49. doi: 10.1016/j.cj.2013.07.012
2. 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
3. Sukhanova, M. V. (2020). Obosnovaniye primeneniya rabochikh organov dlya snizheniya travmirovaniya i intensivifikatsii predposevnoy obrabotki semyan. *Vestnik Agrarnoy Nauki Dona*, 3 (51), 4–10. [In Russian].
4. Goryushinsky, I. V., & Mosina, N. N. (2001). K voprosu otsenki protsessa zagruzki yemkostey sypuchimi materialami. *Sbornik Nauchnyh Trudov Studentov, Aspirantov i Molodyh Uchenykh SamIITa*, 3, 83–84. [In Russian].
5. Tarasenko, A. P., Orobinskij, V. I., Gievskij, A. M., Baskakov, I. V., Chernyshov, A. V., & Haritonov, M. K. (2019). Snizhenie travmirovaniya zerna pri posleuborochnoj obrabotke. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*, 1 (45), 63–68. [In Russian].
6. Tarasenko, A. P., Orobinsky, V. I., Gievsky, A. M., & Merchalova, M. E. (2012). Sovershenstvovaniye sredstv mekhanizatsii dlya polucheniya kachestvennogo zerna. *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*, 3, 109–115 [In Russian].
7. Tarasenko, A. P., & Zharkikh, V. Yu. (2015). Obzor tekhnicheskikh resheniy dlya ravnomernoy zagruzki zernoochistitel'nykh mashin. *Nauchno – Issledovatel'skie Publikatsii*, 1, 76–81. [In Russian].
8. Derevyanko, D. A., Sukmanyuk, O. V., Sarana, V. V., & Derevyanko, O. D. (2020). Obgruntuvannya vplyvu robochykh orhaniv zernozbyralnykh kombayniv na poshkodzhennya i yakist nasinnya. *Visnyk Ahrarnoyi Nauky*, 2 (803), 64–71. doi: 10.31073/agrovisnyk202002-10 [In Ukrainian].
9. Omarov, A., Müller, P., & Tomas, J. (2013). Untersuchung des Einflusses der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf das deformations- und bruchverhalten von weizenkörnern. *Chemie Ingenieur Technik*, 85 (6), 907–913. doi: 10.1002/cite.201200054
10. Melnyk, V. I., & Samoilenko, T. V. (2018). Analiz napryamkiv udoskonalennya konstruktsiy prystroyiv dlya zavantazhennya sylosiv. *Inzheneriya Pryrodokorystuvannya*, 1 (9), 83–91. [In Ukrainian].
11. Dancey, C. L., Diplas, P., Papanicolaou, A., & Bala, M. (2002). Probability of Individual Grain Movement and Threshold Condition. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128 (12), 1069–1075. doi: 10.1061/(asce)0733-9429(2002)128:12(1069)
12. Pylypaka, S., Nesvidomin, V., Zaharova, T., Pavlenko, O., & Klendiy, M. (2019). The Investigation of Particle Movement on a Helical Surface. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II*, 671–681. doi: 10.1007/978-3-030-22365-6_67
13. Borshchev, V. Ya., Dolgunin, V. N., & Dronova, M. Yu. (2005) Kaskadnaya gravitatsionnaya separatsiya zernistykh materialov: Osobennosti tekhnologii i modelirovaniye. *Vestnik Tambovskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta*, 4, 903–909 [In Russian].
14. 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].
15. 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
16. Arendarenko, V. M., Antonets, A. V., Savchenko, N. K., Samoilenko, T. V., & Ivanov, O. M. (2020). Rozrakhunkova model hravitatsiinoho rukhu zernovoho materialu v pokhylomu kanali z dyskretno zminnym kutom nakhylu. *Visnyk Poltavskoi Derzhavnoi Ahrarnoi Akademii*, 4, 273–282. doi: 10.31210/visnyk2020.04.35 [In Ukrainian].
17. Samoilenko, T. V., Arendarenko, V. M., & Antonets, A. V. (2020). Kinematyka rukhu zerna po spiralnomu prystroiu zi zminnym kutom spusku. *Visnyk Poltavskoi Derzhavnoi Ahrarnoi Akademii*, 1, 267–274. doi: 10.31210/visnyk2020.01.31 [In Ukrainian].
18. Samoylenko, T. V., Antonets, A. V., Arendarenko, V. M., & Melnyk, V. I. (2021). Modelyuvannya udarnoyi vzayemodiyi zerna z plaskoyu tverdoyu poverkhneyu. *Inzheneriya Pryrodokorystuvannya*, 1 (19), 63–68. doi: 10.37700/enm.2021.1(19).63-68 [In Ukrainian].

19. Samoilenko, T. V., Arendarenko, V. M., Antonets, A. V., & Koshova, O. P. (2021). Pro udarnu vzaiemodiiu padaiuchoho zerna pshenytsi na zhorstku betonnu osnovu sylosu. *Visnyk Poltavskoi Derzhavnoi Ahrarnoi Akademii*, 2, 259–265. doi: 10.31210/visnyk2021.02.34 [In Ukrainian].

20. 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

Стаття надійшла до редакції: 15.08.2021 р.

Бібліографічний опис для цитування:

Антонець А. В., Флегантов Л. О., Іванов О. М., Арндаренко В. М., Кошова О. П. Дослідження контрольованого гравітаційного руху зерна у похилому каналі з трьома змінними кутами нахилу. *Вісник ПДАА*. 2021. № 2. С. 265–273.

© Антонець Анатолій Вікторович, Флегантов Леонід Олексійович,
Іванов Олег Миколайович, Арндаренко Володимир Миколайович,
Кошова Оксана Петрівна, 2021