

УДК 633.15:631.3:004.94 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.123-130](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.123-130)

**В.Ю. Дудін**, доц, канд. техн. наук, **І.М. Білоус**, здобувач вищої освіти на третьому рівні  
*Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро, Україна*  
*e-mail: bilous.i.m@dsau.dp.ua*

## Дослідження процесу руйнування зерна кукурудзи з використанням цифрових моделей

Основою цього дослідження є процес руйнування зерна кукурудзи. Проведено випробування для визначення впливу геометричних параметрів та фізико-механічних (модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, гранична напруга розтягнення та зсуву) на механічні властивості зерна кукурудзи. Розроблено модель механіки контакту пуансона з зерном кукурудзи для аналізу його механічних властивостей, які впливають на якість подрібнення та для визначення адекватних параметрів моделі, що відповідадуть лабораторному експерименту.

**зерно кукурудзи, моделювання, стиск, зусилля руйнування**

**Постановка проблеми.** В сучасному машинобудуванні широкого розповсюдження набуло проектування систем на основі моделей (Model-Based Systems Engineering (MBSE)), однією з основних ідей якого є створення та випробування віртуальних моделей технічних засобів, які розробляються [1]. Такий підхід, в порівнянні з традиційним, різко зменшує ресурси та час на процес розробки нової або удосконалення існуючої машини, проте адекватність моделювання цілком буде залежати від точності вихідних даних, на основі яких проводиться моделювання. Це стосується і процесу руйнування кормових матеріалів, зокрема зерна кукурудзи, коли для отримання достовірних даних результатів моделювання потрібно створити модель зернини, максимально наближену до реальної, та задати фізико-механічні параметри цій моделі, які найбільш повно відповідадуть параметрам досліджуваного зразка.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Як стверджують автори [2], руйнування зерна може бути зумовлене як внутрішніми, так і зовнішніми факторами, такими як фізико-механічні властивості зерна та конструктивні параметри обладнання, що використовується для його обробки. Дослідження механічних властивостей зерна [3] показують, що текстура та структура клітин значно впливають на його механічні характеристики.

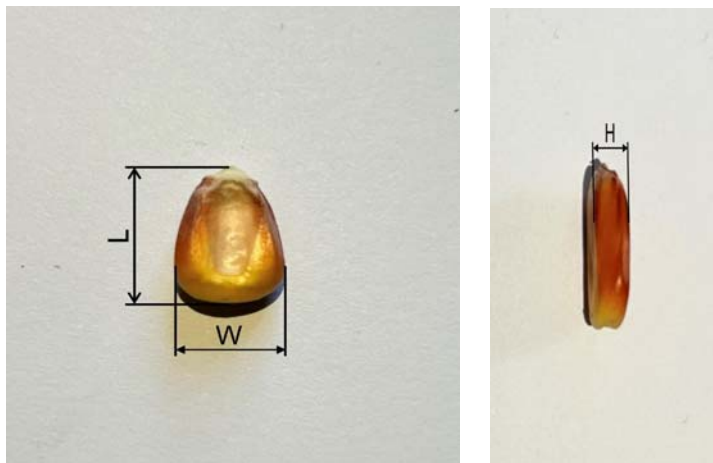
Метод дискретних елементів (DEM) був апробований для прогнозування пошкоджень зерна в промислових системах обробки. Експерименти показали, що пошкодження зерна корелює з умовами обробки, і моделювання було вдосконалено шляхом оптимізації параметрів, що призводить до підвищення точності прогнозування руйнування [4]. Також цей метод використовують для дослідження властивостей частинок, для яких важко визначити дію перехідних сил та розсіювання енергії звичайним експериментальним методом [5].

Точність моделювання дискретних елементів залежить від вхідних параметрів моделі і її форми [6], а саму модель створюють шляхом об'єднання сферичних частинок, що називається агрегацією сфер [7, 8]. Цей метод було успішно застосовано для моделювання зерен таких культур, як горох [9], рис [10], соя [11] і пшениця [12]. При цьому особливості вихідних параметрів моделі будуть варіюватися не лише в

залежності від виду зерна, а і від сорту всередині одного виду. В зв'язку з цим виникає необхідність в уточненні вихідних параметрів для конкретного виду та сорту.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є створення в середовищі Simcenter STAR-CCM+ адекватної віртуальної моделі зерна кукурудзи шляхом зіставлення зусилля руйнування отриманого віртуально та лабораторно.

**Виклад основного матеріалу.** На першому етапі досліджень було визначено середні розміри зернини кукурудзи сорту П8816 зі 150 заміряних зернин - довжина ( $L$ ) – 11,1 мм, ширина ( $W$ ) – 8,1 мм, висота ( $H$ ) – 4,7 мм (рис. 1).



$L$  – довжина;  $W$  – ширина;  $H$  – висота

Рисунок 1 – Розміри зерна кукурудзи

*Джерело: розроблено авторами*

На основі замірів та враховуючи огляд досліджень в програмному середовищі Simcenter STAR-CCM+ [2, 13], методом агрегації 86 сфер, було створено модель дискретних елементів (DEM) (рис. 2). При цьому було застосовано контактна модель Герца-Міндліна, відповідно до якої параметри моделі були розділені на параметри властивостей матеріалу та параметри взаємодії. До перших входять щільність частинок, коефіцієнт Пуассона, модуль Юнга, гранична напруги розтягу та зсуву. Параметри взаємодії включають коефіцієнт відновлення зіткнення, коефіцієнт статичного тертя і коефіцієнт тертя кочення (табл. 1).

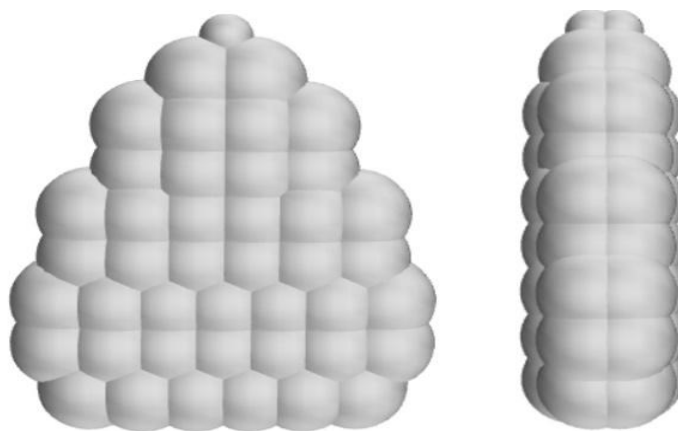


Рисунок 2 – Модель зернини кукурудзи

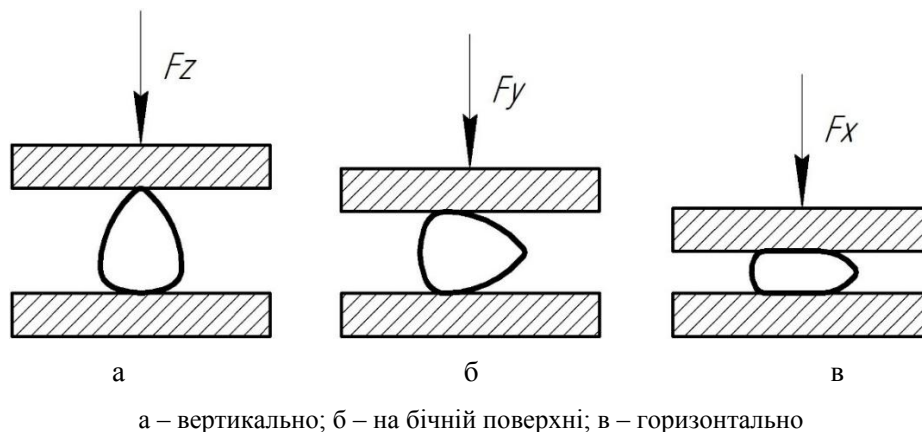
*Джерело: розроблено авторами.*

Таблиця 1 – Параметри симуляції DEM

Матеріали	Параметри	Значення
Кукурудза	Коефіцієнт Пуассона	0,3...0,5
	Модуль Юнга, МПа	10...40
	Щільність частинок, кг/м <sup>3</sup>	1213
	Коефіцієнт відновлення після зіткнення	0,37 [14]
	Коефіцієнт статичного тертя	0,2 [15]
	Гранична напруга розтягу, МПа	1...3
Сталь	Коефіцієнт Пуассона	0,3
	Модуль зсуву, Па	$7,9 \times 10^{10}$
	Щільність, кг/м <sup>3</sup>	7800
Кукурудза та сталь	Коефіцієнт відновлення після зіткнення	0,5 [16]
	Коефіцієнт статичного тертя	0,408 [16]
	Коефіцієнт тертя кочення	0,01 [16]

Джерело: розроблено авторами

Силу руйнування визначали в трьох положеннях зернини: вертикальному, на бічній поверхні та горизонтальному (рис. 3).



а – вертикально; б – на бічній поверхні; в – горизонтально

Рисунок 3 – Положення зернини кукурудзи при визначенні зусилля руйнування:

Джерело: розроблено авторами

В програмному середовищі Simcenter STAR-CCM+ на основі розробленої моделі зерна кукурудзи було проведено віртуальні дослідження процесу її руйнування. При цьому застосували повний факторний план де змінними факторами були коефіцієнт Пуассона ( $\mu_p$ ), модуль Юнга ( $E_p$ ) та гранична напруга розтягу та зсуву ( $W_p$ ), які варіювались на трьох рівнях (табл. 2).

Таблиця 2 - Рівні та інтервали варіювання факторів

Показник	Коефіцієнт Пуассона $\mu_p$	Модуль Юнга $E_p$ , МПа	Напруга розтягу та зсуву $W_p$ , МПа
Верхній рівень (+1)	0,3	10	1
Основний рівень (0)	0,4	25	2
Нижній рівень (-1)	0,5	40	3
Інтервал варіювання	0,1	15	1

Джерело: розроблено авторами

Отримані в результаті віртуального експерименту дані було оброблено в хмарному програмному середовищі Wolfram Cloud що дало змогу отримати рівняння регресії залежності сили руйнування зерна кукурудзи від досліджуваних факторів, які, після перевірки на адекватність та відсіювання незначущих факторів набули вигляду:

- при положенні зерна кукурудзи вертикально

$$F_z = 444,043 - 16,379E_p + 0,173E_p^2 - 121,583W_p + 9,039E_pW_p; \quad (1)$$

- при положенні зерна кукурудзи на бічній поверхні

$$F_y = 955,5 - 19,352E_p - 231,111\mu_p - 743,556W_p + 18,1E_pW_p + 159,056W_p^2; \quad (2)$$

- при положенні зерна кукурудзи горизонтально:

$$F_x = 1392,43 - 38,416E_p + 0,23E_p^2 - 453,89\mu_p - 853,94W_p + 27,022E_pW_p + 155,39W_p^2. \quad (3)$$

Графічну інтерпретацію отриманих залежностей приведено на рис. 4.

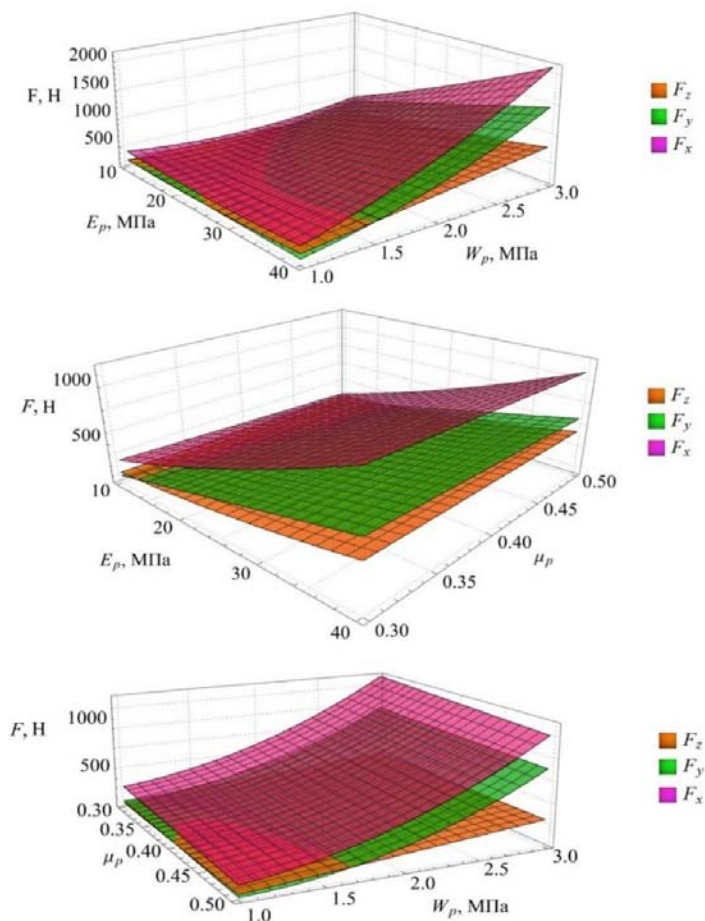
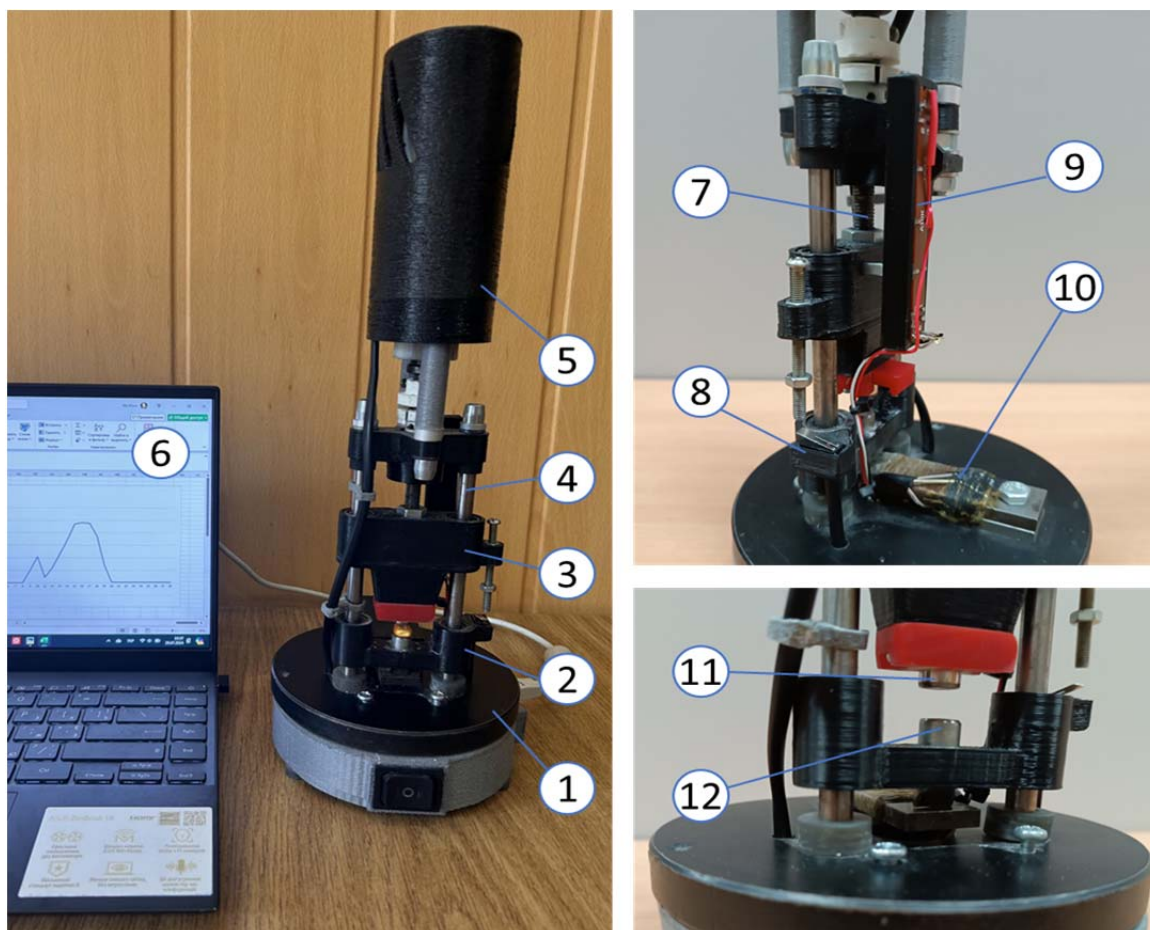


Рисунок 4 – Залежність зусилля руйнування зерна кукурудзи від модуля Юнга ( $E_p$ ), коефіцієнта Пуассона ( $\mu_p$ ) та граничної напруги розтягу та зсуву ( $W_p$ ) при положенні зернини вертикально ( $F_z$ ), горизонтально ( $F_x$ ) та на бічній поверхні ( $F_y$ )

Джерело: розроблено авторами

Наступним етапом досліджень було отримання експериментальних значень зусилля руйнування зерен кукурудзи при тих же умовах, що і при віртуальному експерименті. Лабораторні дослідження проводилися на розробленому та реалізованому лабораторному стенді (рис. 5), який складається зі станини 1, встановлених на ній напрямних 4, опорної 2 та рухомої 3 кареток, які ковзають по напрямним завдяки лінійним підшипникам. Опорна каретка 2 встановлена на тензометричний датчик 10 нижнім пуансоном 12, який у нижній частині має призматичну форму. Рухома каретка 3 переміщується по напрямним у вертикальній площині за допомогою електродвигуна постійного струму 5, який з'єднано з кареткою передачею гвинт-гайка, нижнє положення рухомої каретки 3 обмежується положенням упору кінцевого вимикача 8. Повзунковий потенціометр 9 (CDE91N-60-B100K) призначений для визначення положення рухомої каретки 3, вихідні контакти потенціометра з'єднані проводами з платою Arduino Uno A Tmega 328P-PU (на рис. 2 не показано). Вихідні контакти тензометричного датчика з'єднані проводами із аналого-цифровим перетворювачем HX711, дані з якого передаються на плату Arduino, з якої, через USB інтерфейс передаються до програмного забезпечення «Arduino-1.8.9-windows», встановленому на ПЕОМ 6. Швидкість переміщення рухомої каретки 3 складала 0,0025 м/с, діаметр верхнього 11 і нижнього 12 пуансонів – 10 мм.



1 – основа; 2 – опорна каретка; 3 – рухома каретка; 4 – напрямна; 5 – електродвигун постійного струму; 6 – ПЕОМ; 7 – гвинт приводу рухомої каретки; 8 – кінцевий вимикач; 9 – тензометричний датчик; 10 – тензометричний датчик; 11 – верхній пуансон; 12 – нижній пуансон

Рисунок 5 – Лабораторне обладнання для дослідження процесу стиску зерна

Джерело: розроблено авторами

Для експериментальних досліджень випадковим чином було утворено три групи по 50 зернин кукурудзи сорту П8816, для яких було визначено зусилля руйнування. При вологості зерна 12,34% зусилля руйнування при розташуванні зерна:

- вертикально –  $F_z=78,57-259,94$  Н, середнє значення –  $F_z=169,36$  Н;
- на бічній поверхні –  $F_y=96,92-273,39$  Н, середнє значення –  $F_y=142,74$  Н;
- горизонтально –  $F_x=83,82-672,65$  Н, середнє значення  $F_x=376,72$  Н.

На заключному етапі досліджень було проведено співставлення зусилля руйнування зерен кукурудзи отриманого в результаті віртуального та лабораторного експериментів. За допомогою програмного середовища MS Excel було визначено значення факторів, при яких модель відповідає значенням, отриманим в результаті лабораторних досліджень: модуль Юнга  $E_p = 10$  МПа; коефіцієнт Пуассона  $\mu_p = 0,48$ ; гранична напруга розтягу та зсуву  $W_p = 2,4$  МПа.

**Висновки.** За результатами проведених досліджень було отримано наступне:

- базуючись на замірах зерен кукурудзи сорту П8816 та враховуючи огляд існуючих досліджень в програмному середовищі Simcenter STAR-CCM+, методом агрегації 86 сфер, було створено модель дискретних елементів (DEM);

- за результатами віртуального повнофакторного експерименту отримано рівняння регресії, які описують залежність зусилля руйнування зерна кукурудзи від коефіцієнту Пуассона ( $\mu_p$ ), модулю Юнга ( $E_p$ ) та граничної напруги розтягу та зсуву ( $W_p$ ), при різних напрямках дії на зерно. З'ясовано, що найбільший вплив на зусилля, необхідне для руйнування зернини з фізико-механічних параметрів має гранична напруга розтягнення та зсуву, а найменший – коефіцієнт Пуассона;

- на розробленому та реалізованому лабораторному стенді було проведено експериментальні дослідження зусилля руйнування зерна кукурудзи за аналогічною до віртуального експерименту схемою дії на зерно. За результатами співставлення було визначено значення факторів, при яких модель відповідає значенням, отриманим в результаті лабораторних досліджень: модуль Юнга  $E_p = 10$  МПа; коефіцієнт Пуассона  $\mu_p = 0,48$ ; гранична напруга розтягу та зсуву  $W_p = 2,4$  МПа.

Отримані результати дають змогу уточнити вихідні параметри при моделюванні зерен кукурудзи що забезпечить більш точні результати віртуальних досліджень процесів його руйнування при різних варіантах взаємодії з робочими органами.

## Список літератури

1. Shevchenko, N., 2020: An Introduction to Model-Based Systems Engineering (MBSE). Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute's Insights (blog), Accessed January 28, 2025, <https://doi.org/10.58012/d464-4f49>.
2. Арендаренко, В. М. Самойленко, Т. В. Математичне моделювання процесу завантаження силосів зерном. *Вісник Полтавської Державної Аграрної Академії*, 2018. (2), 158-161. <https://doi.org/10.31210/visnyk2018.02.26>
3. Kubík, L., Božíková, M., Kažimírová, V. Mechanical Properties of Wheat Grains at Compression. *Acta Technologica Agriculturae*, 2021, Slovak University of Agriculture in Nitra, vol. 24 no. 4, pp. 202-208. <https://doi.org/10.2478/ata-2021-0033>
4. Chen, Z., Wassgren, C., Tamrakar, A., Ambrose, R. P. K. Validation of a DEM Model for predicting grain damage in an industrial-scale handling system. *Smart Agricultural Technology*, 2023. 5, 100274. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100274>
5. Алієв Е. Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: Аграрна наука, 2023. 340 с.
6. Zhong, J., Tao, L., Li, S., Zhang, B., Wang, J., & He, Y. Determination and interpretation of parameters of double-bud sugarcane model based on discrete element. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022. 203, 107428. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107428>
7. Liu, Z., Ma, H., Zhao, Y. Comparative study of discrete element modeling of tablets using multi-spheres,



- multi-super-ellipsoids, and polyhedrons. *Powder Technology*, 2021. 390, 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.05.065>
8. Kruggel□Emden, H., Rickelt, S., Wirtz, S., Scherer, V. A study on the validity of the multi-sphere Discrete Element Method. *Powder Technology*, 2008. 188(2). P. 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.037>
  9. Wiącek, J., Molenda, M., Horabik, J., Ooi, J. Y. Influence of grain shape and intergranular friction on material behavior in uniaxial compression: Experimental and DEM modeling. *Powder Technology*, 2012. 217, 435–442. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.10.060>
  10. Markauskas, D., Kačianauskas, R. Investigation of rice grain flow by multi-sphere particle model with rolling resistance. *Granular Matter*, 2010. 13(2). P. 143–148. <https://doi.org/10.1007/s10035-010-0196-5>
  11. Boac, J. M., Casada, M. E., Maghirang, R. G., Harner, J. P. Material and interaction properties of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles. *Transactions of the ASABE*, 2010. 53(4), 1201–1216. <https://doi.org/10.13031/2013.32577>
  12. Weigler, F., Mellmann, J. Investigation of grain mass flow in a mixed flow dryer. *Particuology*, 2014. 12. P. 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2013.04.004>
  13. Coetzee, C. Review: Calibration of the discrete element method. *Powder Technology*, 2017. 310, 104–142. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.015>
  14. Wang, L., Zhou, W., Ding, Z., Li, X., Zhang, C. Experimental determination of parameter effects on the coefficient of restitution of differently shaped maize in three-dimensions. *Powder Technology*, 2015. 284. P. 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.06.042>
  15. Markauskas, D., Ramírez-Gómez, Á., Kačianauskas, R., Zdancevičius, E. Maize grain shape approaches for DEM modelling. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015. 118. P. 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.09.004>
  16. Li, X., Liu, F., Zhao, M., Zhang, T., Li, F., Zhang, Y. Determination of contact parameters of maize seed and seed metering device. (2018). *Agric. Mech. Res.*, 40. P. 149–153.

## References

1. Shevchenko, N., 2020: An Introduction to Model-Based Systems Engineering (MBSE). Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute's Insights (blog), Accessed January 28, 2025, <https://doi.org/10.58012/d464-qb49>.
2. Arendarenko, V. M., & Samoilenko, T. V. (2018). The mathematical modeling of the loading process of grain to the silos. *Scientific Progress & Innovations*, (2), 158–161. <https://doi.org/10.31210/visnyk2018.02.26>
3. Kubík, L., Božiková, M. & Kažimírová, V. Mechanical Properties of Wheat Grains at Compression. *Acta Technologica Agriculturae*, 2021, Slovak University of Agriculture in Nitra, vol. 24 no. 4, pp. 202-208. <https://doi.org/10.2478/ata-2021-0033>
4. Chen, Z., Wassgren, C., Tamrakar, A., & Ambrose, R. P. K. (2023). Validation of a DEM Model for predicting grain damage in an industrial-scale handling system. *Smart Agricultural Technology*, 5, 100274. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100274>
5. Aliiev Elchyn. Numerical simulation of agricultural production processes: textbook. Kyiv: Agrarna nauka, 2023. 340 p.
6. Zhong, J., Tao, L., Li, S., Zhang, B., Wang, J., & He, Y. (2022). Determination and interpretation of parameters of double-bud sugarcane model based on discrete element. *Computers and Electronics in Agriculture*, 203, 107428. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107428>
7. Liu, Z., Ma, H., & Zhao, Y. (2021). Comparative study of discrete element modeling of tablets using multi-spheres, multi-super-ellipsoids, and polyhedrons. *Powder Technology*, 390, 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.05.065>
8. Kruggel□Emden, H., Rickelt, S., Wirtz, S., & Scherer, V. (2008). A study on the validity of the multi-sphere Discrete Element Method. *Powder Technology*, 188(2). P. 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.037>
9. Wiącek, J., Molenda, M., Horabik, J., & Ooi, J. Y. (2012). Influence of grain shape and intergranular friction on material behavior in uniaxial compression: Experimental and DEM modeling. *Powder Technology*, 217, 435–442. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.10.060>
10. Markauskas, D., & Kačianauskas, R. (2010). Investigation of rice grain flow by multi-sphere particle model with rolling resistance. *Granular Matter*, 13(2). P. 143–148. <https://doi.org/10.1007/s10035-010-0196-5>
11. Boac, J. M., Casada, M. E., Maghirang, R. G., & Harner, J. P. (2010). Material and interaction properties

- of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles. *Transactions of the ASABE*, 53(4), 1201–1216. <https://doi.org/10.13031/2013.32577>
12. Weigler, F., & Mellmann, J. (2014). Investigation of grain mass flow in a mixed flow dryer. *Particuology*, 12, 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2013.04.004>
  13. Coetzee, C. (2017). Review: Calibration of the discrete element method. *Powder Technology*, 310, 104–142. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.015>
  14. Wang, L., Zhou, W., Ding, Z., Li, X., & Zhang, C. (2015). Experimental determination of parameter effects on the coefficient of restitution of differently shaped maize in three-dimensions. *Powder Technology*, 284. P. 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.06.042>
  15. Markauskas, D., Ramírez-Gómez, Á., Kačianauskas, R., & Zdancevičius, E. (2015). Maize grain shape approaches for DEM modelling. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118. P. 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.09.004>
  16. Li, X., Liu, F., Zhao, M., Zhang, T., Li, F., & Zhang, Y. Determination of contact parameters of maize seed and seed metering device. (2018). *Agric. Mech. Res.*, 40. P. 149–153.

**Volodymyr Dudin**, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Illia Bilous**, PhD student  
*Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine*

### **Investigation of the Corn Kernel Destruction Process Using Digital Models**

In modern mechanical engineering, Model-Based Systems Engineering (MBSE) has become widely adopted. One of its key concepts is the creation and testing of virtual models of the designed technical systems. Compared to traditional approaches, this method significantly reduces resources and development time for new machines or improvements to existing ones. However, the accuracy of modeling entirely depends on the precision of the input data used for simulation. This also applies to the process of feed material destruction, particularly corn kernels. To obtain reliable simulation results, it is necessary to create a model of a kernel that closely resembles the real one and assign it physical and mechanical parameters that most accurately correspond to the studied sample.

The aim of this research is to create an adequate virtual model of a corn kernel in the Simcenter STAR-CCM+ environment by comparing the destruction force obtained virtually and in laboratory experiments. Based on measurements and a review of studies in the Simcenter STAR-CCM+ software, a discrete element model (DEM) was developed using the aggregation of 86 spheres, employing the Hertz-Mindlin contact model. A virtual full-factorial experiment was conducted, resulting in regression equations describing the dependence of the kernel destruction force on Poisson's ratio ( $\mu_p$ ), Young's modulus ( $E_p$ ), and ultimate tensile and shear stress ( $W_p$ ) under different loading directions.

A laboratory test stand was developed and implemented, where experimental studies of the destruction force of corn kernels were conducted under conditions analogous to the virtual experiment. The comparison of results identified factor values at which the model matches the laboratory research findings: Young's modulus  $E_p = 10$  MPa, Poisson's ratio  $\mu_p = 0.48$ , and ultimate tensile and shear stress  $W_p = 2.4$  MPa. The obtained results allow for refining the input parameters in corn kernel simulations, ensuring more accurate virtual studies of the destruction process under various interactions with working elements.

**corn grain, modeling, compression, fracture force**

*Одержано (Received) 11.11.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 13.12.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024*