





original article | UDC 519.876.5:633:531.66 | doi: 10.31210/visnyk2022.01.26


SUBSTANTIATION OF THE FREQUENCY OF GRAINS COLLISIONS IN A FLOW MOVING IN A GRAVITATIONAL INSTALLATION
V. M. Arendarenko


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

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

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

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

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

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

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

*Corresponding author

 E-mail: anatoliyantone1@gmail.com

How to Cite

Arendarenko, V. M., Samoilenko, T. V., Antonets, A. V., Ivanov, O. M., Yaprnyets, T. S., & Flegantov, L. O. (2022). Substantiation of the frequency of grains collisions in a flow moving in a gravitational installation. Bulletin of Poltava State Agrarian Academy, (1), 201–206. doi: 10.31210/visnyk2022.01.26

The article presents theoretical studies of the dynamics of the particles collision in a bulk grain flow moving in a gravitational installation. It is known that falling grain from a height on the concrete bottom of silos is injured. A peripheral open helical channel is available to reduce or eliminate injury. During the movement of the grains in the helical channel, they may rub or collide and be damaged. The movement of individual grains of wheat on the working surface of the helical channel is under the action of gravity. The grains are constantly in contact with each other, such interaction is characterized by a flat oblique-central impact. When considering the process of collision of two grains, the following assumption is made: the impact grains have perfectly smooth surfaces. Accordingly, according to Gauss's hypothesis, there is a connection between tangential and normal impulses, which makes it possible to determine the rate of fluctuation of grains when they collide. The Ackermann-Schen's method was used to determine the frequency of wheat grains collisions of bulk grain material. According to the above method, the average frequency of grains collisions in the bulk grain flow with their oblique-central impact depends on the angle of inclination of the screw gravity unit acceleration section. The dependence for determining the rate of grains fluctuation in their collision is obtained. The formula for determining the average frequency of grains collisions in the bulk grain flow with their obliquely central impact on the overlocking section of the installation is given. The mathematical model obtained as a result of research characterizes the average frequency of grains collisions of loose grain flow moving along the accelerating section of the peripheral open helical channel (ПОНС). The analytical model can be used in the design and installation ПОНС in the silo.

Key words: collision frequency, grain flow, gravity device

ОБҐРУНТУВАННЯ ЧАСТОТИ СПІВУДАРУ ЗЕРНІВОК У ЗЕРНОВОМУ ПОТОКУ, ЩО РУХАЄТЬСЯ У ГРАВІТАЦІЙНІЙ УСТАНОВЦІ

В. М. Арендаренко, Т. В. Самойленко, А. В. Антонець, О. М. Іванов, Т. С. Япринець, Л. О. Флегантов

Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна

У статті наведені теоретичні дослідження динаміки співудару зернівок в силі зернового середовища, який рухається у гравітаційній установці. Відомо, що падаюче зерно з висоти на бетонне

дно силосів травмується. Для зменшення травмування або його зовсім позбутись пропонується периферійний відкритий гвинтовий канал. Під час руху зернівок у гвинтовому каналі вони можуть перетиратись або співударяючись ушкоджуватись. Переміщення окремих зернівок пшениці по робочій поверхні гвинтового каналу відбувається під дією гравітації. Зернівки рухаючись весь час контактують одна з одною, така взаємодія характеризується плоским косо – центральним ударом. При розгляді процесу співудару двох зернівок зроблено наступне припущення: зернівки, що ударяються мають ідеально гладкі поверхні. Відповідно до цього, згідно з гіпотезою Гауса, між дотичними і нормальними імпульсами існує зв'язок, котрий дає можливість визначити швидкість флуктації зернівок при їх співударі. Для визначення частоти співудару зернівок пшениці сипкого зернового матеріалу застосовувався метод Аккермана-Шена. Згідно з вище вказаним методом середня частота співудару зернівок у сипкому зерновому середовищі при їх косо центральному ударі залежить від кута нахилу розгінної ділянки гвинтової гравітаційної установки. У роботі Отримана залежність для визначення швидкості флуктації зернівок при їх співударі. Наведено формулу для визначення середньої частоти співудару зернівок у сипкому зерновому середовищі при їх косо центральному ударі на розгінній ділянці установки. Отримана в результаті досліджень математична модель характеризує середню частоту співударів зернівок сипкого зернового середовища, який рухається по розгінній ділянці периферійного відкритого гвинтового каналу (ПВГК). Аналітична модель може бути використана при проектуванні та установці в силосі ПВГК.

Ключові слова: частота співудару, зерновий потік, гравітаційна установка

Вступ

Сезонність є основною особливістю при вирощуванні зернових культур і отриманні зерна [1, 2]. Тому для потреб людей необхідно створювати певні запаси зерна. Для цих цілей використовуються спеціальні сховища, в тому числі циліндричні споруди які називаються силосами.

При завантаженні силосів відбувається травмування зерна робочими органами машин, котрі доставляють його до завантажувальної горловини. Зерно також травмується при падінні на бетонну основу силосу. Багаторічними дослідженнями вітчизняних та закордонних вчених встановлено, що ушкоджене зерно має знижену стійкість при довготривалому зберіганні [3–6].

Для усунення ушкодження зерна при гравітаційному завантаженні силосів науковці та винахідники пропонують різноманітні пристрої, за допомогою яких можна зменшити швидкість падіння зерна. До таких пристроїв відносяться каскадні полиці, конусні розподільники та відцентрові розкидачі [7]. На кафедрі технології та обладнання переробних і харчових виробництв був спроектований і запатентований периферійний відкритий гвинтовий канал (ПВГК) [8]. Він складається із двох гвинтових ділянок із різними кутами нахилу до горизонту. Перша ділянка – розгінна з кутом α , а друга – гальмівна з кутом β . Причому $\beta < \alpha$ [9, 10]. В такому пристрої сипкий зерновий матеріал розділяється і складається із зерна і повітря. При цьому зернівки рухаючись по робочій поверхні гвинтового каналу весь час співударяються одна із одною. При багаторазовому зіткненні зернини набувають та втрачають кінетичну енергію, крім того при такому завантаженні можливе перетирання зерна. Перетирання зерна під час його руху залежить від багатьох факторів в тому числі від частоти співудару зернівок між собою. Отже, проблема визначення частоти співудару зернівок при гравітаційному зсуву зернового матеріалу по ПВГК є актуальною і потребує подальших досліджень.

Метою роботи є розробка математичної моделі за допомогою якої можна визначити середню частоту співудару зернівок сипкого зернового матеріалу у певному об'ємі при плоскому косоцентральному ударі зернівок між собою під час руху їх по гвинтовому каналу.

Матеріали і методи досліджень

Відомо, що при гравітаційному русі по похилим каналам механізм взаємодії зернівок сипкого зернового матеріалу на макрорівні, генерує здвигові напруження. Тому матеріалом даного дослідження є рухомий зерновий шар у якому між окремими зернівками відбувається сухе тертя та перенесення кількості руху за рахунок переміщення окремих зернівок через поверхню зсуву і їх зіткнення між собою. Дослідження проводили на гравітаційній установці [8, 11]. Для цього на розгінній ділянці ближче до гальмівної вибирився проміжок довжиною 20 см. Над вибраним проміжком встановлювалась швидкісна кінокамера, котра фіксувала переміщення зернового матеріалу на цій ділянці. Отримані результати переміщення зернового матеріалу аналізувались на предмет кількості співударів зернівок у даному зерновому об'ємі.

Результати досліджень та їх обговорення

Рух зернового матеріалу по периферійному відкритому каналі, який встановлюється на внутрішній боковій поверхні силосу, відбувається за рахунок гравітації та взаємного обміну ударними імпульсами між окремими зернівками зернового потоку. Режим руху сипкого зернового потоку регламентується фізико-механічними властивостями зерна, котре завантажується у силос. Поверхня зерна, може бути гладкою, глянцевою, шершавою, ребристою, горбистою чи зморшкуватою [12]. Ці властивості зерна впливають на режим руху сипкого зернового матеріалу.

Розглянемо процес співудару двох зернівок масою m_3 , які знаходяться у елементарному об'ємі зернового потоку і розганяються. Розрахункова схема процесу пружного співудару двох зернівок пшениці наведена на рисунку.

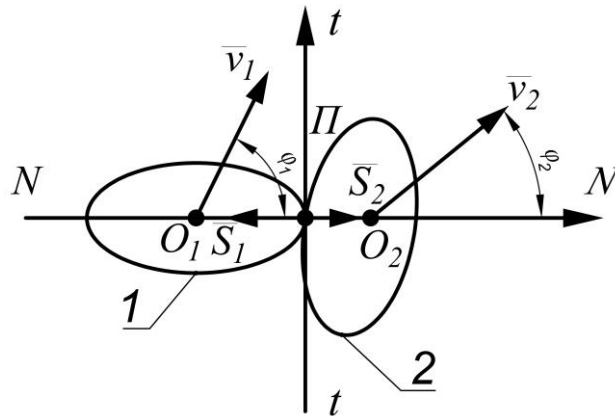


Рис. Схема ударної взаємодії двох зернівок пшениці

Для спрощення процесу переміщення окремих зернівок пшениці по робочій поверхні гвинтового каналу були прийняті наступні обмеження: лінія центрів (O_1O_2) співпадає із лінією дії імпульсів ($N-N$), швидкості центрів мас зернівок \bar{v}_1 і \bar{v}_2 не лежать на лінії (O_1O_2), а направлені під деякими кутами φ_1 і φ_2 до неї; крім того в процесі зсувного руху зернівки зберігають свою масу і форму.

Проведемо через точку дотику двох зернівок (Π) загальну дотичну $t-t$, яка буде перпендикулярною до загальної нормалі ($N-N$). Ці лінії утворюють систему координат з центром в точці Π . Для визначення ударних імпульсів позначимо одиничні вектори, які знаходяться на лініях $N-N$ і $t-t$ відповідно через \bar{i} і \bar{j} . Тоді ударний імпульс, що діє на першу зернівку: $S_1 = S \cdot \bar{i}_1$, на другу $S_2 = S \cdot \bar{i}_2$. Швидкість першої зернівки під час розгону її до удару з другою:

$$\bar{v}_1 = v_{1x_1} \cdot \bar{i}_1 + v_{1y_1} \cdot \bar{j}_1, \tag{1}$$

де $v_{1x_1} = -v_1 \cdot \cos \varphi_1$; $v_{1y_1} = v_1 \cdot \sin \varphi_1$.

Швидкість другої зернівки під час розгону її до удару з першою буде:

$$\bar{v}_2 = v_{2x_2} \cdot \bar{i}_2 + v_{2y_2} \cdot \bar{j}_2, \tag{2}$$

де $v_{2x_2} = v_2 \cdot \cos \varphi_2$; $v_{2y_2} = v_2 \cdot \sin \varphi_2$.

Для того, щоб перша зернівка ударила другу необхідно, щоб кут між лінією $t-t$ і лінією $N-N$ знаходився від 0 до 90° [13]. В нашому випадку він рівний 90° .

При подальшому розгляді процесу співудару двох зернівок зробимо наступне припущення, зернівки, що ударяються мають ідеально гладкі поверхні. Це приводить до того, що після удару вони не обертаються, тобто зернівки рухаються у зерновому потоці поступально. В такому разі у відповідності до гіпотези Гауса [13] між дотичними і нормальними імпульсами існує зв'язок:

$$\Delta u = -u' \cdot f(1 + k), \tag{3}$$

де Δu – зміна відносної дотичної швидкості; u' – швидкість флуктації (хаотичного руху) зернового матеріалу у вибраному елементарному об'ємі; f – коефіцієнт тертя ковзання між окремими

зернівками під час поступального руху по ПВГК; k – коефіцієнт відновлення. Коефіцієнт відновлення за косою співудару двох окремих зернівок масою m_3 згідно з [14, 15] характеризується зміною швидкостей до удару і після удару:

$$k = \frac{\vartheta'_{1x} - \vartheta'_{2x}}{\vartheta_1 \cdot \cos \varphi_1 - \vartheta_2 \cdot \cos \varphi_2}, \quad (4)$$

де ϑ_1, ϑ_2 – швидкість першої і другої зернівок до їх співудару; $\vartheta'_{1x}, \vartheta'_{2x}$ – швидкість першої і другої зернівок після співудару відповідно. Плоский косо центральний удар може відбутись тоді, коли $\frac{\pi}{2} < \varphi_1 < \frac{3\pi}{2}, -\frac{\pi}{2} < \varphi_2 < \frac{\pi}{2}$ [16]. Виходячи із цих умов і маючи на увазі, що $m_{3_1} = m_{3_2}$ була визначена відносна дотична швидкість зернівки при її співударі з іншою:

$$\Delta u = \vartheta_1 \cdot \sin \varphi_1 \pm \vartheta_2 \sin \varphi_2 \quad (5)$$

Підставимо (5) і (4) в (3) та отримаємо формулу для визначення швидкості флуктації зернівок при їх співударі:

$$u' = -\frac{\Delta u}{f(1+k)} = -\frac{\vartheta_1 \cdot \sin \varphi_1 \pm \vartheta_2 \sin \varphi_2}{f\left(\frac{\vartheta_1 \cos \varphi_1 - \vartheta_2 \cos \varphi_2 + \vartheta'_{1x} - \vartheta'_{2x}}{\vartheta_1 \cos \varphi_1 - \vartheta_2 \cos \varphi_2}\right)}. \quad (6)$$

Відомо, що рух окремих зернівок у потоці ПВГК має досить складний функціональний характер [5]. Із цього виходить, що сумарна кінетична енергія взаємного зсуву двох зернівок масою m_3 можна представити у вигляді суми двох енергій: поступального і хаотичного (флуктаційного) рухів зерна у периферійному відкритому гвинтовому каналі.

$$T_{\text{сум}} = T_{\text{пос.}} + T_{\text{хаот.}}, \quad (7)$$

де $T_{\text{пос.}}$ – кінетична енергія поступального руху зернівок уздовж гвинтового каналу, $T_{\text{хаот}}$ – кінетична енергія хаотичного руху зернівок по відкритому гвинтовому каналу. Складові сумарної кінетичної енергії визначаються із:

$$\begin{cases} T_{\text{пос}} = \frac{1}{2} m_3 (\Delta x)^2 \left(\frac{du}{dx}\right)^2 \\ T_{\text{хаот}} = \frac{1}{2} m_3 (u')^2 \end{cases}, \quad (8)$$

де $\Delta x = (b_1 - b_2)$ – різниця координат центрів ваги першої і другої зернівок, $\left(\frac{du}{dx}\right)$ – швидкість переміщення сипкого зернового матеріалу уздовж відкритого гвинтового каналу. Підставивши (8) у (7) і врахувавши, що $m_3 = V_3 \rho_3$ маємо:

$$T_{\text{сум}} = 0,5 V_3 \rho_3 [(b_1 - b_2)^2 \left(\frac{du}{dx}\right)^2 + (u')^2], \quad (9)$$

де V_3 – об'єм i -ї зернівки, ρ – насипна щільність зерна.

Під час зсувного руху зернового матеріалу по розгінній ділянці і особливо при переході із розгінної на гальмівну ділянку зернівки увесь час ударяються одна із одною. Середню частоту їх співударів [17] можна визначити скориставшись формулою Аккермана-Шена [18]:

$$\gamma_3 = \frac{\tau \cdot du}{E_c n_3 dx}, \quad (10)$$

де n_3 – загальна кількість зернівок у виділеному об'ємі, τ – напруження при гравітаційному зсуві зернового матеріалу уздовж ПВГК, E_c – дисипація кінетичної енергії при одному співударі двох зернівок.

Дисипація кінетичної енергії із врахуванням [13, 17–20] має вигляд:

$$E_c = \frac{1}{2} m_3 c^2 \left(\frac{1-k^2}{4} + \frac{\mu(1+k)}{\pi} - \frac{\mu^2(1+k^2)}{4} \right) (u')^2. \quad (11)$$

Або

$$E_c = \frac{1}{2} m_3 c^2 e_3 (u')^2, \quad (12)$$

де e_3 – відносна частка кінетичної енергії однієї зернівки яка дисипатує при кожному зіткненні з іншими зернівками у зерновому шарі.

Підставивши значення (12) і (6) в (10) одержимо формулу для визначення середньої частоти співудару зернівок у сипкому зерновому середовищі при їх косо центральному ударі на розгінній ділянці гравітаційної установки.

$$\gamma_3 = \frac{2\tau \left(\frac{\vartheta_1 \cos \alpha_1 - \vartheta_2 \cos \alpha_2 + \vartheta'_{1x} - \vartheta'_{2x}}{\vartheta_1 \cos \alpha_1 - \vartheta_2 \cos \alpha_2} \right)^2 du}{f^2 m_3 n_3 e_c (\vartheta_1 \sin \alpha_1 \pm \vartheta_2 \sin \alpha_2)^2 dx} \quad (13)$$

Одержані залежності швидкості флуктації зернівок при їх ударі (6) і середньої частоти співударів (13) можуть бути використані для подальшого аналізу та обґрунтування параметрів технологічного процесу завантаження силосів зерном з використанням ПВГК.

Висновки

Таким чином, можна сказати, що отримана математична модель відтворює середню частоту співударів зернівок у сипкому зерновому середовищі. Результати досліджень можуть бути використані при визначенні геометрії периферійного відкритого гвинтового каналу для обережного, не травмуючого завантаження силосів зерновим матеріалом.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження будуть направлені на виявлення впливу ударних імпульсів на структуру зерна, що завантажуються у силоси за допомогою ПВГК.

References

1. Boumans, D. (1991). *Effektivnaya obrabotka i khraneniye zerna*. Moskva: Transport [In Russian].
2. Trisvyatskiy, L. A. (1985). *Khraneniye zerna*. Moskva: Agropromizdat [In Russian].
3. Shatokhin, I. P., Orobinskiy, V. I., & Popov, A. Ye. (2015). Modelirovaniye dvizheniya potoka v gravitatsionnom separatore. *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvenogo Universiteta*, 4 (47), 72–79. [In Russian].
4. Samoilenko, T. V., Arendarenko, V. M., & Antonets, A. V. (2020). Kinematics of grain movement on a spiral device with variable angle of descent. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, (1), 267–274. doi: 10.31210/visnyk2020.01.31
5. 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
6. M. Moya, M. Guaita, P. Aguado, & F. Ayuga. (2006). Mechanical properties of granular agricultural materials, part 2. *Transactions of the ASABE*, 49 (2), 479–489. doi: 10.13031/2013.20403
7. Melnyk, V. I., & Samoilenko, T. V. (2018). Analiz napryamkiv udoskonalennya konstruktsiy prystroyiv dlya zavantazhennya sylosiv. *Inzheneriya pryrodokorystuvannya*, 1 (9), 83–91. [In Ukrainian].
8. Samoilenko, T. V., Ivanov, O. M., Meljnyk, V. I., & Arendarenko, V. M. (2018). Patent KM: 129364, Kyiv: Derzhavne patentne vidomstvo Ukrainy [In Ukrainian].
9. 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
10. 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].

11. Arendarenko, V. M., Samoilenko, T. V., & Ivanov, O. M. (2021). Investigation of grain material movement on gravitation installation trays. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, (1), 302-309. doi: 10.31210/visnyk2021.01.38
12. Khaylis, G. A. (1994). *Mekhanika rastitel'nykh materialov*. Kiev: Izdatel'stvo UAAN [In Russian].
13. Dolgunin, V.N., Borshchev V.Ya. (2005). *Bystrye gravitatsionnye techeniya zernistykh materialov: Tekhnika izmereniya zakonomernosti, tekhnologicheskoe primenenie*. Moskva: Isdatelstvo Mashinostroeniya-1 [In Russian].
14. Leybovich, N. V. (2016). *Teoriya udara v zadachakh i primerakh: uchebnoe posobiye*. Khabarovsk: Izdftel'stvo Tikhookeanskogo GU [In Russian].
15. Manzhosov, V. K. (2006). *Modeli prodol'nogo udara*. Ulyanovsk: Izdatel'stvo ULGTU [In Russian].
16. Panovko Ya. G. (1977). *Vvedeniye v teoriyu mekhanicheskogo udara*. Moskva: Nauka [In Russian].
17. Tverdokhlib I. V. (2017). Dynamika rukhu chastynky v sypkomu zernovomu seredovyshhi. *Vibracija v Tekhnici ta Tekhnologijakh*, 3 (86), 128-135 [In Ukrainian].
18. Sevidzh, S. (1985). Gravitatsionnoe techenie nesvyazannykh granulirovannykh materialov. *Mekhanika granulirovannykh sred: Teoriya bystrykh dvizheniy* (pp. 86–146). Moskva: Mir [In Russian].
19. Samoilenko, 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].
20. Samoilenko, T. V., Arendarenko, V. M., Antonets, A. V., & Koshova, O. P. (2021). On impact interaction of falling wheat grain on rigid concrete silo base. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, (2), 259-265. doi: 10.31210/visnyk2021.02.34

Стаття надійшла до редакції: 25.01.2022 р.

Бібліографічний опис для цитування:

Арендаренко В. М., Самоїленко Т.В., Антонєць А. В., Іванов О. М., Япринець Т. С., Флегантов Л. О. Обґрунтування частоти співудару зернівок у зерновому потоку, що рухається у гравітаційній установці. *Вісник ПДАА*. 2022. № 1. С. 201–206.

© Арендаренко Володимир Миколайович, Самоїленко Тетяна Володимирівна,
Антонєць Анатолій Вікторович, Іванов Олег Миколайович,
Япринець Тетяна Сергіївна, Флегантов Леонід Олексійович, 2022