




original article | 631.361:631.53.01 | doi: 10.31210/visnyk2020.04.35

CALCULATION MODEL OF GRAIN GRAVITATION MOVEMENT IN SLOPING PASSAGE WITH DISCRETE VARIABLE INCLINATION ANGLE


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)


N. K. Savchenko

ORCID  [0000-0002-0917-7553](https://orcid.org/0000-0002-0917-7553)

T. V. Samoilenko

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

O. M. Ivanov

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

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

*Corresponding author

E-mail: anatoliyantone1@gmail.com

How to Cite

Arendarenko, V. M., Antonets, A. V., Savchenko, N. K., Samoilenko, T. V., & Ivanov, O. M. (2020). Calculation model of grain gravitation movement in sloping passage with discrete variable inclination angle. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, (4), 273–282. doi: 10.31210/visnyk2020.04.35

The wholeness of grain loaded into the silo depends on the method of its delivery to the concrete bottom of this structure. Special devices are used for this purpose. They can operate on the principle of emptying, rain, and with the use of braking devices. Peripheral open screw passages slow down the movement of grain, but it is unknown how the angle of brake section depends on the angle of acceleration section of the device. The purpose of this work is to investigate theoretically the movement of grain flow in an installation with discretely variable inclination angles of acceleration and brake trays. The main task was to substantiate the dependence of inclination angle of the brake tray on inclination angle of the acceleration tray. To study the movement of grain on sloping areas and reduce its injury, a gravitation installation consisting of acceleration and brake trays (open trays) has been proposed in this article. Grain flow accelerates its speed to V_{\max} on acceleration tray passing the way l_1 along the acceleration tray, which is located at an angle α to the horizon. This occurs as a result of the transition of part of grain potential energy $E_{n1} = mgl_1 \sin \alpha$ to kinetic energy due to the inclination of the acceleration tray at an angle of α . In the second section, the grain slows down. That is, it begins to move without acceleration. The speed of grain pouring in the storage hopper becomes close to the initial speed of grain material on the acceleration tray. For the normal grain flow movement along the entire length of the acceleration and brake trays, it is necessary that the angles α and β are bigger than the angle of the natural slope ζ . Grain flow movement along the brake tray having the length l_2 placed at an angle β to the horizon, is due to the previously acquired maximum kinetic energy and grain potential energy $E_{n2} = mgl_2 \sin \beta$. Thus, using the installation with discretely variable angles of acceleration and brake trays, it is possible to conduct experiments to study the speed of different types of grain material movement in the final stage of loading cylindrical tanks.

Key words: grain material movement, acceleration and brake trays, inclination angle.

РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ГРАВІТАЦІЙНОГО РУХУ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ В ПОХИЛОМУ КАНАЛІ З ДИСКРЕТНО ЗМІННИМ КУТОМ НАХИЛУ

В. М. Арендаренко, А. В. Антонець, Н. К. Савченко, Т. В. Самойленко, О. М. Іванов

Полтавська державна аграрна академія, м. Полтава, Україна

Цілісність зерна, що завантажується в силос, залежить від способу доставки його на бетонне дно цієї споруди. Для цього використовуються спеціальні пристрої. Вони можуть працювати за принципом пересипання, дощу, та з використанням гальмівних пристроїв. Периферійні відкриті гвинтові канали сповільнюють рух зернового матеріалу, але невідомо, як залежить кут гальмівної ділянки від кута розгінної ділянки пристрою. Метою цієї роботи є теоретичне дослідження руху зернового потоку в установці із дискретно змінними кутами нахилу розгінного і гальмівного жолобів. Основне завдання: обґрунтувати залежність кута нахилу гальмівного жолоба від кута нахилу розгінного жолоба. Для дослідження руху зернового матеріалу по похилим площинам та зменшення його травмування в цій статті запропонована гравітаційна установка, котра складається з розгінного і гальмівного жолобів (відкритих лотків). На розгінному жолобі зерновий потік прискорює свою швидкість до V_{\max} , проходячи шлях l_1 по розгінному жолобу, який розташований під кутом α до горизонту.

Це відбувається в результаті переходу частини потенціальної енергії зерна $E_{n1} = mgl_1 \sin \alpha$ в кінетичну за рахунок нахилу розгінного жолоба під кутом α . На другій ділянці зерновий матеріал сповільнює свій рух. Тобто він починає рухатись без прискорення. Швидкість сходу зерна в накопичувальний бункер набуває значення, близького до початкової швидкості руху зернового матеріалу по розгінному лотку. Для нормального руху зернового потоку по всій довжині розгінного і гальмівного лотків необхідно, щоб кути α і β були більшими від кута природного відкосу ζ . Рух зернового потоку по гальмівному жолобу довжиною l_2 , розміщеного під кутом β до горизонту, відбувається за рахунок попередньо набутої максимальної кінетичної енергії та потенційної енергії зерна $E_{n2} = mgl_2 \sin \beta$. Отже, використовуючи установку з дискретно змінними кутами розгінного і гальмівного жолобів, можна проводити дослід з вивчення швидкості руху різного виду зернового матеріалу у завершальній стадії завантаження циліндричних ємностей.

Ключові слова: рух зернового матеріалу, розгінний та гальмівний жолоб, кут нахилу.

Вступ

У сільському господарстві багато технологічних процесів транспортування, сепарації, класифікації сипучих матеріалів та завантаження різних ємностей зерном виконуються в режимі стрімкого гравітаційного руху. Як правило, такий рух супроводжується енергійною взаємодією частинок зернового матеріалу між собою. Внаслідок цього з'являються технологічно значущі ефекти, пов'язані як із розділенням, так і зі змішуванням цих частинок [1–8]. Іншою характеристикою зернових потоків є наявність у них умови швидкого зсуву зернівок [9, 10]. Зсув призводить до того, що зерновий матеріал, рухаючись у потенційному полі Землі, набуває чималої швидкості хаотичного переміщення. Особливо ці явища проявляються під час завантаження ємностей зерном з використанням відкритих гвинтових каналів [11–14].

Питанню теоретичного обґрунтування закономірностей швидких гравітаційних рухів зернових матеріалів по похилій поверхні присвячена значна кількість наукових праць [8, 15–18]. Їхній аналіз вказує на те, що всі роботи присвячені дослідженню руху сипких матеріалів на похилих площинах з одним кутом їх нахилу до горизонту, але не проводилися дослідження з вивчення реакції сипкого матеріалу на установках зі змінними кутами нахилу двох лотків.

Заповнення циліндричних ємностей (силосів) зерном або іншим сипким матеріалом на елеваторах є початковою ланкою всієї транспортної системи підприємства [19]. Як відомо, процес функціонування силосних сховищ включає такі технологічні етапи: завантаження, зберігання зернового матеріалу протягом певного часу і його розвантаження. Завантаження силосів зерном здійснюється за допомогою різних транспортних машин. Робочі органи транспортних машин при взаємодії із зерновим матеріалом можуть зіпсувати деяку частину зерна. Для зменшення кількості травмованого зерна, осо-

бливо при завантаженні високих ємностей, необхідно використовувати пристрої [11, 12], котрі не пошкоджують зернівки зернового вантажу. На кафедрі технології та обладнання переробних і харчових виробництв Полтавської державної аграрної академії був розроблений завантажувальний пристрій для завантаження силосів зерном. На цей пристрій був отриманий патент на корисну модель [12]. Робочим органом цього пристрою є периферійний відкритий гвинтовий канал (ПВГК) зі змінними кутами нахилу гвинтової лінії. Для дослідження руху сипкого зернового середовища, у якому присутні безліч зернівок, а простір між ними заповнений повітрям, необхідно мати гравітаційну лабораторну установку, у якій робочі лотки (жолоби) мали би змінні кути нахилу до горизонту. Такі дослідження дозволять отримати необхідні кути нахилу при розгоні і гальмуванні зернових потоків у ПВГК.

Метою цієї роботи є теоретичне дослідження руху зернового потоку в установці із дискретно змінними кутами нахилу розгінного і гальмівного жолобів.

Матеріали і методи досліджень

Гравітаційна установка (рис. 1) з дослідження руху зернового матеріалу складається із бункера для зберігання зернового матеріалу 1, шиберної заслінки 2, розгінної ділянки 3 каналу спуску, рухомого циліндричного шарніра 4, гальмівної ділянки 5 каналу спуску, нерухомої 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.

Ділянки каналу виготовлені з листової сталі довжиною $l_1=l_2=1,5$ м. Профіль ділянок каналу мають форму напівциліндра і повернуті відкритою стороною нагору. Внутрішня робоча поверхня каналу має поверхню з певним рівнем шорсткості, що обумовлюється якістю конструктивного листового матеріалу. Канал пофарбований у темно-коричневий відтінок.

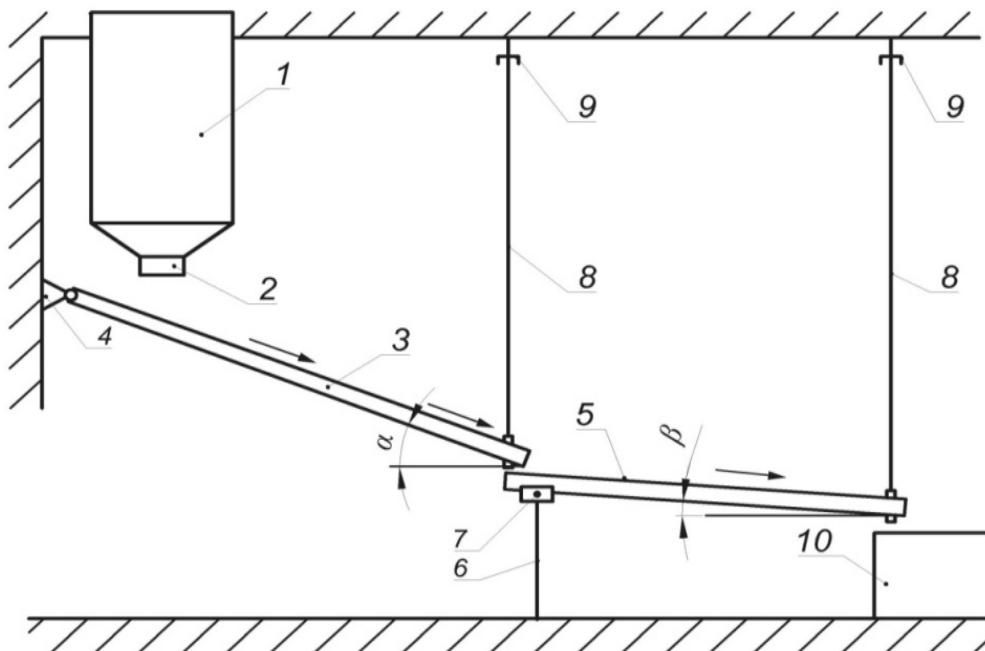


Рис. 1. Лабораторна установка для дослідження руху зернового матеріалу на розгінному і гальмівному лотках

Дві ділянки каналу розташовуються у просторі за допомогою еластичних тяг 8, які кріпляться на протилежних кінцях ділянок каналу та мають можливість змінювати свою довжину завдяки використанню регулюючих тяг 9. При цьому корегування довжин тяг може здійснюватися незалежно одна від одної, що дає змогу змінювати кут нахилу ділянок каналу у вертикальній площині відносно горизонту, тим самим змінюючи умови гравітаційного руху зернової маси в окреслених ділянках.

Як правило, розгінна ділянка встановлюється під кутом α , а гальмівна – під кутом β . Причому $\alpha > \beta$. Розгінна ділянка біля бункера 1 кріпиться до нерухомої стінки за допомогою обертової кінематичної

пари п'ятого класу 4. Гальмівна ділянка каналу з однієї сторони встановлюється на каретку 7, яка може переміщатись уздовж нерухомої стійки 6 вгору або вниз. Плавний перехід від кута α до кута β здійснюється за рахунок геометрії розгінної і гальмівної ділянки каналу в місці їхнього з'єднання.

Лабораторна установка функціонує таким чином. У ємність 1 засипається певний об'єм зерна (наприклад, пшениці) вагою G . Після відкриття шиберної заслінки зернова маса з фіксованої висоти падає на верхню частину розгінної ділянки спускного каналу. На цій ділянці зерновий матеріал рухається в режимі швидкого гравітаційного руху. Такий режим руху зернового матеріалу характеризується хаотичним переміщенням окремих зернівок по всій довжині розгінної ділянки каналу, з активною взаємодією зернівок одна з одною.

У механіці швидкого зсувного руху сипучих матеріалів використовується термін «температура зернового середовища», яка характеризує енергію взаємного переміщення зернівок уздовж розгінної і гальмівної ділянки спускного каналу. Із вищенаведеного випливає, що ступінь активності взаємних переміщень зернових частинок двофазного суцільного середовища залежить від кутів установки розгінної і гальмівної ділянки каналу.

На другій ділянці зерновий матеріал сповільнює свій рух. Тобто він починає рухатись без прискорення. Швидкість сходу зерна в накопичувальний бункер 10 набуває значення, близького до початкової швидкості руху зернового матеріалу по розгінній ділянці каналу. Для нормального руху зернового потоку по всій довжині розгінної і гальмівної ділянки необхідно, щоб кути α і β були більшими від кута природного відкосу ζ [20–25].

Результати досліджень та їх обговорення

Будемо розглядати рух зерна по розгінній і гальмівній ділянці як певну ламінарну течію з різними швидкостями руху шарів. Зокрема, при русі зерна виникає внутрішнє тертя всередині зернового потоку і зовнішнє тертя, яке виникає між каналом і зовнішнім шаром маси зерна. Будемо вважати, що потік зерна висипається з бункера рівномірно та з однаковою швидкістю, тобто маємо стаціонарний потік. З рівняння нерозривності течії $V \cdot S = const$, врахувавши однакові поперечні перерізи обох жолобів, отримаємо умову забезпечення стаціонарності потоку на обох ділянках. А саме, необхідно, щоб кінцева швидкість зерна на кінці гальмівної ділянки була не менша, ніж початкова швидкість потоку на початку розгінної ділянки, тобто $V_{поч} \leq V_{кін}$. Ця умова забезпечить проходження зерна без його згруження на певній гальмівній ділянці. Для спрощення подальших розрахунків будемо вважати, що ці швидкості рівні між собою $V_{поч} = V_{кін} = V_0$.

Початкову швидкість V_0 зерно набуває в результаті падіння з отвору бункера, що розміщений на висоті h_0 від краю каналу на розгінній ділянці. В момент падіння маси з отвору бункера на початковий край каналу відбувається перехід її потенційної енергії в кінетичну, в результаті чого зерно набуває швидкості V_0 . Використовуючи закон збереження енергії, маємо $mgh_0 = \frac{mV_0^2}{2}$. З цієї форму-

ли можна легко визначити початкову швидкість зерна $V_0 = \sqrt{2gh_0}$.

Продовжуючи рух, зерновий потік прискорює свою швидкість до V_{max} , проходячи шлях l_1 по розгінній ділянці, що розташована під кутом α до горизонту. Це відбувається в результаті переходу частини потенційної енергії зерна $E_{n1} = mgl_1 \sin \alpha$ в кінетичну за рахунок кута α нахилу розгінної ділянки. Необхідно також врахувати силу тертя між шаром зерна та поверхнею каналу з коефіцієнтом тертя μ , яка чинить спротив розгону зернової маси. Використавши закон збереження енергії, а також, врахувавши роботу сили тертя $A_1 = \mu mgl_1 \cos \alpha$, маємо спрощене рівняння, що описує перетворення енергії зернового потоку 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 гальмівній ділянці довжиною l_2 , розміщеної під кутом β до горизонту, відбувається за рахунок попередньо набутої максимальної кінетичної енергії та потенційної енергії зерна $E_{n2} = mgl_2 \sin \beta$. Водночас цьому процесу протидіє робота сили тертя $A_2 = \mu mgl_2 \cos \beta$, яка за рахунок меншого кута нахилу гальмівного жолобу β ($\beta \leq \alpha$) є вже значно більшою і спричиняє зменшення швидкості руху зернового потоку з V_{\max} до V_0 . Із закону збереження енергії маємо спрощене рівняння для гальмівної ділянки:

$$\frac{mV_{\max}^2}{2} + mgl_2 \sin \beta - \mu mgl_2 \cos \beta = \frac{mV_0^2}{2}.$$

Для знаходження співвідношення, що визначатиме математичну залежність між кутами нахилу розгінної та гальмівної ділянки α і β розв'яжемо таку систему рівнянь:

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

Прирівнявши друге і третє рівняння системи (1) та спростивши вираз отримаємо:

$$\frac{mV_0^2}{2} + mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha + mgl_2 \sin \beta - \mu mgl_2 \cos \beta = \frac{mV_0^2}{2} \quad (2)$$

$$mgl_1 \sin \alpha - \mu mgl_1 \cos \alpha + mgl_2 \sin \beta - \mu mgl_2 \cos \beta = 0$$

$$l_1 \sin \alpha + l_2 \sin \beta = \mu l_1 \cos \alpha + \mu l_2 \cos \beta \quad (3)$$

Рознесемо кути α і β по різні сторони рівняння (3):

$$l_2 \sin \beta - \mu l_2 \cos \beta = \mu l_1 \cos \alpha - l_1 \sin \alpha$$

$$\sin \beta - \mu \cos \beta = \frac{l_1}{l_2} (\mu \cos \alpha - \sin \alpha) \quad (4)$$

При заданому куті α для розгінної ділянки права сторона рівняння (4) буде сталою. Позначивши праву частину рівняння (4) через b , отримаємо тригонометричне рівняння виду $\sin \beta - \mu \cos \beta = b$. Розв'яжемо це рівняння за допомогою переходу до половинного кута:

$$2 \sin \frac{\beta}{2} \cos \frac{\beta}{2} - \mu \cos^2 \frac{\beta}{2} + \mu \sin^2 \frac{\beta}{2} = b \sin^2 \frac{\beta}{2} + b \cos^2 \frac{\beta}{2}$$

$$(\mu - b) \sin^2 \frac{\beta}{2} - (\mu + b) \cos^2 \frac{\beta}{2} + 2 \sin \frac{\beta}{2} \cos \frac{\beta}{2} = 0$$

$$(\mu - b) \operatorname{tg}^2 \frac{\beta}{2} + 2 \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} - (\mu + b) = 0$$

Уведемо заміну $y = tg \frac{\beta}{2}$ і розв'яжемо отримане рівняння:

$$(\mu - b)y^2 + 2y - (\mu + b) = 0$$

$$D = 4 + 4(\mu^2 - b^2)$$

$$y = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + (\mu^2 - b^2)}}{\mu - b}$$

Повернувшись до заміни маємо:

$$tg \frac{\beta}{2} = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + (\mu^2 - b^2)}}{\mu - b}$$

$$\frac{\beta}{2} = arctg \left(\frac{-1 \pm \sqrt{1 + (\mu^2 - b^2)}}{\mu - b} \right) + \pi k$$

$$\beta = 2arctg \left(\frac{-1 \pm \sqrt{1 + (\mu^2 - b^2)}}{\mu - b} \right) + 2\pi k$$

$$\beta = 2arctg \left(\frac{-1 \pm \sqrt{1 + (\mu^2 - \left(\frac{l_1}{l_2}(\mu \cos \alpha - \sin \alpha)\right)^2)}}{\mu - \frac{l_1}{l_2}(\mu \cos \alpha - \sin \alpha)} \right) + 2\pi k$$

Беремо до уваги, що кути нахилу α і β завжди будуть лежати в межах від 0 до $\frac{\pi}{2}$, тоді остаточно отримаємо рівняння, що описує залежність між кутами α і β :

$$\beta = 2arctg \left(\frac{-1 + \sqrt{1 + (\mu^2 - \left(\frac{l_1}{l_2}(\mu \cos \alpha - \sin \alpha)\right)^2)}}{\mu - \frac{l_1}{l_2}(\mu \cos \alpha - \sin \alpha)} \right) + 2\pi k \quad (5)$$

Отримане співвідношення можна значно спростити, якщо розглянути окремо випадок $l_1 = l_2 = l$, тобто прийняти довжини гальмівної та розгінної ділянки однаковими. Тоді з рівняння (3) маємо:

$$\begin{aligned} \sin \alpha + \sin \beta &= \mu \cos \alpha + \mu \cos \beta \\ 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2} &= 2\mu \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2} \end{aligned}$$

$$\sin \frac{\alpha + \beta}{2} = \mu \cos \frac{\alpha + \beta}{2}$$

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha + \beta}{2} = \mu$$

$$\beta = 2 \operatorname{arctg} \mu - \alpha$$

Беручи до уваги кінцеве рівняння (5), проведемо аналіз характеру зміни кута нахилу гальмівного каналу при варіативній зміні визначальних факторів, що формують його величину.

Так, при аналізі бралися до уваги три фактори, а саме: кут нахилу розгінної ділянки каналу α , коефіцієнт тертя зерна об поверхню каналу μ та величина співвідношення довжини каналів з різним характером впливу на швидкість переміщення зернового потоку. Останній фактор враховується у залежності (5) шляхом застосування такої заміни:

$$n = \frac{\ell_1}{\ell_2}.$$

Під час проведення аналізу зважали на такі діапазони зміни факторів впливу: $\alpha = 28^\circ \dots 54^\circ$, $\mu = 0,3 \dots 0,65$, $n = 0,1 \dots 1$. За нижню межу діапазону зміни кута нахилу розгінної ділянки було вибране таке кутове положення, що відповідає куту природного відкосу для пшениці, при якому зерновий потік унаслідок значного внутрішнього тертя не має можливості переміщуватися по каналу під впливом сили тяжіння. Межі варіювання коефіцієнту тертя μ були вибрані з тієї метою, щоб покрити увесь діапазон зміни цього показника при статичному положенні зернової маси та динамічному русі зернового потоку усередині каналу. Величину коефіцієнту n вибирали в області ймовірних значень від адекватно мінімальної величини до значення, що визначає однаковість довжин ділянок спускного каналу.

Графічне відображення результатів аналітичного аналізу характеру зміни кута нахилу β гальмівної ділянки каналу представлено у вигляді серії просторових поверхонь відгуку на рисунку 2.

Усі наведені поверхні характеризують лінійну монотонну зміну кута β в усьому діапазоні зміни факторів впливу, що дає змогу віднести дані поверхні до категорії поверхонь першого роду.

Узагальненою характеристикою усіх поверхонь є яскраво виражена тенденція до зменшення кута β зі зростанням кута нахилу α розгінної ділянки каналу та зменшенні коефіцієнту тертя μ . Найбільші значення кут β набуває при симбіозі граничних значень кута $\alpha = 28^\circ$ та коефіцієнту тертя $\mu = 0,65$. Так, при коефіцієнті $n = 0,1$ куту нахилу β відповідає значення $33,5^\circ$, при $n = 0,4$ – кут $\beta = 35^\circ$, при $n = 0,7$ – кут $\beta = 36,5^\circ$, при $n = 1$ – кут $\beta = 38^\circ$.

По мірі пересування в межах зміни кута α та коефіцієнту тертя μ у взаємообернених напрямках їх зміни – збільшення кута α на фоні зменшення коефіцієнту тертя μ – відбувається поступове відхилення від окресленого максимуму кута β у бік його зменшення до досягнення мінімальних величин. Зокрема, при коефіцієнті $n = 0,1$ кут β зменшується до $13,2^\circ$, при $n = 0,4$ кут β становить $2,67^\circ$, для значень $n = 0,7$ та $n = 1,0$ кут β приймає навіть від'ємні значення $-8,4^\circ$ та $-20,6^\circ$ відповідно. При цьому в останніх двох випадках досягається нульове значення кута β , тобто гальмівна ділянка каналу розташована строго паралельно до горизонту. Таке положення може бути досягнуто при певних поєднаннях значень кута α та коефіцієнту тертя μ в проміжках їх зміни: при $n = 0,7$ $-41^\circ \leq \alpha \leq 54^\circ$ та $0,3 \leq \mu \leq 0,4$; при $n = 1,0$ $-33,4^\circ \leq \alpha \leq 54^\circ$ та $0,3 \leq \mu \leq 0,51$. Визначення комбінації кута α та коефіцієнту μ , при якому може бути досягнуто горизонтальне розташування частини каналу, зводиться до виводу в аналітичний спосіб псевдо залежності $\alpha = f(\mu)$, що визначається лінією перетину відповідної поверхні відгуку з координатною площиною $\alpha - \mu$.

Приведеному опису характеру зміни кута нахилу гальмівної ділянки спускного каналу може бути надане таке пояснення.

Зі зростанням кута спуску зернового потоку по розгінній ділянці відбувається зростання швидкості руху зернової маси, тому виникає потреба у створенні пропорційного зворотного впливу на потік зерна під час його руху по гальмівній ділянці жолобу. Це дасть змогу отримати оптимальну швидкість сходу зерна із гравітаційної установки, яка відповідає початковій швидкості потоку при завантаженні зерна в канал. Для цього необхідно зменшувати кут нахилу гальмівної ділянки, досягаючи

зміщення балансу між рушійною силою та силою тертя зернового потоку в сторону останньої, що і досягається коректуванням кутового розташування гальмівної ділянки каналу у відповідній реакції до зростання кута α .

Крім того, підвищення гальмівного впливу на зерновий потік можна досягти і за рахунок втрати енергії руху на переміщення внаслідок збільшення коефіцієнту тертя μ , що може бути реалізовано зміною якості та шорсткості стану поверхні гальмівного каналу.

Якщо аналізувати вплив на формування кута нахилу гальмівного каналу іншого фактору впливу – коефіцієнту співвідношення n довжин каналів руху, то характер формування кута β від даного показника, при однакових умовах зміни інших двох факторів, є тотожним до принципу впливу кута α . Тобто зі зростанням коефіцієнту n кут β необхідно зменшувати. Цього можна досягти такими шляхами (на прикладі двох варіантів). У першому варіанті відбувається подовження розгінного каналу при незмінній довжині іншого каналу, при даних умовах зменшення кута β обумовлено потребою компенсувати за рахунок більш пологого спуску та зростаючої сили тертя, збільшення швидкості зернового потоку, набутого при більш тривалому розгоні на подовженій ділянці розгінного каналу.

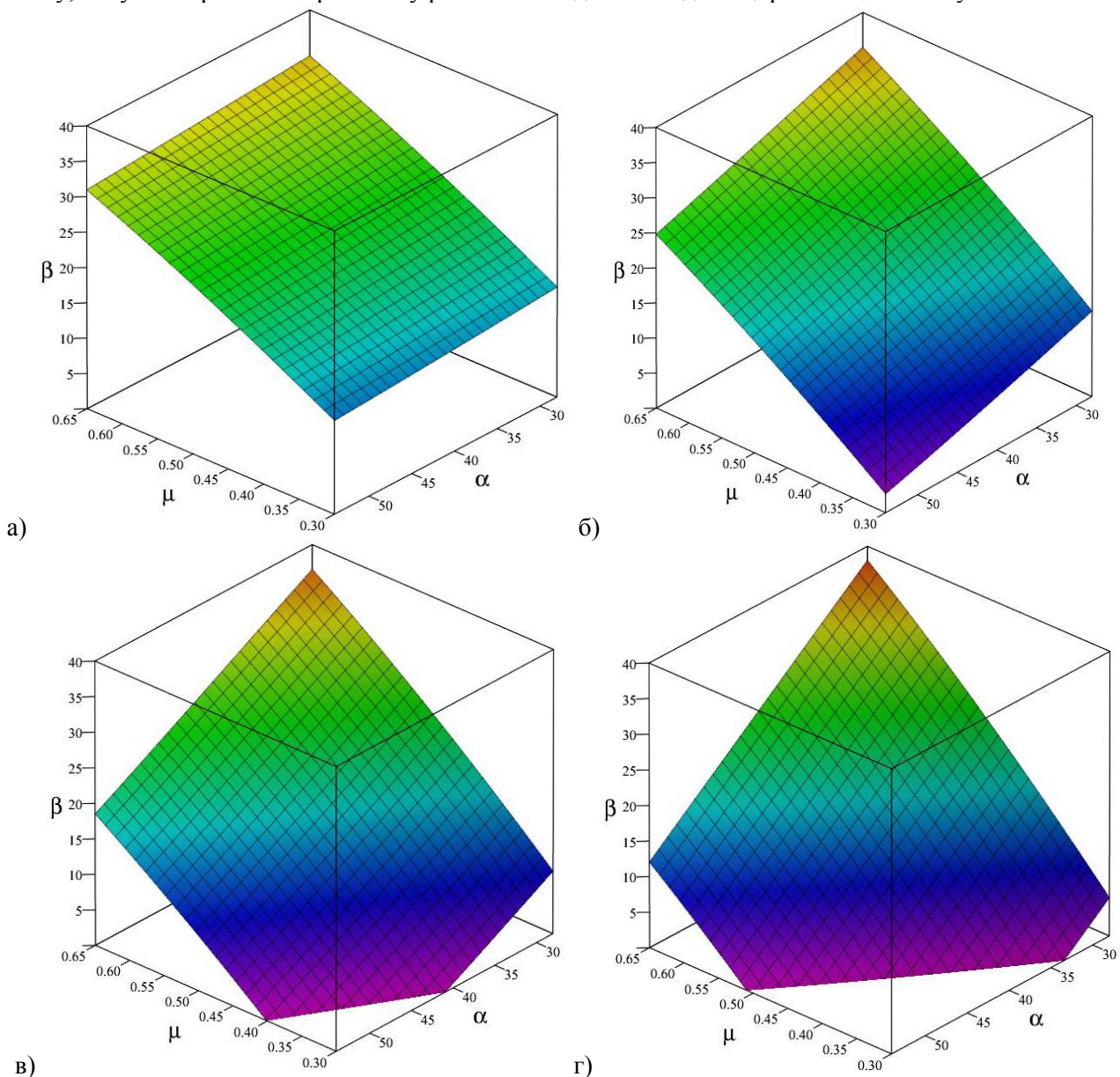


Рис. 2. Характер зміни кута нахилу гальмівного каналу β при варіюванні коефіцієнтом тертя μ , кутом нахилу розгінного каналу α та співвідношенням n довжини каналів:

a) $n=0,1$; б) $n=0,4$; в) $n=0,7$; г) $n=1,0$.

В іншому варіанті, коли відбувається зменшення довжини гальмівного каналу при сталій довжині розгінної ділянки, зменшення кута β спричинене потребою нівелювати скорочення гальмівного шляху переміщення зерна за рахунок більш пологого розташування гальмівного каналу у просторі, тим самим сприяючи виникненню значної сили тертя та зменшенню швидкості руху зернового потоку.

Висновки

Розроблена лабораторна установка дає змогу досліджувати ламінарний рух зернового матеріалу у спускному каналі, який складається із розгінної і гальмівної ділянок. Причому кут установки розгінної ділянки каналу більший від кута установки іншої ділянки. На підставі теоретичних викладок було встановлено зв'язок між кутами розташування ключових ділянок спускного каналу з наведенням функціональної залежності між ними. Згідно з отриманою залежністю та орієнтуючись на результати теоретичних досліджень, для виконання умови ідентичності швидкостей потоку зерна на сході зі спускного каналу та при русі зерна під час його завантаження в канал потрібно встановлювати гальмівну ділянку під меншим кутом, ніж розгінну частину каналу. На це впливає кілька ключових факторів: кут нахилу розгінної ділянки каналу, коефіцієнт тертя та співвідношення довжин обох ділянок каналу. Окресленні фактори мають протилежний характер впливу на формування кута нахилу гальмівної ділянки. Зокрема, для компенсації зростання швидкості руху зернового потоку при збільшенні кута нахилу розгінної ділянки необхідно зменшувати кут гальмівної ділянки або підвищувати коефіцієнт тертя зерна по поверхні каналу, що досягається зміною якості та шорсткості цієї поверхні. Крім того, формування кута нахилу гальмівного лотка залежить від співвідношення довжин розгінної та гальмівної ділянок каналу, тобто кут нахилу гальмівного жолобу повинен зменшуватися залежно від зростання величини співвідношення довжин даних ділянок.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження будуть направлені на дослідження профілів швидкостей руху зернового матеріалу вниз по відкритому гвинтовому каналу з метою зменшення травмування зерна під час завантаження його в силоси.

References

1. Мoya, 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.
2. Borshchev, V. Ya., & Dolgunin, V. N. (2006). Kharakteristiki sdvigovogo potoka zernovoy n sredi i rekomendatsii po organizatsii tekhnologicheskikh protsessov. *Vestnik Tambovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*, 12, 401–623 [In Russian].
3. Dolgunin, V. N., & Borshchev, V. Ya. (2005). *Bystrye gravitatsionnye techeniya zernistykh materialov. Tekhnika izmereniya zakonomernosti, tekhnologicheskoe primeneniye*. Moskva: Isdatelstvo Mashinostroenie-1 [In Russian].
4. Ivanets, V. N. (2011). Sravnitelnyiy analiz shem dvizheniya materialnykh potokov v smesepriготовitelnom aggregate. *Tehnika i Tehnologiya Pischevykh Proizvodstv*, 4, 86–91 [In Russian].
5. Sevidzh, S. (1985). Gravitatsionnoye techeniye nesvyazannykh granulirovannykh materialov. *Mekhanika granulirovannykh sred: Teoriya bystrykh dvizheniy* (pp. 86–146). Moskva: Mir [In Russian].
6. Sokolovskiy, V. V. (1990). *Statika syipuchey sredi*. Moskva: Nauka [In Russian].
7. Tverdokhlib, I. V. (2017). Dynamika rukhu chastynky v sypkomu zernovomu seredovyshti. *Vibracija v Tekhnici ta Tekhnologhijakh*, 3 (86), 128–135 [In Ukrainian].
8. Zenkov, R. L. (1964). *Mekhanika nasyipnykh gruzov*. Moskva: Mashinostroenie [In Russian].
9. Borshchev, V. Ya., Dolgunin, V. N., & Dronova, M. Yu. (2005). Kaskadnaya gravitatsionnaya separatsiya zernistykh materialov: Osobennosti tekhnologii i modelirovaniye. *Vestnik Tambovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*, 11 (4), 903–909 [In Russian].
10. Borshchev, V. Ya., & Dolgunin, V. N. (2006). Sdvigovogo potoka zernistoy sredi i rekomendatsii organizatsii po kharakteristikam tekhnologicheskikh protsessov. *Vestnik Tambovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*, 12 (2A), 401–408 [In Russian].
11. Fadyeyev, L. V. (2013). *Patent UA 81377*. Kyiv: Derzhavne patentne vidomstvo Ukrainy [In Ukrainian].
12. Samojienko, T. V., Ivanov, O. M., Meljnyk, V. I., & Arendarenko, V. M. (2018). *Patent UA 129364*. Kyiv: Derzhavne patentne vidomstvo Ukrainy [In Ukrainian].
13. Samoilenko, T. V., Arendarenko, V. M., & Melnyk, V. I. (2019). Teoretychne modelyuvannya

protsehu hrvativatsiynoho zavantazhennya sylosu zernom po vidkrytomu hvyntovomu kanali. *Inzheneriya Pryrodokorystuvannya*, 2 (12), 73–78 [In Ukrainian].

14. Samoylenko, T. V., Arendarenko, V. M., & Antonets, A. V. (2020). Kinematyka rukhu zerna za spiral'nym prystroyem zi zminenym kutovym spuskom. *Visnyk Poltav's'koyi Derzhavnoyi Ahrarnoyi Akademiyi*, 1, 267–274. doi: 10.31210/visnyk2020.01.31 [In Ukrainian].

15. Zaika, P. M. (1998). *Vibratsionnoe peremeshchenie tverdykh i sypuchikh tel v selskokhozvaystvennykh mashinakh. Prakticheskoe posobie*. Kiev: Izdatel'stvo USKhA [In Russian].

16. Dolgunin, V. N., Ukolov, A. A., & Klassen, P. V. (1992). Model' mekhanizma segregatsii pri bystrom gravitatsionnom dvizhenii chastits. *Teoreticheskiye Osnovy Khimicheskoy Tekhnologii*, 26 (5), 100–109 [In Russian].

17. Shatskiy, V. P., Orobinskiy, V. I., & Popov, A. Ye. (2015). Modelirovaniye dvizheniya zernovogo potoka v gravitatsionnom separatore. *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*, 4 (47), 72–79 [In Russian].

18. Mukhanov, N. V., Marchenko, S. A., Baranov, D. V., Ryabinin, V. V., & Abalikhin, A. M. (2017). Uravneniye dvizheniya zernovogo sloya v aktivnoy zone retsirkulyatsionnoy zernosushilki bunkernogo tipa. *Agrarnyy Vestnik Verkhnevolzh'ya*, 4 (21), 88–96 [In Russian].

19. Trisvyatskiy, L. A. (1985). *Khraneniyezerna*. Moskva: Agropromizdat [In Russian].

20. Flehantov, L. O., & Antonets, A. V. (2017). Komp'yuterne modelyuvannya mekhanichnoho rukhu tila zasobamy MATHCAD. *Informatsiyi Tekhnolohiyi v Osviti*, 30, 97–109. doi: 10.14308/ite000622 [In Ukrainian].

21. Boyko, D. I. (2015). Matematyehne modelyuvannya shvydkoho hrvativatsiynoho rukhu inhrediyentiv kombikormiv pry yikh zmishuvanni. *Naukovyy Visnyk Natsionalnoho Universytetu Bioresursiv i Pryrodokorystuvannya Ukrainy. Seriya: Tekhnika ta Enerhetyka APK*, 241, 213–219 [In Ukrainian].

22. Boyko, D. I. (2015). Rivnyannya dynamiky sypkoho materialu v robochij zoni zmishuvacha ta yoho rishennya. *Tekhnichnyy Servis Ahropromyslovoho, Lisovoho ta Transportnoho Kompleksiv*, 3, 75–84 [In Ukrainian].

23. Cheng, X., Gao, M., Hu, M., & Du, X. (2019). The 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.

24. 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

25. Sedov, L. I. (1970). *Mehanika sploshnyih sred*. Moskva: Nauka [In Russian].

Стаття надійшла до редакції 09.10.2020 р.

Бібліографічний опис для цитування:

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.

© Арендаренко Володимир Миколайович, Антонєць Анатолій Вікторович, Савченко Назарій Костянтиневич, Самойленко Тетяна Володимирівна, Іванов Олег Миколайович, 2020