

On the impact interaction of a falling corn kernel on the concrete bottom of a silo

V. Arendarenko | R. Kharak  | A. Semenov | T. Samoilenko

Article info

Correspondence Author

R. Kharak

E-mail:

ruslan.kharak@pdaa.edu.ua

Poltava State Agrarian

University,

Skovoroda Str., 1/3,

Poltava, 36000, Ukraine

Citation: Arendarenko, V., Kharak, R., Semenov, A., & Samoilenko, T. (2025). On the impact interaction of a falling corn kernel on the concrete bottom of a silo. *Scientific Progress & Innovations*, 28 (2), 266–270. doi: 10.31210/spi2025.28.02.42

The article presents a method for determining the impact interaction of a corn kernel when it falls onto a massive concrete base. It is known that at the initial stage of loading high-altitude silo structures with loose grain material, falling grains hitting the concrete bottom of the silos can be injured or completely destroyed. At the same time, the damaged grain, which will be in the lower part of the silo, begins to breathe intensively, which in turn leads to self-heating of the embankment with the subsequent possibility of monolith formation. This in turn complicates the unloading process. To determine the potential energy during the impulse interaction of individual corn kernels, the energy balance equation was used. With the help of which it was theoretically established that the potential energy of a corn kernel depends on its mass and the speed of fall. Based on experimental studies, it was found that when corn kernels of the same variety with the same physical and mechanical properties fall from significant heights, the potential energy increases linearly, that is, it increases with increasing fall height. Studies have shown that when a grain hits a stationary base, shock waves arise that propagate intensively throughout the grain. The speed of wave propagation during the impact interaction of a grain of corn with a stationary base depends on the mass of the grain and the height of the fall. Thus, when corn grains are dropped from a height of 30 meters, the speed of shock wave propagation is 110 m/s, while the total duration of the impact does not exceed 0,00016 seconds. Based on studies conducted on the fall of corn grains from different heights onto a stationary base, the dependence of the height of the grain rebound on the height of the fall was obtained. This made it possible to determine the recovery coefficient for corn grains. It is $\kappa_e = 0,455$. The obtained experimental data on the impact interaction of corn grains with a massive concrete bottom indicate that for careful loading of grain into silos without injury, it is necessary to install special brake loading devices in their middle.

Keywords: corn kernel, fall height, silo, potential energy, deformation, injury, experiment, recovery coefficient.

Про ударну взаємодію падаючої зернівки кукурудзи на бетонне дно силосу

В. М. Арендаренко | Р. М. Харак | А. О. Семенов | Т. В. Самойленко

Полтавський державний
аграрний університет,
м. Полтава, Україна

В статті наведена методика визначення ударної взаємодії зернівки кукурудзи при її падінні на масивну бетонну основу. Відомо, що на початковій стадії завантаження висотних силосних споруд сипким зерновим матеріалом падаючі зернівки ударяючись об бетонне дно силосів можуть травмуватися або повністю руйнуватися. При цьому ушкоджене зерно, котре буде знаходитись в нижній частині силосу починає інтенсивно дихати, що в свою чергу приводить до самозігрівання насипу з подальшою можливістю утворення монолітів. Це в свою чергу ускладнює процес вивантаження. Для визначення потенціальної енергії при імпульсній взаємодії окремих зернівок кукурудзи було використане рівняння енергетичного балансу. За допомогою якого теоретично встановлено, що потенціальна енергія зернівки кукурудзи залежить від її маси і швидкості падіння. На основі проведених експериментальних досліджень виявлено, що при падінні із значних висот зернівок кукурудзи одного і того ж сорту з однаковими фізико-механічними властивостями потенціальна енергія збільшується по лінійній залежності, тобто вона збільшується із збільшенням висоти падіння. Дослідженнями виявлено, що при ударі зернівки об нерухому основу виникають ударні хвилі, які інтенсивно розповсюджуються по всьому тілі зернівки. Швидкість розповсюдження хвиль при ударній взаємодії зернівки кукурудзи із нерухомою основою залежить від маси зернівки і висоти падіння. Так при скиданні зернівок кукурудзи з висоти 30 метрів швидкість розповсюдження ударних хвиль становить 110 м/с, при цьому загальна тривалість удару не перевищує 0,00016 секунд. На основі проведених досліджень по падінню зернівок кукурудзи з різних висот на нерухому основу була отримана залежність висоти відскоку зернівки від висоти падіння. Це дало можливість визначити коефіцієнт відновлення для зерна кукурудзи. Він становить $\kappa_e = 0,455$. Отримані дослідні дані про ударну взаємодію зернівок кукурудзи об масивне бетонне дно вказують на те, що для обережного без травмування завантаження силосів зерном необхідно в їх середині встановлювати спеціальні гальмівні завантажувальні пристрої.

Ключові слова: зернівка кукурудзи, висота падіння, силос, потенціальна енергія, деформація, травмування, дослід, коефіцієнт відновлення.

Бібліографічний опис для цитування: Арендаренко В. М., Харак Р. М., Семенов А. О., Самойленко Т. В. Про ударну взаємодію падаючої зернівки кукурудзи на бетонне дно силосу. *Scientific Progress & Innovations*. 2025. № 28 (2). С. 266–270.

Вступ

На сучасних елеваторних підприємствах для зберігання сухого і очищеного насіння зернових культур використовують циліндричні металеві силоси з плоским дном [1–3]. Силоси з плоским розташовуються на бетонній основі із застосуванням пальових фундаментів або щелепневій подушці в залежності від геологічних умов місцевості. Висота таких споруд не перевищує 30–40 м [4]. Стінки силосів виготовляються з використанням гофрованої листової сталі. Вертикальні силоси міцні та мають відносно невелику вагу. У таких силосах відношення висоти до діаметра приблизно дорівнює двом.

Завантаження силосів зерновим матеріалом відбувається гравітаційним методом, тобто зерно яке надходить до завантажувальної горловини вільно падає на дно споруди. На початковій стадії завантаження окремі зернівки різної ваги сипкого зернового вантажу падаючи на бетонне дно ударяються і можуть травмуватися. Пошкоджені таким чином зернівки накопичуються в нижній частині ємності, що в свою чергу призводить до самозігрівання і розвитку шкідливих мікроорганізмів. Це означає, що в нижніх шарах можливе псування або повна загибель зерна яка зберігається в силосі.

Гравітаційне завантаження силосів сипким зерновим вантажем ефективне, але воно приводить до сегрегації і травмування насіння зернових культур кукурудзи в тому числі [5–7]. В процесі роботи по визначенню ступені ушкодження зерна кукурудзи при падінні її з висоти на бетонне дно було встановлено, що для зменшення травмування зернівок необхідно використовувати спеціальні завантажувальні пристрої за допомогою яких зменшується швидкість доставки зернового вантажу на дно силосу [8–15].

Розглянемо умови котрі не уможливають руйнування зернівок наприклад кукурудзи при їх ударній взаємодії із нерухомою перешкодою. Так в науковій літературі існує багато визначень що таке механічний удар В дисципліні опір матеріалів ударом називають процес короточасної взаємодії одного тіла з іншим, при якій відбувається перехід кінетичної енергії цих тіл в енергію деформації [16, 17].

Якщо при ударній взаємодії тіл деформація масивнішого тіла (основи силосу) буде незначною, то кінетична енергія падаючих з висоти зернівок кукурудзи досягши максимальної швидкості в момент

зіткнення з нерухомою основою повністю перейде в енергію деформації зернівок і це є причиною їх руйнування або травмування [18–21]. Для того щоб мінімізувати травмування насіння зернових культур при завантаженні його на зберігання в силоси необхідно використати спеціальні завантажувальні пристрої. За допомогою таких пристроїв відбувається зменшення швидкості доставки зерна на дно силосів.

Виходячи із вище сказаного ударна взаємодія зернівок сипкого зернового вантажу із основою силосу є основною причиною ушкодження зернівок особливо на початковій стадії завантаження. Так як насіння кукурудзи має масу більшу ніж насіння пшениці тому дослідження процесу взаємодії його із масивною та нерухомою поверхнею є актуальною проблемою.

Мета дослідження

Метою досліджень є вивчення процесу ударної взаємодії падаючої із значної висоти зернівки кукурудзи на масивну бетонну основу силосу.

Завдання досліджень. Необхідно дослідити як змінюється швидкість та тривалість розповсюдження ударної хвилі в місці зіткнення зернівки з нерухомою основою, визначити коефіцієнт відновлення при ударі зернівки об бетонне дно та встановити як буде змінюватися потенціальна енергія зернівки кукурудзи при падінні її з різної висоти.

Матеріали і методи

При завантаженні силосів зерновим матеріалом окремі зернівки цього матеріалу досягши дна отримують максимальну лінійну швидкість. Вона може бути визначена за формулою $v_k = \sqrt{2gH}$, де H – висота з якої зерно скидається на дно силосу. Зернівки впавши на бетонне дно відскакують від нього на деяку висоту h . Таких відскоків зернівки може бути декілька, але перша є найважливіша. Це означає що при першому падінні з висоти H на бетонне дно силосу зернівка отримує максимальний удар, при цьому вона може травмуватися або повністю зруйнуватись.

Розглянемо можливі варіанти падіння зернівки /кукурудзи на дно силосної споруди. На **рисунку 1** показані чотири варіанти зіткнення зернівки кукурудзи різними своїми частинами з нерухомою основою силосу.

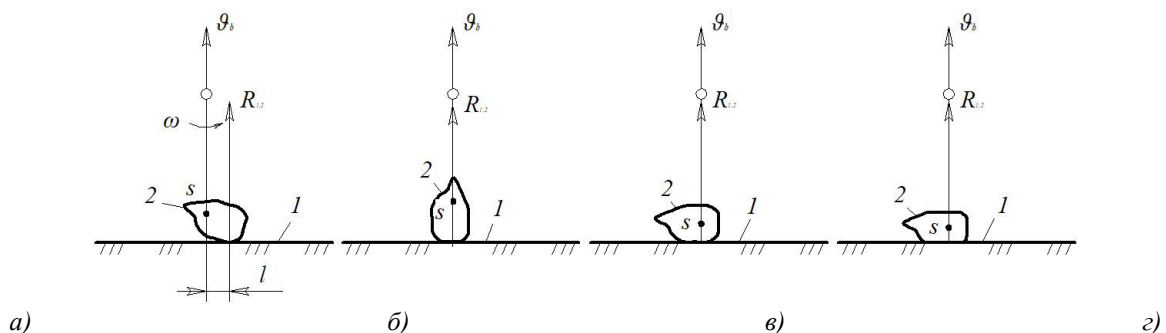


Рис. 1. Можливі варіанти зіткнення зернівки кукурудзи з бетонним дном силосу:

1 – масивне дно силосу; 2 – зернівка кукурудзи

Так на **рисунку 1 а** при зіткненні з нерухомою основою центр ваги зернівки зміщений по відношенню до напрямку дії реакції на величину l . Внаслідок цього, на нашу думку, зернівка отримує не тільки вертикальну швидкість g_v , а й кутову ω . Ці швидкості приводять до того, що зернівка відскакує від перешкоди в різні та непередбачувані напрямки. При інших зіткненнях (**рис. 1 б, в, г**) як правило зернівки відскакують в гору з можливим відхиленням від вертикалі.

Розглянемо випадок коли зернівка кукурудзи відскакує вертикально вгору. На **рисунку 2** показано падіння зернівки на бетонне дно із швидкістю g_k і подальшим відскоком в гору зі швидкістю g_v . При такому падінні кінетична енергія зернівки повністю переходить в енергію її деформації. Ця деформація визиває в зернівці ударні хвилі, які інтенсивно розповсюджуються в середині зернівки. Чим інтенсивніші деформаційні хвилі тим нижча стійкість зернин до травмування.

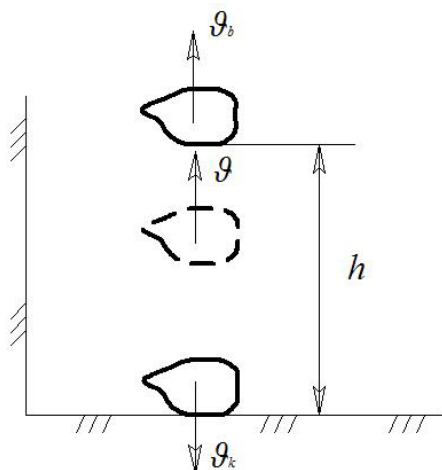


Рис. 2. Падіння зернівки кукурудзи на дно силосу з подальшим вертикальним відскоком на висоту h

Відомо що на початковій стадії завантаження силосів зерном відбувається його найбільше ушкодження. Ступінь травмування зернівок в цей час напряму залежить від швидкості руху зернівок і висоти падіння [22].

При падінні зернівки кукурудзи на дно силосу її кінетична енергія переходить в потенціальну енергію самої зернівки. Тоді:

$$T_n - T_k = U, \quad (1)$$

де T_n і T_k – відповідно кінетична енергія зернівки кукурудзи до її удару і після удару об нерухому перешкоду, Дж; U – потенціальна енергія деформації Дж.

Кінетична енергія зернівки в момент її зіткнення з перешкодою визначається за формулою:

$$T_n = m_z \cdot g \cdot H, \quad (2)$$

де m_z – маса зернівки кукурудзи кг; H – висота з якої зернівка падає на бетонне дно силосу, м.

Після зіткнення зернівки з основою силосу швидкість її змінюється за величиною і напрямком.

Швидкість відскоку зв'язана із швидкістю з якою зернівка падає на дно силосу таким співвідношенням.

$$g_v = g_k \cdot \kappa_e, \quad (3)$$

де κ_e – коефіцієнт відновлення

Розглянемо падіння зернівки, яке зображено на **рис. 1 а**. Кінетична енергія зернівки після її відскоку від масивної перешкоди буде дорівнювати:

$$T_k = \frac{m_z \cdot g_v^2}{2} + \frac{I_s \cdot \omega^2}{2}, \quad (4)$$

де I_s – момент інерції зернівки, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Підставивши отримані вирази в рівняння енергетичного балансу (1), та провівши деякі перетворення і врахувавши, що $I_s = m_z \cdot l^2$ отримаємо рівняння потенціальної енергії, яка накопичується зернівкою кукурудзи і бетонним дном силосу.

$$U = m_z [gH (1 - \kappa_e^2) - 0,5 l^2 \omega^2]. \quad (5)$$

З отриманої формули видно, що потенціальна енергія деформації зернівки залежить від маси зернівки та швидкості падіння.

Потенціальна енергія деформації зернівки кукурудзи визначається за формулою:

$$U_3 = \frac{F_{y0} \cdot \Delta y}{2}, \quad (6)$$

де U_3 – потенціальна енергія деформації зернівки пшениці, Дж; F_{y0} – максимальна ударна сила зернівки об нерухому основу, Н; Δy – абсолютна деформація зернівки, м.

Відомо, що абсолютна деформація зернівки зв'язана з її розмірами і жорсткістю таким виразом:

$$\Delta y = \frac{F_{y0} \cdot a}{E_3 \cdot S_3}, \quad (7)$$

де a – товщина зернівки кукурудзи в місці удару ($a = 2,5-3$ мм); E_3 – модуль Юнга ($E_3 = 24,8-27,0$ МПа), S_3 – площа деформованої поверхні зернівки кукурудзи ($S_3 = 0,000007-0,000008$ м²).

Підставивши формулу (7) у формулу (6) отримаємо:

$$U_3 = \frac{F_{y0}^2 \cdot a}{2 \cdot E_3 \cdot S_3}. \quad (8)$$

Отримані залежності дозволяють визначити накопичену потенціальну енергію і фактори, котрі на неї впливають. Це дає можливість усвідомити і намітити шляхи зменшення ударної взаємодії зернівок з масивною перешкодою.

Результати та їх обговорення

При падінні зерна кукурудзи на масивне бетонне дно силосу відбувається удар в результаті якого в місці удару виникає деформація зернівки. Величина її залежить від маси зернівки і швидкості з якої вона ударяється об основу силосу. Удар зернівки об перешкоду призводить до того, що в середині зернівки утворюються ударні хвилі. Ці хвилі інтенсивно розповсюджуються по всьому об'єму зернівки. Швидкість розповсюдження ударних хвиль з деяким припущенням можна визначити за формулою:

$$c = \sqrt{\frac{E_{\text{зер}}}{\rho}}, \quad (9)$$

де $E_{\text{зер}}$ – напруга яка виникає в зоні контакту зернівки кукурудзи в зоні її контакту з бетонною основою силосу, МПа, ρ – комплексний показник який характеризує стан зернівки при її деформації, МПа·с²·м⁻⁴.

Час розповсюдження ударної хвилі по всій зернівці визначається, шляхом ділення довжини зернівки на швидкість c . Тоді, загальна тривалість удару зернівки об перешкоду буде:

$$\tau = \frac{2 \cdot b}{c}, \quad (10)$$

де b – довжина зернівки у місці зіткнення із перешкодою, м.

Приклад: Визначимо ударні характеристики падаючої зернівки на бетонне дно силосу. Для зернівки кукурудзи прийемо, що $E_z = 26$ МПа,

$$\rho = 0,00215 \text{ МПа} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^{-4}, \quad b = 0,009 \text{ м}.$$

Тоді за формулою (9) швидкість розповсюдження ударного імпульсу в зернівці кукурудзи котра падає з висоти $H = 30$ м і масою $m_z = 0,28$ грам становить $c = 110$ м/с., що приблизно в чотири рази більше ніж g_k . При цьому загальна тривалість удару $\tau = 0,00016$ с.

Провівши експериментальні дослідження по падінню зернівок кукурудзи на бетонну основу з використанням фото фіксації, були виявлені середні величини відскоку зернівки від перешкоди при її скиданні з різної висоти. На [рисунку 3](#) наведений графік залежності відскоку зернівки кукурудзи від висоти скидання її на нерухому бетонну основу.

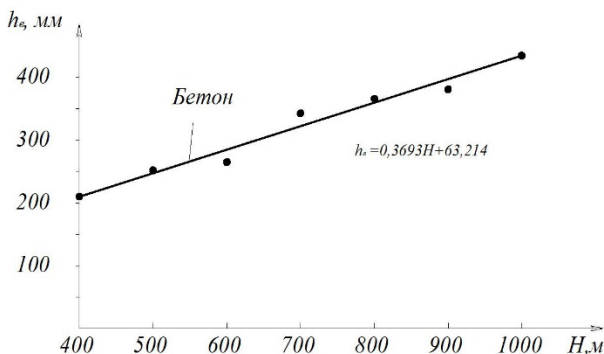


Рис. 3. Взаємодія насіння кукурудзи при її падінні на бетонну основу

По результатам дослідження були визначені коефіцієнти відновлення для вибраних висот з яких скидались зернівки кукурудзи. Так, для $H = 400$ мм, $\kappa_e = 0,525$, а для $H = 1000$ мм, $\kappa_e = 0,435$. Середнє значення $\kappa_e = 0,455$.

Подальшими дослідженнями було встановлено, що потенціальна енергія зерна кукурудзи одного і того ж сорту з однаковими фізико-механічними властивостями скинутих з різної висоти збільшується. На [рисунку 4](#) приведений графік зміни потенціальної енергії падаючої зернівки кукурудзи на бетонну основу силосу.

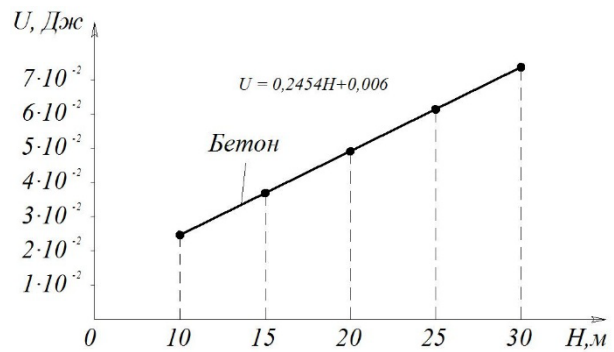


Рис. 4. Зміна потенціальної енергії зернівки кукурудзи котра падає на бетонне дно силосу з різної висоти

З графіка видно, що потенціальна енергія при падінні зернівки кукурудзи на бетонне дно силосу зростає із зростанням висоти падіння. Для зменшення потенціальної енергії необхідно на певних висотах встановлювати гальмівні пристрої. За допомогою цих пристроїв можна плавно регулювати швидкість руху зерна на дно силосу. Такі заходи необхідно виконувати з мінімальними затратами. Встановлені пристрої для зменшення швидкості завантаження зерна приводять до зниження деформації зернівок, а значить і до зменшення їх травмування.

Висновки

З проведених теоретичних і експериментальних досліджень можна зробити наступний висновок:

1. З метою зниження ступені травмування зернівок зернового вантажу кукурудзи на початковій стадії завантаження силосів необхідно створити такі умови при яких частина кінетичної енергії удару зернівок об масивне бетонне дно переходила б в потенціальну енергію робочого органу гальмівного пристрою.

2. Для зменшення травмування зернівок сипкого зернового вантажу в середині силосу необхідно встановити гофрований рукав з можливістю його опускання і підймання, а на нижній частині цього рукава закріпити завантажувальний пристрій конусного типу диски якого покриті еластичним матеріалом (наприклад, гумою).

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження будуть направлені на дослідженні зміни коефіцієнта відновлення зернівок зернових культур при їх падінні на ударно поглинальні поверхні робочих органів гальмівних пристроїв.

Конфлікт інтересів

Автори стверджують про відсутність конфлікту інтересів щодо їхнього викладу та результатів досліджень.

References

- Lisenyi, O., Liubchenko, I., & Slyusarenko, Y. (2019). Steel circular silos for grain. *Science and Construction*, 22 (4), 27–32. <https://doi.org/10.33644/01005>
- Dvornyk, A., Liubchenko, I., Tytarenko, V., & Shydlovsk, aO. (2019). Bases and foundations for grain cylindrical silos. *Science and Construction*, 21 (3), 12–18. <https://doi.org/10.33644/scienceandconstruction.v21i3.111>
- Bibik, M. V., Bibik, V. M., & Bibik, I. O. (2014). Klasyfikatsiia sylosnykh zernoskhovyshech. *Zbirnyk Naukovykh Prats Poltavskoho Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu im. Yu. Kondratiuka. Seriya: Haluzeve Mashynobuduvannia, Budivnytstvo*, 1 (40), 157–165. [in Ukrainian]
- 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. *Scientific Progress & Innovations*, 4, 273–282. <https://doi.org/10.31210/visnyk2020.04.35>
- Samoylenko, T. V., Arendarenko, V. M., & Melnyk, V. I. (2019). Teoretical simulation of the process of gravitational loading of a silo with grain through an open screw channel. *Engineering of Nature Management*, 2 (12), 73–78.
- Tverdokhlib, I. V. (2017). Dynamika rukhu chastynky v sytkomu zernovomu seredovyshchi. *Vibratsii v Tekhnitsi ta Tekhnolohiiakh*, 3, 128–135. [in Ukrainian]
- Kozhushko, V. S., Koloskov, D. O., & Koloskova, H. O. (2014). Patent № 90162 UA. *Prystii dlia rivnomirnogo ta oberezhnogo zavantazhennia zerna v sylos*. Retrieved from: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/985637/> [in Ukrainian]
- Arendarenko, V., Samoilenko T., Ivanov, O., & Ryzhkova, T. (2023). Results of experimental research on the distribution of a falling grain from a toro-shaped plate on a flat surface. *Scientific Progress & Innovations*, 26 (1), 96–101. <https://doi.org/10.31210/spi2023.26.01.15>
- Melnyk, V. I., & Samoilenko, T. V. (2018). Analiz napriamkiv udoskonalennia konstruktiv prystroiv dlia zavantazhennia sylosiv. *Inzheneriia Pryrodokorystuvannia*, 1 (9), 83–91. [in Ukrainian]
- Samoilenko, T. V., Ivanov, O. M., & Arendarenko, V. M. (2018). Patent № 125628 UA. *Prystii dlia oberezhnogo zavantazhennia zerna v sylos*. Retrieved from: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/678079/> [in Ukrainian]
- 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. *Scientific Progress & Innovations*, 3, 265–273. <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.03.33>
- Gao, M., Cheng, X., Hu, M., & Du, X. (2019). Simulation of static stress distribution of wheat piles in silos by the modified Cam-Clay model. *International Agrophysics*, 33 (1), 11–19. <https://doi.org/10.31545/intagr/103749>
- Skrynnik, I., Pisarkova, I., & Petrenko, M. (2018). Mechanical grain damage. *National Interagency Scientific and Technical Collection of Works. Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines*, 48, 143–153. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.143-153>
- Derev'ianko, D. A., Tarasenko, O. P., & Orobinskyi, V. I. (2012). *Vplyv travmuvannia na yakist nasinnia zernovykh kultur: monohrafiia*. Zhytomyr: Nilan – LTD [in Ukrainian]
- Derev'ianko, D., Sukmaniuk, O., Sarana, V., & Derev'ianko, O. (2020). Justification of influence of the working bodies of combine harvesters on damage and quality of seed. *Visnyk Agrarnoi Nauky*, 98 (2), 64–71. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202002-10>
- Pysarenko, H. S., Kvitka, O. L., & Umanskyi, E.S. (2024). *Opir materialiv*. Kyiv: Vyshcha shkola [in Ukrainian]
- Samoylenko, T. V., Antonets, A. V., Arendarenko, V. M., & Mel'nik, V. I. (2021). Modeling the impact interaction of a grain with a flat solid surface. *Engineering of Nature Management*, 1 (19), 63–68.
- Arendarenko, V., Antonets, A., Ivanov, O., Dudnikov, I., & Samoylenko, 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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235451>
- Olshanskyi, V. P., Bohomolov, O. V., & Bohomolov, O. O. (2018). Pro udarnu vzaiemodiiu vazhkoho tverdogo tila z pruzhnyim pivprostorem. *Visnyk Kharkivskoho Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu Silskoho Hospodarstva imeni Petra Vasylenka. Suchasni Napriamky Tekhnolohii ta Mekhanizatsii Protseiv Pererobky i Kharchovykh Vyrobnystv*, 194, 38–46. [in Ukrainian]
- 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. *Scientific Progress & Innovations*, 2, 259–265. <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.02.34>
- Bohomolova, V. P., Zinchenko, M. A., & Bohomolov, A. A. (2009). Udar kuliastoho tila ob pokhyly ploshchynu. *Visnyk Kharkivskoho Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu Silskoho Hospodarstva imeni Petra Vasylenka. Suchasni Napriamky Tekhnolohii ta Mekhanizatsii Protseiv Pererobky i Kharchovykh Vyrobnystv*, 88, 279–285. [in Ukrainian]
- Han, Y., Li, D., Chen, J., Jing, H., Duan, J. (2018). Experimental study on boundary pressure and wall friction under static grain storage in silo. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 34 (13), 296–302.

ORCID

- | | |
|--|---|
| V. Arendarenko  | https://orcid.org/0000-0003-0701-7983 |
| R. Kharak  | https://orcid.org/0000-0002-6131-8501 |
| A. Semenov  | https://orcid.org/0000-0003-3184-6925 |
| T. Samoilenko  | https://orcid.org/0000-0003-4756-6223 |



2025 Arendarenko V. et al. This is an open-access article distributed under the Creative Commons Attribution License <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.