



ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-1>

УДК 633.11:631.3:004.94

І. М. Білоус, д-р філософії

ORCID: 0000-0001-9635-6631

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

e-mail: bilous.i.m@dsau.dp.ua

**ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗЕРНА ПШЕНИЦІ
ДЛЯ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЙОГО РУЙНУВАННЯ**

Анотація. У статті розглянуто метод визначення фізико-механічних параметрів зерна пшениці сорту «Патрас» для коректного налаштування DEM-моделі. На основі вимірювання геометричних параметрів 150 зернин у середовищі Simcenter STAR-CCM+ методом агрегації сфер побудовано модель дискретних елементів. Проведено повнофакторний чисельний експеримент зі змінними факторами: коефіцієнтом Пуассона (ν), модулем Юнга (E_p) та граничною напругою розтягу і зсуву (W_p). За результатами оброблення даних у Wolfram Cloud отримано рівняння регресії для трьох просторових положень зернини. Лабораторні випробування на власному стенді з тензометричним датчиком підтвердили достовірність результатів моделювання. Встановлено уточнені параметри моделі: $E_p = 21,2$ МПа, $\nu_p = 0,50$, $W_p = 2,2$ МПа.

Ключові слова: зерно пшениці, метод дискретних елементів, моделювання, зусилля руйнування, фізико-механічні властивості.

Постановка проблеми. Сучасне машинобудування в агропромисловому секторі дедалі активніше спирається на методологію проєктування на основі моделей (Model-Based Systems Engineering – MBSE), ключовою ідеєю якої є створення та відпрацювання цифрових прототипів техніки до початку їх фізичного виготовлення [1]. Застосування такого підходу дозволяє суттєво зменшити матеріальні витрати та скоротити строки розробки обладнання, однак ефективність моделювання безпосередньо залежить від точності вихідних даних, що закладаються у цифрову модель. Особливо це стосується процесів руйнування зернових матеріалів – зокрема пшениці – під час подрібнення концентрованих кормів, де адекватність чисельного моделювання визначається коректністю фізико-механічних параметрів, заданих у моделі зернини. Пшениця є однією з провідних культур у кормовиробництві, проте верифіковані параметри DEM-моделі для конкретних сортів залишаються недостатньо вивченими.

Аналіз останніх досліджень. Механічні властивості зернівок пшениці формуються під впливом комплексу факторів: анатомічної будови (ендосперм, алевроновий шар, оболонки), вологості зерна, умов вирощування та сортових особливостей. Дослідженнями [2] встановлено, що структура клітин та текстура матеріалу оболонки суттєво визначають характер деформації та руйнування зернівки при стискальному навантаженні.

Метод дискретних елементів (DEM) знайшов широке застосування для прогнозування пошкоджень зерна у промислових системах переробки та оптимізації параметрів обладнання [3]. Він дозволяє кількісно оцінити поведінку сипкого матеріалу, зокрема розподіл контактних сил і процеси дисипації енергії, що складно визначити традиційними експериментальними методами [4].

Точність DEM-симуляцій суттєво залежить від якості геометричної моделі зернини та від коректного задання фізико-механічних параметрів матеріалу [5]. Найпоширенішим способом відтворення складної форми зерна є метод агрегації сфер [6; 7], що вже успішно застосовувався для гороху [8], рису [9], сої [10]. Для пшениці такі дослідження є фрагментарними, а визначення параметрів моделі для конкретних сортів зі зставленням із реальними випробуваннями є актуальним науковим завданням, вирішення якого забезпечить надійну основу для подальшого вдосконалення подрібнювального обладнання.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою дослідження є встановлення адекватних фізико-механічних параметрів DEM-моделі зерна пшениці сорту «Патрас» у програмному середовищі Simcenter STAR-CCM+ шляхом порівняння зусиль руйнування, отриманих у чисельному та лабораторному експериментах.

Основна частина. Спочатку було виміряно геометричні параметри 150 зернин пшениці сорту «Патрас». Вимірювання довжини (L), ширини (W) та товщини (H) виконувались індикаторним товщиноміром TP 25–100 з точністю 0,01 мм. За результатами статистичної обробки встановлено: середня довжина зернини $L = 6,7$ мм, середня ширина $W = 3,19$ мм, середня товщина $H = 2,89$ мм. Форма зернини є компактно-овальною зі сферичністю близько 0,57.

На підставі виконаних вимірювань і огляду досліджень у середовищі Simcenter STAR-CCM+ методом агрегації сфер побудовано тривимірну DEM-модель зернини пшениці (рис. 1). Для опису контактних взаємодій між частинками і сталієм пуансоном застосовано модель Герца–Міндліна. Параметри моделі розподілено на дві категорії: параметри властивостей матеріалу (щільність, коефіцієнт Пуассона, модуль Юнга, гранична напружка розтягу та зсуву) та параметри взаємодії (коефіцієнти відновлення, статичного тертя і тертя кочення). Їх початкові та фіксовані значення наведено в табл. 1.

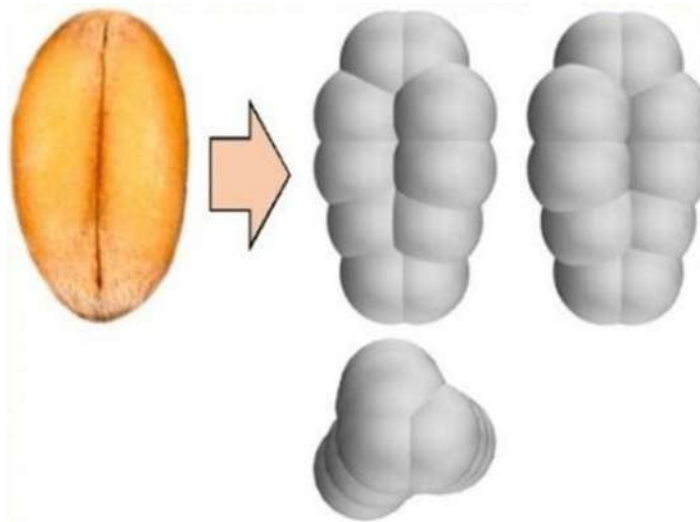


Рис. 1. Модель зернини пшениці

Зусилля руйнування досліджували у трьох положеннях зернини відносно осі навантаження: вертикальному – сила F_z спрямована по довжині L ; бічному – сила F_y , спрямована по ширині W ; горизонтальному – сила F_x спрямована по товщині H . Такий підхід дає змогу врахувати анізотропію механічних характеристик зернини та їх зміну залежно від напрямку прикладання навантаження.

Чисельні дослідження в Simcenter STAR-CCM+ проводились відповідно до повного факторного плану. Варійованими параметрами обрано коефіцієнт Пуассона (ν), модуль Юнга (E_p) та граничну напружку розтягу і зсуву (W_p), що варіювалися на трьох рівнях (табл. 2).

Таблиця 1

Параметри симуляції DEM

Матеріали	Параметри	Значення
Пшениця	Коефіцієнт Пуассона	0,3...0,5
	Модуль Юнга, МПа	10...40
	Щільність частинок, кг/м ³	1320 [10]
	Коефіцієнт відновлення після зіткнення	0,37 [11]
	Коефіцієнт статичного тертя	0,2 [11]
	Гранична напруга розтягу, МПа	1...3
	Гранична напруга зсуву, МПа	1...3
Стінка (сталь)	Коефіцієнт Пуассона	0,3 [12]
	Модуль зсуву, Па	$7,9 \times 10^{10}$ [13]
	Щільність, кг/м ³	7800 [12]
Пшениця та стінка (сталь)	Коефіцієнт відновлення після зіткнення	0,4 [10]
	Коефіцієнт статичного тертя	0,554 [13]
	Коефіцієнт тертя кочення	0,05 [14]

Таблиця 2

Рівні та інтервали варіювання факторів

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

Отримані в результаті чисельного експерименту дані оброблено в хмарному середовищі Wolfram Cloud, що дозволило побудувати рівняння регресії залежності зусилля руйнування зерна пшениці від досліджуваних факторів. Після перевірки на адекватність і відсіювання статистично незначущих членів за t-критерієм Стьюдента рівняння у натуральних змінних набули вигляду:

– при вертикальному положенні зернини:

$$Fz = 16,356 - 4,374E_p + 0,1034E_p^2 + 158,61W_p - 17,623W_p^2 + 64,273\nu - 89,41W_p\nu; \quad (1)$$

– при положенні зернини на бічній поверхні:

$$Fy = 63,567 - 6,291E_p + 0,1526E_p^2 + 115,17W_p + 150,48\nu - 145,33W_p\nu; \quad (2)$$

– при горизонтальному положенні зернини:

$$Fx = 99,887 - 7,199E_p + 0,1746E_p^2 + 56,554W_p + 17,08W_p^2 + 219,19\nu - 109,60W_p\nu. \quad (3)$$

Графічну інтерпретацію отриманих залежностей наведено на рис. 2.

Аналіз рівнянь (1)–(3) засвідчує, що зусилля руйнування монотонно зростає зі збільшенням модуля Юнга E_p , що узгоджується з положеннями механіки пружних матеріалів: жорсткіший матеріал чинить вищий опір деформації й потребує більшого навантаження для досягнення критичного стану. Гранична напруга розтягу і зсуву W_p є найвпливовішим параметром у всіх трьох орієнтаціях зернини, тоді як коефіцієнт Пуассона ν має найменший вплив – цей результат свідчить про переважаючу роль міцнісних характеристик матеріалу над характеристиками поперечних деформацій у процесі руйнування компактної зернини. Найвище значення зусилля характерне для горизонтального положення, де більша площа контакту пуансона із зерниною забезпечує більш рівномірний розподіл навантаження.

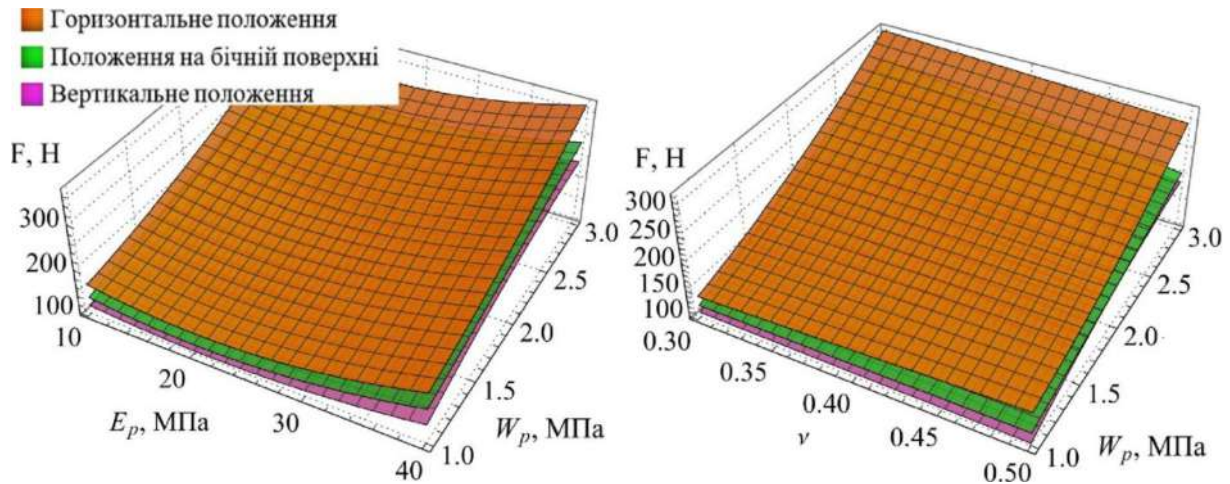


Рис. 2. Залежність сили руйнування зерна пшениці при стиску від коефіцієнта Пуассона (ν), модуля Юнга (E_p) та напруги розтягу та зсуву (W_p) при її різному положенні

Другим етапом досліджень стало отримання експериментальних значень зусилля руйнування на лабораторному стенді (рис. 3). Стенд складається зі станини 1, встановлених на ній лінійних напрямних 4, опорної 2 та рухомої 3 кареток. Рухома каретка 3 переміщується у вертикальній площині за допомогою електродвигуна постійного струму 5, що з'єднаний з кареткою передачею гвинт-гайка. Нижнє положення рухомої каретки обмежується кінцевим вимикачем 8. Повзунковий потенціометр 9 відстежує положення каретки; тензометричний датчик 10 фіксує силу на нижньому пуансоні 12 з призматичною контактною поверхнею. Сигнали з датчика надходять через аналого-цифровий перетворювач НХ711 на плату Arduino Uno ATmega 328P-PU, а звідти через USB-інтерфейс – до ПЕОМ 6 з програмним середовищем «Arduino-1.8.9-windows». Швидкість переміщення каретки – 0,0025 м/с, діаметр пуансонів – 10 мм. [16]

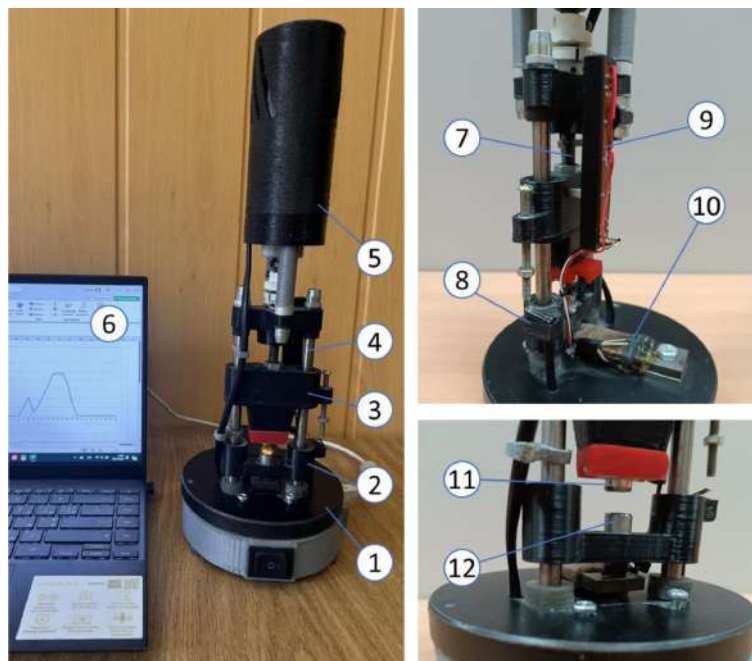


Рис. 3. Лабораторний стенд для дослідження процесу стиску зерна

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



Для лабораторних досліджень випадковим чином сформовано три групи по 50 зернин пшениці сорту «Патрас». Вологість зерна на момент випробувань склала 11,31 %, що відповідає нормам для кормового зерна (не вище 14 % згідно з ДСТУ) і забезпечує стабільні механічні властивості матеріалу без пластифікуючого впливу надмірної вологи. При зазначеній вологості зерна одержано такі значення зусилля руйнування при різних просторових положеннях зернини:

- у вертикальному положенні F_z – від 43,29 Н до 293,46 Н, середнє значення 147,73 Н;
- на бічній поверхні F_y – від 70,01 Н до 251,29 Н, середнє значення 155,09 Н;
- у горизонтальному положенні F_x – від 141,50 Н до 393,81 Н, середнє значення 267,33 Н.

Характерною ознакою пшениці у порівнянні з кукурудзою є суттєво менший розкид значень зусилля руйнування в межах однієї просторової орієнтації, що свідчить про більш однорідну внутрішню структуру зернини. Також підтверджено, що горизонтальна орієнтація забезпечує найвищу несучу здатність зернини, тоді як вертикальна – найнижчу.

На завершальному етапі у програмному середовищі MS Excel виконано зіставлення зусиль руйнування, отриманих у чисельному та лабораторному експериментах. Підбираючи значення модуля Юнга, коефіцієнта Пуассона та граничної напруги за допомогою рівнянь регресії (1)–(3), визначено такі параметри фізико-механічних властивостей зерна пшениці сорту «Патрас», при яких модельні зусилля руйнування найкраще узгоджуються з експериментальними даними: модуль Юнга $E_p = 21,2 \pm 3,1$ МПа; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,50 \pm 0,03$; гранична напруга розтягу та зсуву $W_p = 2,2 \pm 0,1$ МПа.

Висновки. За результатами проведених досліджень встановлено:

– базуючись на вимірюваннях геометрії 150 зернин пшениці сорту «Патрас» ($L = 6,70$ мм, $W = 3,19$ мм, $H = 2,89$ мм) та огляді сучасних публікацій, у середовищі Simcenter STAR-CCM+ методом агрегації сфер побудовано DEM-модель зернини.

– за результатами повнофакторного чисельного експерименту отримано рівняння регресії (1)–(3), що описують залежність зусилля руйнування від коефіцієнта Пуассона (ν), модуля Юнга (E_p) та граничної напруги розтягу і зсуву (W_p). Встановлено, що найбільший вплив на зусилля руйнування чинить гранична напруга розтягу та зсуву, найменший – коефіцієнт Пуассона;

– проведено лабораторний експеримент з визначення зусилля руйнування зерна пшениці у трьох положеннях при вологості 11,31 %; за результатами зіставлення з чисельними даними визначено фізико-механічні параметри DEM-моделі: $E_p = 21,2 \pm 3,1$ МПа; $\nu = 0,50 \pm 0,03$; $W_p = 2,2 \pm 0,1$ МПа.

Одержані параметри можуть бути використані для уточнення вхідних даних при моделюванні процесів подрібнення пшениці в дискових та інших типах подрібнювачів, що забезпечить підвищення достовірності результатів чисельних досліджень.

Список використаних джерел

1. Shevchenko N. An Introduction to Model-Based Systems Engineering (MBSE). 2020. DOI: <https://doi.org/10.58012/d464-qf49>
2. Kubík L., Božiková M., Kažimírová V. Mechanical properties of wheat grains at compression. *Acta Technologica Agriculturae*. 2021. Vol. 24, no. 4. P. 202–208. DOI: <https://doi.org/10.2478/ata-2021-0033>
3. Validation of a DEM Model for predicting grain damage in an industrial-scale handling system / Z. Chen et al. *Smart Agricultural Technology*. 2023. Vol. 5. P. 100274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100274>
4. Алієв Е. Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: Підручник. Київ : Аграрна наука, 2023. 340 с. URL: <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9>
5. Determination and interpretation of parameters of double-bud sugarcane model based on discrete elements / J. Zhong et al. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 203. 107428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107428>

6. 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. Vol. 390. P. 34–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.05.065>
7. A study on the validity of the multi-sphere Discrete Element Method / H. Kruggel-Emden et al. *Powder Technology*. 2008. Vol. 188, no. 2. P. 153–165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.037>
8. Influence of grain shape and intergranular friction on material behavior in uniaxial compression: Experimental and DEM modeling / J. Wiącek et al. *Powder Technology*. 2012. Vol. 217. P. 435–442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.10.060>
9. Markauskas D., Kačianauskas R. Investigation of rice grain flow by multi-sphere particle model with rolling resistance. *Granular Matter*. 2010. Vol. 13, no. 2. P. 143–148. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10035-010-0196-5>
10. Material and interaction properties of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles / J. M. Boac et al. *Transactions of the ASABE*. 2010. Vol. 53, no. 4. P. 1201–1216. URL: <https://doi.org/10.13031/2013.32577>
11. Discrete element modelling of bulk behaviour of wheat (*Triticum aestivum* L.) cv. ‘Pionier’ during compressive loading / I. Ramaj et al. *Biosystems Engineering*. 2024. Vol. 242. P. 123–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.04.005>
12. AISI 1026 Carbon Steel (UNS G10260). *AzoM*. URL: https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6583&utm_ (date of access: 20.11.2025).
13. Wang X., Wu W., Jia H. Calibration of discrete element parameters for simulating wheat crushing. *Food Science & Nutrition*. 2023. Vol. 11, no. 12. P. 7751–7764. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.3693>
14. Basse J. B., Odesola I. F., Olawuyi J. A. A Comparative technique for performance evaluation of hammer mill and disk mill in yam flour processing. *World Journal of Engineering*. 2022. Vol. 10, no. 3. P. 613–625.
15. Дудін В. Ю., Білоус І. М. Дослідження процесу руйнування зерна кукурудзи з використанням цифрових моделей. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Т. 10, № 41. С. 123–130. 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)

Дата першого надходження статті до видання: 19.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



I. Bilous

Dnipro State Agrarian and Economic University

DETERMINATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PARAMETERS OF WHEAT GRAIN FOR NUMERICAL SIMULATION OF ITS DESTRUCTION PROCESS

Summary

The study addresses the problem of determining verified physical and mechanical parameters for the discrete element method (DEM) model of wheat grain, which is essential for reliable numerical simulation of grain destruction processes in feed grinding equipment. The research object is wheat grain of the ‘Patras’ variety. Geometric parameters – length (L), width (W), and thickness (H) – were measured for 150 grains using an indicator thickness gauge with an accuracy of 0.01 mm. Statistical processing yielded mean values of $L = 6.70$ mm, $W = 3.19$ mm, and $H = 2.89$ mm, with a sphericity of approximately 0.57. Based on these measurements, a three-dimensional DEM model of the grain was constructed in Simcenter STAR-CCM+ using the multi-sphere aggregation method. Contact interactions between particles and the steel punch were described using the Hertz–Mindlin contact model.

A full factorial numerical experiment was conducted with three variable factors: Poisson’s ratio (ν), Young’s modulus (E_p), and tensile and shear bond strength (W_p), each varied at three levels. Destruction forces were evaluated in three spatial orientations of the grain relative to the loading axis: vertical (F_z along length L), lateral (F_y along width W), and horizontal (F_x along thickness H). The experimental data were processed in Wolfram Cloud, yielding regression equations for each orientation. Analysis of the equations showed that tensile and shear bond strength W_p



has the greatest influence on destruction force across all orientations, while Poisson's ratio ν has the least effect. The highest destruction force was recorded in the horizontal orientation due to the larger contact area between the punch and the grain.

Laboratory experiments were performed on a custom-built test bench equipped with a strain gauge load cell, an HX711 analog-to-digital converter, and an Arduino Uno microcontroller. Three groups of 50 grains each were tested at a moisture content of 11.31 %. Mean experimental destruction forces were: $F_z = 147.73$ N, $F_y = 155.09$ N, and $F_x = 267.33$ N. Comparison of numerical and experimental results using regression equations allowed calibration of the DEM model parameters. The following physical and mechanical properties of 'Patras' wheat grain were established: Young's modulus $E_p = 21.2 \pm 3.1$ MPa, Poisson's ratio $\nu = 0.50 \pm 0.03$, and tensile and shear bond strength $W_p = 2.2 \pm 0.1$ MPa. The obtained parameters can be applied in numerical simulations of wheat grinding processes in disc mills and other types of grinding equipment.

Keywords: wheat grain, discrete element method, modeling, destruction force, physical and mechanical properties.