




original article | UDC 519.876.5:633:531.66 | doi: 10.31210/visnyk2021.02.34

ON IMPACT INTERACTION OF FALLING WHEAT GRAIN ON RIGID CONCRETE SILO BASE


*T. V. Samoilenko*¹

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


*V. M. Arendarenko*¹

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

A. V. Antonets^{1*}

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

*O. P. Koshova*²

ORCID  [0000-0003-0794-6774](https://orcid.org/0000-0003-0794-6774)

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

² Higher Educational Establishment of Ukoopspilka «Poltava University of Economics and Trade», 3, Koval Str., Poltava, 36014, Ukraine

*Corresponding author

E-mail: anatoliyantnets1@gmail.com

How to Cite

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

One of the ways to reduce grain damage is its safe loading in storage silos. Reducing the impact interaction of grain with the working bodies of machines and mechanisms is one of the indicators of the technical level of modern agricultural production. The issues of impact energy transfer, determination of force impulses, recovery and rebound coefficients at grain falling on the concrete bottom of silos have not been sufficiently studied. The purpose of the article is the theoretical study of the oblique impact of grain on the concrete silo bottom as a result of its free falling. When determining the impact force, it is necessary to take into that the grain falling on the concrete bottom has already some speed. The scheme of falling winter wheat grain interaction with a motionless hard surface has been given in the work. The moment of impact is divided into two stages. The first stage is characterized by a change in the shape and condition of the body being struck. At the second stage, the initial shape of the grain is restored due to its viscous elastic and plastic deformation. At each stage, the time and speed of grain movement were considered and analyzed. According to the conducted analysis and using Newton's second law in impulse form, the total vector momentum of the grain impact was found. Based on this, the formula for finding the maximum force of grain contact interaction with the silo concrete base at an oblique impact was presented. Using the geometric characteristics of winter wheat grain and the duration of sound wave propagation in concrete, the instantaneous impact time was determined taking into account the nominal diameter of winter wheat grain. Using Rouse's hypothesis, the impact impulses along the corresponding coordinate axes and the recovery factor at grain's oblique impact on the concrete base were determined. Taking into account the found total impact impulse, the dependence for determining the impact force of the grain on the silo concrete bottom at its oblique impact was obtained. It has been established that the impact value depends on the speed and height of the grain falling, as well as on the physical and mechanical properties of the silo concrete bottom and the geometric dimensions of the grain. Based on the obtained equation, the value of the impact force at the wheat grain falling to the silo bottom was calculated. It has been shown that the impact force is a function of the impact coefficient of sliding friction and at its increase the impact force also increases. This is due to the longer interaction of the grain with the silo concrete bottom, and is caused by sliding friction.

Key words: silo, concrete bottom, grain, impact force.

ПРО УДАРНУ ВЗАЄМОДІЮ ПАДАЮЧОГО ЗЕРНА ПШЕНИЦІ НА ЖОРСТКУ БЕТОННУ ОСНОВУ СИЛОСУ**Т. В. Самойленко¹, В. М. Арендаренко¹, А. В. Антонець¹, О. П. Кошова²**¹ Полтавська державна аграрна академія, м. Полтава, Україна² Вищий навчальний заклад Укоопспілки «Полтавський університет економіки і торгівлі», м. Полтава, Україна

Одним зі способів зниження ушкодження зерна є ощадне завантаження його в силоси для зберігання. Зниження ударної взаємодії зерна з робочими органами машин і механізмів є одним із показників технічного рівня сучасного сільськогосподарського виробництва. Питання передачі енергії удару, визначення імпульсів сил, коефіцієнтів відновлення і відскоку при падінні зерна на бетонне дно силосів недостатньо вивчені. Метою статті є теоретичне дослідження косоного удару зерна об бетонне дно силосу внаслідок його вільного падіння. При визначенні ударної сили потрібно врахувати, що падаюче на бетонне дно зерно уже має деяку швидкість. У роботі наведено схему взаємодії падаючого зерна озимої пшениці із нерухомою жорсткою поверхнею. Момент удару розділено на два етапи. Перший етап характеризується зміною форми і стану тіла, що ударяється. На другому етапі відбувається відновлення початкової форми зернівки за рахунок її в'язкої пружно-пластичної деформації. На кожному етапі розглянуто та проаналізовано час і швидкість руху зернівки. Відповідно до проведеного аналізу та скориставшись другим законом Ньютона в імпульсній формі знайдено сумарний векторний імпульс удару зернівки. На підставі цього наведено формулу для знаходження максимальної сили контактної взаємодії зернівки з бетонною основою силосу при косому ударі. Скориставшись геометричними характеристиками зерна озимої пшениці та тривалістю розповсюдження звукової хвилі в бетоні, визначено миттєвий ударний час, що враховує умовний діаметр зернівки озимої пшениці. За допомогою гіпотези Рауса визначено ударні імпульси по відповідним координатним осям та коефіцієнт відновлення при косому ударі зернівки об бетонну основу. Зважаючи на знайдений сумарний ударний імпульс, отримано залежність для визначення ударної сили зернівки об бетонне дно силосу при її косому ударі. Встановлено, що величина ударної сили залежить від швидкості і висоти падіння зернини, а також від фізико-механічних властивостей бетонного дна силосу та геометричних розмірів самої зернини. На основі отриманого рівняння обчислено величину ударної сили при падінні зернини пшениці на дно силосу. Показано, що ударна сила є функцією від ударного коефіцієнта тертя ковзання, при його збільшенні ударна сила також збільшується. Це відбувається внаслідок більш тривалої взаємодії зернини із бетонним дном силосу, яке спричиняється тертям ковзання.

Ключові слова: силос, бетонне дно, зернівка, ударна сила.

Вступ

Основною продовольчою культурою людства є пшениця. Зерно її покрито оболонками, під якими розташовані ендосперма і зародок. Оболонка зерна захищає зародок і ендосперм від зовнішніх механічних і хімічних впливів [1–3]. Як відомо, зародок є основою майбутньої рослини, а ендосперм слугує його банком поживних речовин. Тому навіть незначне травмування цих елементів зернини негативно впливає на врожайність та погіршує якість продовольчого і фуражного зерна.

Одним зі способів зниження ушкодження зерна є ощадне завантаження його в силоси для зберігання. Під час завантаження зерна, наприклад, озимої пшениці, сипкий зерновий вантаж розділяється на окремі зернівки, які з певною швидкістю падають на пласке дно силосу. При падінні кінетична енергія зернівки переходить у енергію деформації [4] під час удару зернівки об бетонне дно силосу. Тому початкове завантаження є основною причиною травмування зерна, яке в подальшому буде перебувати в нижніх шарах зернового насипу. Бите і травмоване зерно, яке знаходиться в нижній частині силосу, внаслідок більш вільного доступу повітря до його внутрішніх частин призводить до інтенсивного розвитку грибкової мікрофлори [5]. Вона своєю чергою призводить до самозігрівання та обвуглення зерна, яке інколи перетворюється на моноліт [6]. Тому таке зерно стає непридатним навіть для кормових цілей.

Метою цієї роботи є теоретичне дослідження косоного удару зерна об бетонне дно силосу внаслідок його вільного падіння. Основними завданнями дослідження є визначення характеристик ударної

взаємодії зернівки озимої пшениці об нерухому перешкоду, а саме знаходження імпульсу, ударного часу, коефіцієнту відновлення при косому ударі та відповідної ударної сили зернівки.

Матеріали і методи досліджень

Зниження ударної взаємодії зерна з робочими органами машин і механізмів є одним із показників технічного рівня сучасного сільськогосподарського виробництва. Тому дослідженню таких ударних взаємодій присвячено багато наукових публікацій [7–11].

Питання передачі енергії удару, визначення імпульсів сил, коефіцієнтів відновлення і відскоку при падінні зерна на бетонне дно силосів недостатньо вивчені. Це пов'язано з тим, що зерновий вантаж за допомогою надсилосних транспортерів подається з певною лінійною швидкістю до завантажувального отвору силосу. Тобто падаюче на бетонне дно зерно уже має деяку швидкість і це потрібно враховувати при визначенні ударної сили.

У середині силосу окремі зернівки зернового вантажу рухаються до низу рівноприскорено. Час, за який окремо взята зернівка пройде силосну висоту і удариться об його дно відповідно до [3], пропонуємо такий:

$$t = \left(-\mathcal{G}_n + \sqrt{\mathcal{G}_n^2 + 2 \cdot g \cdot H_c} \right) / g, \quad (1)$$

де \mathcal{G}_n – початкова швидкість зернівки після її сходження із транспортера у завантажувальний отвір силосу; H_c – внутрішня висота силосу (висота падіння зернівки). Швидкість рівноприскореного руху в момент точкового удару зернівки із основою силосу визначався за відомою формулою:

$$\mathcal{G}_{y\partial} = \mathcal{G}_n + gt. \quad (2)$$

Підставивши (1) в (2), отримаємо дійсну швидкість удару, котра не враховує час падіння зернівки

$$\mathcal{G}_{y\partial} = \sqrt{\mathcal{G}_n^2 + 2gH_c}. \quad (3)$$

Теоретичні дослідження ударної взаємодії падаючого зерна на жорстку бетонну основу силосу проводились із використанням теореми про кількість руху матеріальної точки, згідно з якою швидкість зернівки надає не сила, а імпульс сили [2, 12]. Своєю чергою швидкість залежить не тільки від імпульсу сил, але і від маси і висоти падіння [13, 14, 15].

Оскільки бетонне дно силосу не є гладкою горизонтальною поверхнею, а жорсткою поверхнею із невеликими впадинами і виступами, то удар зернівки приймали косим. При розгляді косого удару зернівки об жорстку поверхню була використана гіпотеза Рауза [16].

Результати досліджень та їх обговорення

На рис. 1 наведена розрахункова схема косого удару зернівки озимої пшениці об жорстку пологоверхню бетонної основи силосу.

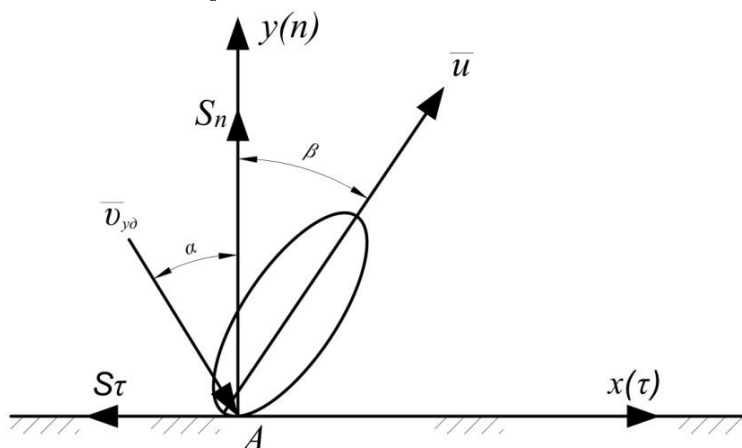


Рис. 1. Схема взаємодії падаючого зерна озимої пшениці із нерухомою жорсткою поверхнею.

Відповідно до наведеної схеми швидкість зернівки на початку удару буде $\mathcal{G}_{y\partial}$, формула (3), а вкінці удару – u . Розглянемо цей елементарний часовий проміжок, розділивши його на два етапи.

Перший етап характеризується зміною форми і стану тіла, що ударяється. При цьому нормальний складник швидкості $\mathcal{G}_{y\delta}^n$ змінюється від максимального значення до нуля. Час протікання цієї стадії удару позначимо через t_1 . На цій стадії в точці А відбудеться місцева деформація. Величина деформації залежить від швидкості падіння зернівки і внутрішньої висоти силосу. Чим більша швидкість і висота – тим значніші наслідки травмування зерна внаслідок удару його із жорсткою бетонною поверхнею [17–20].

На другому етапі відбувається відновлення початкової форми зернівки за рахунок її в'язкої пружно-пластичної деформації. Початкові форми зернівки відновлюються, якщо вона не була ушкоджена на першій стадії деформації. Час, який витрачається на відновлення початкової форми зернівки позначимо через t_2 . На цьому етапі нормальний складник швидкості відскоку зростає від нульового до кінцевого значення.

Розглянемо систему координат $AХУ$, початок якої знаходиться в точці А – контактна взаємодія зернівки із бетонною основою силосу. Визначимо вектори швидкості зернівки, скориставшись ортами n і τ . Швидкість у момент удару t :

$$\mathcal{G}_{y\delta} = \mathcal{G}_{\tau}\bar{\tau} + \mathcal{G}_n\bar{n}.$$

Швидкість у кінці деформації зернівки, $u_n = 0$ в момент $t + t_1$:

$$\bar{u} = u_{\tau}\bar{\tau}.$$

Швидкість у кінці удару, в момент $t + t_1 + t_2$:

$$\bar{u}_{\text{від}} = u_{\tau}\bar{\tau} + u_n\bar{n}.$$

Кожному із вказаних вище етапів відповідає свій ударний імпульс. Протягом t_1 відбувається ударний імпульс деформації S_1 зернівки і вектор його направлений по осі АУ (по нормалі n) вертикально вгору. За час t_2 відбувається ударний імпульс відновлення S_2 , який теж направлений по нормалі до основи силосу.

Сумарний векторний імпульс удару зернівки об бетонну основу силосу буде:

$$\bar{S}_{\text{сум}} = \bar{S}_1 + \bar{S}_2. \quad (4)$$

Скориставшись другим законом Ньютона в імпульсній формі [3], за яким зміна сумарного імпульсу тіла дорівнює імпульсу діючої на нього сили:

$$S_{\text{сум}} = \int_0^{H_c} F_{y\delta} dt = F_{y\delta} \cdot t_{y\delta}, \quad (5)$$

де $t_{y\delta}$ – миттєвий час удару зернівки об бетонне дно силосу. З іншого боку:

$$S_{\text{сум}} = m_n(u - \mathcal{G}_{y\delta}). \quad (6)$$

Підставивши (6) в (5) і зробивши перетворення визначимо максимальну силу контактної взаємодії зернівки з бетонною основою силосу при косому ударі:

$$F_{y\delta} = \frac{m_n(u - \mathcal{G}_{y\delta})}{t_{y\delta}} = \frac{S_{\text{сум}}}{t_{y\delta}}. \quad (7)$$

Визначимо миттєвий час удару, який складається з часу деформації тіла і часу його відновлення. Цей час досить малий, але він характеризує ударну взаємодію стичних тіл. У нашому дослідженні його можна визначити, скориставшись хвильовими процесами. Відомо, що під час удару зерна об нерухому бетонну основу силосу виникає звукова ударна хвиля $v_{\text{хв}}$. Скориставшись геометричними характеристиками зерна озимої пшениці та тривалістю розповсюдження звукової хвилі в бетоні, визначаємо миттєвий ударний час:

$$t_{y\delta} = \frac{d_{\text{ум}}}{2v_{\text{хв}}} = \frac{k_{\phi}(a \cdot b \cdot c)^{1/3}}{2v_{\text{хв}}}, \quad (8)$$

де $d_{\text{ум}} = k_{\phi}\sqrt[3]{a \cdot b \cdot c}$ – умовний діаметр зернівки озимої пшениці, k_{ϕ} – коефіцієнт, котрий враховує форму зернівки (для зерна пшениці $k_{\phi} = 1$ [2]), a, b, c – відповідно довжина, ширина і товщина насіння зерна озимої пшениці в метрах. Коефіцієнт k_{ϕ} враховує реальну геометричну форму насіння пшениці відповідно до ідеального кулеподібного тіла.

У реальних умовах ударний імпульс невідомий ні по величині ні по напрямку дії. Для визначення максимальної ударної сили зернівки масою m_n об бетонну основу силосу скористаємось відомою гіпотезою Рауса [16].

Згідно з цією гіпотезою дотичний і нормальний складники ударних імпульсів зв'язані між собою коефіцієнтом ударного тертя ковзання:

$$S_\tau = f_d S_n, \text{ або } S_x = f_d S_y, \quad (9)$$

де f_d – коефіцієнт ударного тертя ковзання, визначається експериментальним шляхом.

Спроектуємо швидкості $\mathcal{G}_{y\partial}$ і u на координатні осі AX і AU .

$$\text{На вісь } AX: \quad \mathcal{G}_{y\partial}^x = \mathcal{G}_{y\partial} \sin \alpha; \quad u^x = u \sin \beta.$$

$$\text{На вісь } AU: \quad \mathcal{G}_{y\partial}^y = \mathcal{G}_{y\partial} \cos \alpha; \quad u^y = u \cos \beta.$$

Скориставшись формулою (6) визначимо ударні імпульси по відповідним координатним осям. Ударні імпульси по осям AX і AU будуть:

$$\begin{cases} m_n (u^x - \mathcal{G}_{y\partial}^x) = -S_x, \\ m_n (u^y - \mathcal{G}_{y\partial}^y) = +S_y. \end{cases} \quad (10)$$

Коефіцієнт відновлення при косому ударі зернівки об бетонну основу подамо так:

$$K_e = \frac{u_{y\partial}^y}{\mathcal{G}_{y\partial}^y}. \quad (11)$$

Тоді ударний імпульс по осі AU з урахуванням (11) буде:

$$S_y = m_n \mathcal{G}_{y\partial}^y (1 + K_e), \quad (12)$$

або

$$S_y = m_n \mathcal{G}_{y\partial} (1 + K_e) \cos \alpha. \quad (13)$$

Ударний імпульс по осі AX з використанням (9) буде:

$$S_x = f_d S_y = m_n \mathcal{G}_{y\partial} f_d (1 + K_e) \cos \alpha. \quad (14)$$

Сумарний ударний імпульс під час зіткнення зернівки об бетонне дно силосу можна представити так:

$$S_{\text{сум}} = \sqrt{S_x^2 + S_y^2} = m_n \mathcal{G}_{y\partial} (1 + K_e) \cos \alpha \sqrt{1 + f_d^2}. \quad (15)$$

Підставивши (3), (8) і (15) в (7), отримаємо залежність для визначення ударної сили зернівки об бетонне дно силосу при її косому ударі:

$$F_{y\partial} = \frac{m_n \sqrt{\mathcal{G}_n^2 + 2gH_c v_{xв}} (1 + K_e) \cos \alpha \sqrt{1 + f_d^2}}{2k_\phi \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c}}. \quad (16)$$

При контактній взаємодії зернини озимої пшениці під кутом α до нормалі з жорстким бетонним дном силосу в зернині виникають внутрішні напруги, які приводять до її травмування.

Обчислення величини числового значення ударної сили. Для проведення розрахунків візьмемо такі усереднені дані для зерна озимої пшениці та силосу, котрий змонтований на бетонній основі. Постійні величини розрахунку: $m_n = 4 \cdot 10^{-5}$ кг; $\mathcal{G}_n = 0,68$ м/с; $H_c = 26,27$ м; $v_{xв} = 4000$ м/с; $a = 7$ мм; $b = 2,5$ мм; $c = 3$ мм; $g = 9,81$ м/с². Проведемо розрахунки з визначення ударної сили при фіксованих величинах $\alpha = 20^\circ$ і $K_e = 0,41$, очевидно, що $F_{y\partial} = \varphi(f_d)$, тобто є функцією ударного коефіцієнта тертя ковзання. Підставляючи у (16) постійні усереднені дані, та фіксовані величини при змінному ударному коефіцієнті тертя ковзання, отримаємо значення ударної сили при падінні зернини на дно силосу. Ця функція графічно представлена на рис. 2.

Із наведеного графіка функції випливає, що ударна сила безпосередньо залежить від ударного коефіцієнта ударного тертя f_d . Це відбувається внаслідок більш тривалої взаємодії зернини із бетонним дном силосу, яке зумовлюється тертям ковзанням.

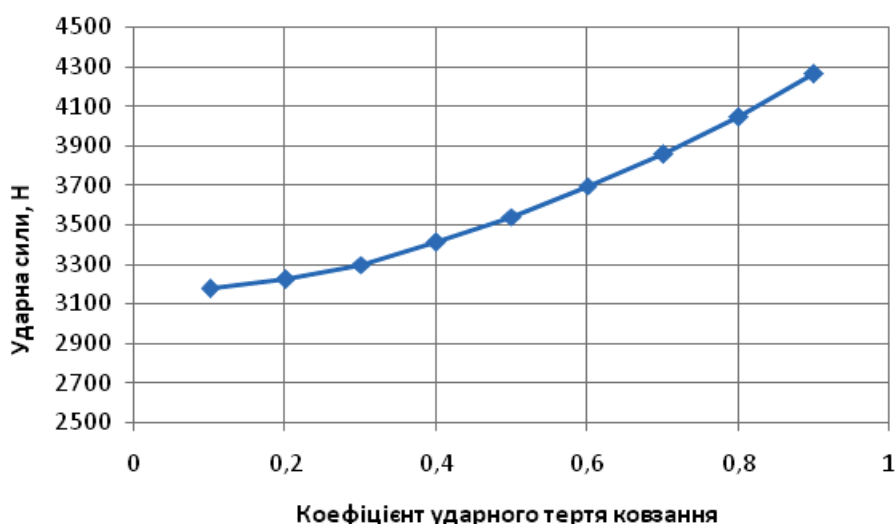


Рис. 2. Залежність ударної сили зернини озимої пшениці об бетонне дно силосу від ударного коефіцієнта тертя ковзання при $\alpha = 20^\circ$ і $K_e = 0,41$.

Висновки

У роботі наведено схему взаємодії падаючого зерна озимої пшениці із нерухомою жорсткою поверхнею. Момент удару розділено на два етапи. Перший етап характеризується зміною форми і стану тіла, що ударяється. На другому етапі відбувається відновлення початкової форми зернівки за рахунок її в'язкої пружно-пластичної деформації. На кожному етапі розглянуто та проаналізовано час і швидкість руху зернівки. На підставі проведеного теоретичного дослідження визначено основні характеристики ударної взаємодії зернівки озимої пшениці об нерухому перешкоду. Відповідно до отриманих залежностей (13, 14) нормальний і дотичний складники ударних імпульсів, а також їх сумарний імпульс (15) прямо залежать від коефіцієнта відновлення зернівки (11). Встановлено, що величина ударної сили (16) залежить від швидкості і висоти падіння зернини, а також від фізико-механічних властивостей бетонного дна силосу та геометричних розмірів зернівки. Зокрема при фіксованих величинах $\alpha = 20^\circ$ і $K_e = 0,41$ при збільшенні коефіцієнта ударного тертя ковзання ударна сила зернівки збільшується лінійно.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці універсального пристрою для ощадного завантаження силосів зерном без його травмування об дно силосу.

References

1. Sukhanova, M. V. (2020). Obosnovaniye primeneniya udaro-pogloshchayushchikh rabochikh organov dlya snizheniya travmirovaniya i intensivifikatsii predposevnoy obrabotki semyan. *Vestnik Agrarnoy Nauki Dona*, 3 (51), 4–10 [In Russian].
2. Krauin'sh, P. Ya., & Deryusheva, V. N. (2009). Formirovaniye udarnogo impul'sa v zavisimosti ot ispol'zovaniya promezhutochnoy ploskosti pnevmogidravlicheskogo udarnogo uzla. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta*, 2 (315), 178–182 [In Russian].
3. Gernet, M. M. (1973). *Kurs teoreticheskoy mekhaniki. Uchebnik dlya vuzov*. Moskva: High school [In Russian].
4. Sukhanova, M. V., & Zabrodin, V. P. (2017). Sravnitel'nyy analiz vozdeystviya poverkhnosti razlichnoy zhestkosti rabochikh organov sel'skokhozyaystvennoy tekhniki na tverduyu chastitsu sypuchego tela. *Vestnik Agrarnoy Nauki Dona*, 2 (38), 19–22 [In Russian].
5. Pavlovskiy, G. T., & Ptitsyn, S. D. (1972). *Ochistka, sushka i aktivnoye ventilirovaniye zerna. Uchebnik dlya sel'skikh prof.-tekhn. Uchilishch*. Moskva: High school [In Russian].
6. Krylov, O. N., & Dorodov, P. V. (2018). O mekhanicheskoy prochnosti semyan. *Dostizheniye Nauki i Tekhnik Agropromyshlennogo Kompleksa*, 8, 61–63 [In Russian].

7. Khaylis, G. A. (1994). *Mekhanika rastitel'nykh materialov*. Kiev: Izdatel'stvo UAAN [In Russian].
8. Sukhanova, M. V., Zabrodin, V. P., & Sukhanov, A. V. (2018). Opredeleniye nakopitel'noy potentsial'noy energii pri impul'snom vozdeystvii na semena. *Vestnik Agrarnoy Nauki Dona*, 3 (4351), 5–7 [In Russian].
9. Samoylenko, T. V., Arendarenko, V. M., & Antonets, A. V. (2020). Kinematyka rukhu zerna za spiral'nym prystroyem zi zminenym kutovym spuskom. *Visnyk Poltavskoyi Derzhavnoyi Ahrarnoyi Akademiyi*, 1, 267–274. doi: 10.31210/visnyk2020.01.31 [In Ukrainian].
10. Stikhanovskiy, B. N., & Stikhanovskaya, L. M. (2017). Osobennosti realizatsii maksimal'nykh sil pri udare tverdykh tel. *Vestnik Sibirskogo Gosudarstvennogo Avtomobil'no-Dorozhnogo Universiteta*, 1 (53), 43–48. doi: 10.26518/2071-7296-2017-1(53)-43-48 [In Russian].
11. 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].
12. Bobkov, S. P., & Polishchuk, I. V. (2016). Sravneniye razlichnykh podkhodov k opredeleniyu prodolzhitel'nosti udara tverdykh tel pri izmel'chenii. *Vestnik Ivanovskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta*, 5, 66–70 [In Russian].
13. Arendarenko, V. M., Antonets, A. V., Savchenko, N. K., Samoylenko, T. V., & Ivanov, O. M. (2020). Rozrakhunkova model' hnavitatsiynoho rukhu zernovoho materialu v pokhylomu kanali z dyskretno zminnym kutom nakhylyu. *Visnyk Poltavskoyi Derzhavnoyi Ahrarnoyi Akademiyi*, 4, 273–282. doi: 10.31210/visnyk2020.04.35 [In Ukrainian].
14. Negi, S. C., Lu, Z., & Jofriet, J. C. (1997). A numerical model for flow of granular materials in silos. *Model Validation School of Engineering*, 68 (3), 231–236. doi: 10.1006/jaer.1997.0197
15. 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
16. Manzhosov, V. K. (2006). *Modeli prodol'nogo udara*. Ulyanovsk: Izdatel'stvo ULGTU [In Russian].
17. Trisvyatskiy, L. A. (1978). *Khraneniye zerna i zernovykh produktov*. Moskva: Kolos [In Russian].
18. Boumans, G. (2015). *Grain Handling and Storage. Developments in Agricultural Engineering 4*. Elsevier Science.
19. Gyachev, A. V. (1986). *Osnovy teorii bunkerov i silosov: uchebnoye posobiye*. Barnaul: Izdatel'stvo B. I. [In Russian].
20. Kong, E, Liu, D., Guo, X., Yang, W., Sun, J., Li, X. Zhan, K., Cui D., Lin, J., & Zhang, A. (2013). Anatomical and chemical characteristic associated with lodging resistance in wheat. *The Crop Journal*, 1 (10), 43–45. doi: 10.1016/j.cj.2013.07.012

Стаття надійшла до редакції: 07.03.2021 р.

Бібліографічний опис для цитування:

Самойленко Т. В., Арндаренко В. М., Антонєць А. В., Кошова О. П. Про ударну взаємодію падаючого зерна пшениці на жорстку бетонну основу силосу. *Вісник ПДАА*. 2021. № 2. С. 259–265.

© Самойленко Тетяна Володимирівна, Арндаренко Володимир Миколайович, Антонєць Анатолій Вікторович, Кошова Оксана Петрівна, 2021