

Моделювання ударної взаємодії зерна з пласкою твердою поверхнею

Т.В. Самойленко¹, А.В. Антоненко², В.М. Арендаренко³, В.І. Мельник⁴

^{1, 2, 3} Полтавська державна аграрна академія (м. Полтава, Україна)

⁴ Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка (м. Харків, Україна)

email: ² anatolii.antonets@pdaa.edu.ua, ⁴ victor_melnik@ukr.net;

ORCID: ² 0000-0002-2332-6711; ³ 0000-0003-0701-7983; ⁴ 0000-0002-1176-2831

Завантаження силосів сипким зерновим вантажем відбувається як правило гравітаційним способом. При цьому сипкий матеріал із завантажувального отвору силосу під дією сили тяжіння падає на його бетонне дно. Удар зернівки характеризується малим проміжком ударного процесу і значним рівнем ударних сил. При цьому відбувається травмування зернівок особливо в початковий період завантаження. В нижній частині зернового насипу накопичується певний об'єм ушкодженого зерна.

У даній статті на основі класичної теорії Герца виконані теоретичні дослідження ударної взаємодії зерна із пласкою твердою поверхнею силосу. При цьому бетонне дно розглядається як пружний півпростір, а падаюче на нього зерно озимої пшениці вважається в'язко-пружним. У роботі визначені основні характеристики ударної взаємодії зернівки з нерухомою перешкодою. Зокрема, знайдені значення сили контактної взаємодії та максимальний тиск для зерен озимої пшениці, що враховують початкову швидкість руху зерна та швидкість набуту ним при падінні на дно силосу висотою h . За допомогою розкладання підінтегральної функції у ряд Маклорена була також отримана спрощена залежність для визначення часу ударної взаємодії зерна з бетонним дном силосу.

У ході дослідження обчислено максимальний тиск P_{max} , який виникає при контактній взаємодії озимого зерна пшениці з бетоном. Він відповідає внутрішнім напруженням σ , що виникають у точці контакту зерна із перешкодою. Отриманий тиск контактної взаємодії P_{max} є значно більшим середнь-остатистичної границі міцності озимої пшениці σ_{max} , тобто виконується нерівність $P_{max} > \sigma_{max}$. Це свідчить про пружно-пластичний характер деформації озимого зерна, а отже про його травмування. Вид та ступінь деформації зернової маси залежить від ступеня перевищення $P_{max} \gg \sigma_{max}$.

Ключові слова: силос, зерно, травмування, ударна взаємодія, тиск, напруження, деформація.

Актуальність проблеми. Завантаження силосів змонтованих на бетонній основі зерновим матеріалом як правило здійснюється гравітаційним способом. Зерно із над силосного конвеєра через засипний отвір вільно падає на дно силосу. Падаючи із значної висоти, зерно багаторазово вдаряється об бетонне дно цієї споруди та інші внутрішні її елементи. Таке гравітаційне завантаження призводить до механічного травмування зерна, котре буде знаходитись у нижній частині зернового насипу [1, 2, 3, 4].

Вченими [5,6] встановлено, що травмоване зерно має знижену стійкість до зберігання. Тому порушення цілісності зерна веде до різкого росту дихальних процесів внаслідок вільного доступу повітря до внутрішньої будови зернівки і як результат до інтенсивного розвитку мікроорганізмів та бактерій в ушкоджених місцях. В процесі дихання виділяється значна кількість тепла, тому при відповідних несприятливих умовах зерно може самозігріватися. Самозігрівання зерна приводить до того, що воно псується або повністю гине.

В роботі [7] вказано на те, що після нетривалого зберігання на ушкоджені зерні кількість бактерій було в 3,5 рази, а в плісені в 50 раз більше ніж в цілому.

Таким чином, зменшення травмування зерна під час його завантаження в силоси є важливою інженерною задачею, необхідність вирішення якої обумовлено з погіршенням стійкості зернового матеріалу при його зберіганні у високих силосах з бетонним дном.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

З літературних джерел відомо [8,9], що під час взаємодії зерна з різними перешкодами (рухомими і нерухомими) на нього діють всі види механічних зусиль: статичні, тобто зусилля які плавно зростають; динамічні, коли навантаження на зерно виражаються ударами; знакозмінні, коли навантаження змінюються як за знаком так і за величиною. Тому падаюче зерно з великої висоти в силосах теж піддається динамічному навантаженню, величина якого залежить від висоти споруди і швидкості падіння.

Зіткнення зерна з бетонною перешкодою представляє певну наукову проблему з точки зору фізичних і технологічних процесів, які відбуваються під час завантаження силосів зерном. Для вивчення ударних процесів які відбуваються із зерном озимої пшениці при її завантаженні в силоси була використана класична теорія Герца [10,11,12]. В основі якої лежать дві гіпотези. Перша заснована на тому, що при взаємодії співударних тіл суттєвими є місцеві деформації в зоні їх контакту. Друга гіпотеза вказує на те, що залежність контактної сили від контактної деформації при ударі залишається такою ж, як і при статичному стисканні тіл [13, 14].

Досліджуючи рух окремих зернівок і їх удар об нерухому перешкоду приходимо до такого висновку. Навіть прості випадки коли зернівка має сферичну форму (наприклад, горох, соя) і пружний стан, динаміка її взаємодії із жорсткою бетонною основою являється досить складною в математичному розумінні задачею. Тому в даній статті зроблена спроба визначити максимальний тиск, який виникає під час взаємодії зерна озимої пшениці з твердою пласкою поверхнею.

Матеріали і методи дослідження. Ударна взаємодія зерна озимої пшениці з іншими твердими тілами під час його завантаження в силоси, приводить до виникнення місцевих контактних деформацій та максимального тиску в місці контакту зернівки з бетонним дном силосу. Під час удару в зернівках озимої пшениці можуть з'явитись мікротріщини, зломи, вм'ятини, та інші uszkodження. Для того, щоб зменшити ці uszkodження або повністю їх позбутись необхідно у середині силосів встановлювати спеціальні пристрої за допомогою яких можна зменшити висоту падіння та швидкість руху зернівок.

Бетонне дно силосу являється пласкою абсолютно твердою поверхнею, яку приймаємо за пружний півпростір, утворений горизонтальною площиною із своїм коефіцієнтами Юнга і Пуассона. Для моделювання ударної взаємодії зерна озимої пшениці була використана класична теорія удару Герца, яка дає можливість визначити місцеві деформації та контактні напруження що виникають в окремих зернівках [10 - 14]. Вибір цієї теорії пояснюється незначними деформаціями зернівок озимої пшениці під час їх удару по бетону, які є в'язко – пружними.

Мета дослідження – визначення максимального тиску, який виникає при контактній взаємодії зернівки озимої пшениці із бетонною основою силосу, при завантаженні зернового вантажу в силос.

Результати досліджень. Приймаємо, що дія сили тяжіння на зерно, через його незначну масу та швидкість під час удару є незначною та нею можна знехтувати. Контактне зближення тіл після

зіткнення $x = x(t)$ за теорією Герца описуємо диференціальним рівнянням:

$$mx'' = -cx^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

де σ_{max} – переміщення центрів мас співударних тіл у напрямку удару; c – константа, значення якої у нашому випадку визначається радіусами кривизни сферичної поверхні зерна і пласкої бетонної поверхні та відповідними пружними властивостями матеріалу. Згідно теорії Герца та [10, 11] маємо:

$$c = \frac{4\sqrt{R_1}}{3Q} \cdot \frac{\left(1 + \frac{3}{8}\varepsilon^2 + \frac{15}{64}\varepsilon^4\right)^{\frac{1}{2}}}{\left(1 + \frac{\varepsilon^2}{4} + \frac{9\varepsilon^4}{64} + \frac{25\varepsilon^6}{256}\right)^{\frac{3}{2}}};$$

$$Q = \frac{1 - \mu^2}{E} + \frac{1 - \mu_n^2}{E_n};$$

$$\varepsilon^2 = \sqrt{\frac{16\left(5 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2}{9\left(3 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2} + \frac{64\left(1 - \frac{R_2}{R_1}\right)}{3\left(3 + \frac{R_2}{R_1}\right)}} - \frac{4\left(5 + \frac{R_2}{R_1}\right)}{3\left(3 + \frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (2)$$

де m – маса зернини, E, μ – його модуль пружності і коефіцієнт Пуассона, $R_1 \geq R_2$ – радіуси кривизни зерна, E_n, μ_n – модуль пружності і коефіцієнт Пуассона горизонтальної поверхні контакту.

З диференціального рівняння (1) знайдемо формулу швидкості руху зерна:

$$x'' = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = v \frac{dv}{dx}$$

$$v \frac{dv}{dx} = \frac{-c}{m} x^{\frac{3}{2}}$$

$$v dv = \left(\frac{-c}{m} x^{\frac{3}{2}}\right) dx \quad (3)$$

Проінтегруємо обидві частини рівняння (3):

$$\frac{v^2}{2} + C_1 = C_2 - \frac{2c}{5m} x^{\frac{5}{2}}$$

$$\frac{dx}{dt} = \sqrt{2C_2 - C_1 - \frac{4c}{5m} x^{\frac{5}{2}}} \quad (4)$$

Введемо в (4) початкові умов:

$$\begin{cases} x(0) = 0 \\ x'(0) = v' \end{cases}$$

де v – швидкість зіткнення тіл, яка враховує початкову швидкість зерна V_0 . Отримаємо:

$$\frac{dx}{dt} = \sqrt{v^2 - \frac{4c}{5m}x^{\frac{5}{2}}}$$

$$\frac{dx}{dt} = v \sqrt{1 - \frac{4c}{5mv^2}x^{\frac{5}{2}}}. \quad (5)$$

Використовуючи (5) знайдемо рівняння для максимального зближення тіл у при ударі:

$$1 - \frac{4c}{5mv^2}x^{\frac{5}{2}} = 0$$

$$\gamma = \sqrt[5]{\left(\frac{5mv^2}{4c}\right)^2} = \left(\frac{5mv^2}{4c}\right)^{\frac{2}{5}}. \quad (6)$$

За допомогою інтегрування (5) на проміжку $[0; \gamma]$ та враховуючи (6) отримаємо час ударної взаємодії t :

$$dt = \frac{2dx}{v \sqrt{1 - \frac{4c}{5mv^2}x^{\frac{5}{2}}}}$$

$$t = \frac{2}{v} \int_0^\gamma \frac{dx}{\sqrt{1 - \frac{4c}{5mv^2}x^{\frac{5}{2}}}}. \quad (7)$$

Враховуючи (6) перепишемо (7) як:

$$t = \frac{2}{v} \int_0^\gamma \frac{dx}{\sqrt{1 - \left(\frac{x}{\gamma}\right)^{\frac{5}{2}}}}. \quad (8)$$

Введемо в (8) заміну $y = x/\gamma$, тоді отримаємо:

$$t = \frac{2\gamma}{v} \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{1 - y^{\frac{5}{2}}}} = \frac{2\gamma}{v} \int_0^1 \left(1 - y^{\frac{5}{2}}\right)^{-\frac{1}{2}} dy = \frac{2\gamma}{v} I$$

$$t = \frac{2\gamma}{v} \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{1 - y^{\frac{5}{2}}}} =$$

$$= \frac{2\gamma}{v} \int_0^1 \left(1 - y^{\frac{5}{2}}\right)^{-\frac{1}{2}} dy = \frac{2\gamma}{v} I \quad (9)$$

Для подальшого розв'язку перепишемо підінтегральну функцію (9) використовуючи розклад в ряд Маклорена:

$$I = \int_0^1 \left(1 + \frac{1}{2 \cdot 1!} y^{\frac{5}{2}} + \frac{3}{4 \cdot 2!} \cdot \left(y^{\frac{5}{2}}\right)^2 + \right. \\ \left. + \frac{15}{8 \cdot 3!} \cdot \left(y^{\frac{5}{2}}\right)^3 + \frac{105}{16 \cdot 4!} \cdot \left(y^{\frac{5}{2}}\right)^4 + \dots + \right. \\ \left. + \frac{0,5 \cdot (0,5 + 1) \dots (0,5 + (n - 1))}{n!} \times \right. \\ \left. \times \left(y^{\frac{5}{2}}\right)^n \right) dy. \quad (10)$$

Проінтегрувавши (10) маємо:

$$I = \left(y + \frac{y^{\frac{7}{2}}}{7 \cdot 1!} + \frac{3y^{\frac{9}{2}}}{29 \cdot 2!} + \right. \\ \left. + \frac{15y^{\frac{13}{2}}}{133 \cdot 3!} + \frac{105y^{\frac{17}{2}}}{641 \cdot 4!} + \right. \\ \left. + \frac{945y^{\frac{21}{2}}}{3157 \cdot 5!} + \frac{10395y^{\frac{25}{2}}}{15689 \cdot 6!} + \right. \\ \left. + \frac{135135y^{\frac{29}{2}}}{78253 \cdot 7!} + \dots \right) \Big|_0^1 \approx$$

$$\approx 1 + 0,14285 + 0,05172 + 0,01879 +$$

$$+ 0,00682 + 0,00249 + 0,00092 +$$

$$0,00034 + 0,00012 \approx 1,224.$$

З точністю до 0,0001 отримуємо час ударної взаємодії:

$$t = 1,224 \frac{2\gamma}{v}. \quad (11)$$

Знаючи γ враховуючи (6), знайдемо максимум сили контактної взаємодії F_{max} :

$$F_{max} = c\gamma^{\frac{3}{2}}. \quad (12)$$

При цьому з [10, 12, 13] маємо максимальний тиск:

$$P_{max} = \frac{3F_{max}}{2\pi a_{max}b_{max}}, \quad (13)$$

де

$$a_{max} = \left(\frac{3}{4} Q F_{max} R_1 \left(1 + \frac{3}{8} \varepsilon^2 + \frac{15}{64} \varepsilon^4 \right) \right)^{\frac{1}{3}};$$

$$b_{max} = a_{max} \sqrt{1 - \varepsilon^2} \quad (14)$$

Максимальний тиск, який виникає при контактній взаємодії зерна з абсолютно твердим пластичним тілом відповідає внутрішнім напруженням, які виникають у самій зернині у точці контакту. Обчисливши максимальний тиск при контакті зерна та порівнявши його з середньостатистичною границею його міцності σ_{max} можна оцінити ступінь його травмування.

Очевидно, що при $P_{max} > \sigma_{max}$, виникає деформація зерна, а отже і його травмування. Вид та ступінь деформації зернової маси залежить від ступеня перевищення $P_{max} \gg \sigma_{max}$.

Обчислення основних характеристик ударної взаємодії пшениці при падінні на бетонну підлогу силосу. Для проведення розрахунків візьмемо наступні усереднені дані для озимого зерна пшениці та плоскої бетонної поверхні силосу [15]:

$$R_1 = 0,006 \text{ м}, R_2 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3,$$

$$m = 4 \cdot 10^{-5} \text{ кг}, E = 26 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

$$E_n = 2 \cdot 10^{10} \text{ Па}, \mu = 0,12, \mu_n = 0,17,$$

$$h = 26 \text{ м}, V_0 = 0,65 \text{ м/с},$$

$$v = V_0 + \sqrt{2gh} = 23,224 \text{ м/с}.$$

Згідно з наведеними вихідними даними за допомогою (2) знаходимо:

$$\varepsilon^2 = 0,9384, Q = 3,796 \cdot 10^{-8} \text{ Па},$$

$$c = 1,967 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{Па}.$$

За допомогою формул (6) та (11-14) одержимо:

$$\gamma = 7,158 \cdot 10^{-4} \text{ м},$$

$$t = 7,545 \cdot 10^{-5} \text{ с},$$

$$F_{\max} = 37,67 \text{ Н}$$

$$a_{\max} = (0,64348 \cdot 10^{-8} \cdot 1,558)^{\frac{1}{3}} = 2,156 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$b_{\max} = 5,351 \cdot 10^{-4} \text{ м},$$

$$P_{\max} = 15,598 \text{ МПа} \quad (15)$$

Водночас границя міцності для озимого зерна пшениці в середньому складає $\sigma_{\max} = 5 \text{ МПа}$, Порівнюючи $\sigma_{\max}$ із отриманими результатами (15) бачимо, що максимальний тиск при падінні озимого зерна пшениці на бетон у точці контакту є значно більшим максимально допустимого значення $P_{\max} \gg \sigma_{\max}$.

Висновки і перспективи. Згідно із проведеним дослідженням при загрузці озимої пшениці у силос її нижні шари травмуються внаслідок виникнення пружно-пластичної деформації зерен при їх точковому контакті з бетоном. Це, у свою чергу, може призводити до псування нижніх слоїв озимої пшениці під час його зберігання у силосі.

Для того, щоб запобігти виникненню травмування зерна доцільно використовувати спеціальні пристрої, що зменшують швидкість руху зернової маси під час її завантаження у силос. Зокрема, в результаті проведених раніше досліджень [4, 16], нами були запропоновані наступні установки для руху зерна при завантаженні його у силос: пристрій руху зерна по гвинтовій лінії зі змінним кутом нахилу; пристрій з похилими каналами із дискретно змінним кутом нахилу.

Подальші дослідження будуть направлені на проведення досліджень щодо вивчення характеру взаємодії зерна різних культур, під час його руху у розгінному та гальмівному жолобах запропонованих пристроїв.

Література

1. Михайлов Е.В., Кольцов М.П. Травмирования семян зерновых культур в процессе послеуборочной обработки и пути его снижения. Праці ТДАУ, 2013. Вип.11. Т. 13. №3. С. 139-145.
2. Тарасенко А.П. Снижение травмирования зерна. Москва: Россельхозиздат, 1980. 30 с.
3. Олексієнко В.О. Проблеми травмування зерна при переміщенні і завантаженні в силоси та пропозиції щодо його зниження. Праці ТДАУ. Вип.14. Т.1. С. 20-23.
4. Самойленко Т.В., Арендаренко В.М., Антоненко А.В. Кінематика руху зерна по спіральному пристрою зі змінним кутом спуску. Вісник ПДАА. 2020. №1. С. 267-274. doi:10.31210/visnyk 2020.01.31.
5. Суханова М.В., Забродин В.П. Сравнительный анализ воздействия поверхности различной жесткости рабочих органов сельскохозяйственной техники на твердую частицу сыпучего тела. Вестник аграрной науки Дона. №2 (38). 2017. С.19 – 22.
6. Крылов О.Р., Дородов П.В. О механической прочности семян. Достижение науки и техники АПК. 2018. №8. С. 61-63.
7. Трисвятский А.А. Хранение зерна. Москва: Агропромиздат. 1985. 351 с.
8. Ляшенко Я.А., Виллерт Э., Попов В.Л. Механика столкновений твердых тел: влияние трения и адгезии. 1. Обзор экспериментальных и теоретических работ. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2018. №2. С. 44-61. doi:10.15593 / perm. mech/2018.2.05.
9. Винокуров К.В., Никонов С.Н. Элеваторы, склады, зерносушилки: Учеб. пособие. Саратов : Сарат. гос. техн. ун-т, 2008. 88 с.
10. Ольшанський В.П., Богомоллов О.В., Богомоллов О.О. Про ударну взаємодію важкого твердого тіла з пружним півпростором. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв». Харків, 2018. Вип. 194. С. 38-46.
11. Гольдский В. Удар. Теория и физические свойства содержащихся тел. Москва: Стройиздат, 1965. 447 с.
12. Кильчевский Н.А. Динамическое контактное сжатие твердых тел. Удар. Киев: Наукова думка, 1976. 319 с.
13. Пановко Я.Г. Введение в теорию механического удара. Москва: Наука, 1987. 223 с.
14. Манжосов В.К. Модели продольного удара. Ульяновск: УлГТУ, 2006. 160 с.
15. Хайлис Г.А. Механика растительных материалов. Киев: УААН, 1994. 332 с.

16. Арендаренко В.М., Антоненко А.В., Савченко Н.К., Самойленко Т.В., Иванов О.М. Розрахункова модель гравітаційного руху зернового матеріалу в похилому каналі з дискретно змінним кутом нахилу. *Вісник ПДАА*. 2020. № 4. С. 273–282. doi: 10.31210/visnyk2020.04.35.

References

1. Mikhailov E.V. and Koltsov M.P. (2013) 'Injury to grain seeds during post-harvest processing and ways to reduce it', *TDAU works*, (11(3)), p.p. 139-145.
2. Tarasenko A.P. (1980) *Snizheniye travmirovaniya zerna*. Moscow: Rossel'khozizdat, 30 p.
3. Oleksienko V.O. and Koloskov D.O. (2014) 'Problems of grain injury during movement and loading into silos and proposals for its reduction', *TDAU works*, (14(1)), p.p. 20-23.
4. Samoylenko T.V., Arendarenko V.M. and Antonets A.V. (2020) 'Kinematics of grain movement on a spiral device with a variable descent angle', *PDAA Bulletin*, (1), p.p. 267-274. doi: 10.31210/visnyk2020.01.31.
5. Sukhanova M.V. and Zabrodin V.P. (2017) 'Comparative analysis of the effect of the surface of different rigidity of the working bodies of agricultural machinery on a solid particle of a loose body', *Don Agricultural Science Bulletin*, (2 (38)), p.p. 19-22.
6. Krylov O.R. and Dorodov P.V. (2018) 'On the mechanical strength of seeds', *Achievement of science and technology of the agro-industrial complex*, (8), p.p. 61-63.
7. Trisvyatsky A.A. (1985) *Khraneniye zerna*. Moscow: Agropromizdat, 351 p.

8. Lyashenko Ya.A., Villert E. and Popov V.L. (2018) 'Collision Mechanics of Solids: Effects of Friction and Adhesion. 1. Review of experimental and theoretical work', *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University, Mechanics*, (2), p.p. 44-61. doi:10.15593/perm.mech/2018.2.05.
9. Vinokurov K.V. and Nikonov S.N. (2008) *Elektrovatory, sklady, zernosushilki: Ucheb. posobiye*. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t, 88 p.
10. Ol'shans'kyy V.P., Bohomolov O.V. and Bohomolov O.O. (2018) 'On the shock interaction of a heavy solid with an elastic half-space', *Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture "Modern directions of technology and mechanization of processes of processing and food production"*, (194), p.p. 38-46.
11. Goldsky V. (1965) *Udar. Teoriya i fizicheskiye svoystva soderzhimyykh tel*. Moscow: Stroyizdat, 447 p.
12. Kilchesvsky N.A. (1976) *Dinamicheskoye kontaktnoye szhatiye tverdykh tel. Udar*. Kiev: Naukova dumka, 319 p.
13. Panovko Y.G. (1987) *Vvedeniye v teoriyu mekhanicheskogo udara*. Moscow: Nauka, 223 p.
14. Manzhosov V.K. (2006) *Modeli prodol'nogo udara*. Ulyanovsk: UIGTU, 160 p.
15. Khaylis G.A. (1994) *Mekhanika rastitel'nykh materialov*. Kiev: UAAN, 332 p.
16. Arendarenko V.M., Antonets A.V., Savchenko N.K., Samoylenko T.V. and Ivanov O.M. (2020) 'Calculated model of gravitational motion of grain material in an inclined channel with a discrete variable angle of inclination', *PDAA Bulletin*, (4), p.p. 273–282. doi: 10.31210/visnyk2020.04.35.

Аннотация

Моделирование ударного взаимодействия зерна с плоской твердой поверхностью

Т.В. Самойленко, А.В. Антоненко, В.М. Арендаренко, В.И. Мельник

Загрузка силосов сыпучим зерновым грузом происходит обычно гравитационным способом. При этом сыпучий материал с загрузочного отверстия силоса под действием силы притяжения падает на его бетонное дно. Удар зерновки характеризуется малым промежутком ударного процесса и значительным уровнем ударных сил. При этом происходит травмирование зерновок особенно в начальный период загрузки. В нижней части зерновой насыпи накапливается определенный объем поврежденного зерна.

В данной статье на основе классической теории Герца выполнены теоретические исследования ударного взаимодействия зерна с плоской твердой поверхностью силоса. При этом бетонное дно рассматривается как упругое полупространство, а падающее на него зерно озимой пшеницы считается вязко-упругим. В работе определены основные характеристики ударного взаимодействия зерновки с неподвижным препятствием. В частности, найдены значения силы контактного взаимодействия и максимальное давление для зерен озимой пшеницы σ_{max} , учитывающие начальную скорость движения зерна и скорость приобретенную им при падении на дно силоса высотой h . С помощью разложения подынтегральной функции в ряд Маклорена была также получена упрощенная зависимость для определения времени ударного взаимодействия зерна с бетонным дном силоса.

В ходе исследования вычислено максимальное давление P_{max} , которое возникает при контактном взаимодействии озимого зерна пшеницы с бетоном. Оно отвечает внутренним напряжениям σ , возникающим

в точке контакта зерна с препятствием. Полученное давление контактного взаимодействия P_{max} значительно больше среднестатистического предела прочности озимой пшеницы, то есть выполняется неравенство $P_{max} > \sigma_{max}$. Это свидетельствует о упруго-пластическом характере деформации озимого зерна, а значит о его травмировании. Вид и степень деформации зерновой массы зависит от степени превышения $P_{max} \gg \sigma_{max}$.

Ключевые слова: *силос, зерно, травмирование, ударное взаимодействие, давление, напряжение, деформация.*

Abstract

Modeling the impact interaction of a grain with a flat solid surface

T.V. Samoylenko, A.V. Antonets, V.M. Arendarenko, V.I. Mel'nik

The loading of silos with bulk grain cargo is usually done by gravity. In this case, the bulk material from the loading opening of the silo falls under the action of gravity onto its concrete bottom. The impact of the weevil is characterized by a small interval of the impact process and a significant level of impact forces. In this case, the weevils are injured, especially in the initial period of loading. A certain amount of damaged grain accumulates in the lower part of the grain mound.

In this article, on the basis of the classical theory of Hertz, theoretical studies of the shock interaction of grain with a flat solid surface of a silo are carried out. In this case, the concrete bottom is considered as an elastic half-space, and the grain of winter wheat falling on it is considered viscous-elastic. The main characteristics of the shock interaction of a weevil with a fixed obstacle are determined in the work. In particular, the values of the force of contact interaction and the maximum pressure for grains of winter wheat σ_{max} were found, taking into account the initial speed of movement of the grain and the speed acquired by it when it falls to the bottom of the silo with height h . Using the expansion of the integrand in the Maclaurin series, a simplified dependence was also obtained to determine the time of impact interaction of grain with the concrete bottom of the silo.

In the course of the study, the maximum pressure P_{max} was calculated, which occurs during the contact interaction of winter wheat grain with concrete. It corresponds to internal stresses σ arising at the point of contact of a grain with an obstacle. The obtained pressure of contact interaction P_{max} is much higher than the average statistical ultimate strength of winter wheat, that is, the inequality $P_{max} > \sigma_{max}$ is fulfilled. This indicates the elastic-plastic nature of the deformation of winter grain, and hence its injury. The type and degree of deformation of the grain mass depends on the degree of excess $P_{max} \gg \sigma_{max}$.

Keywords: *silage, grain, injury, shock interaction, pressure, stress, deformation.*

Бібліографічне посилання/ Bibliography citation: Harvard

Samoylenko, T. V. et al. (2021) 'Modeling the impact interaction of a grain with a flat solid surface', *Engineering of nature management*, (1(19), pp. 63 - 68.

Подано до редакції / Received: 09.01.2021