

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 633.1:631.361:004.942 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.133-146](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.133-146)

Е. Б. Алієв, ст. досл., д-р техн. наук, І. М. Білоус

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

e-mail: aliev@meta.ua, bilous.i.m@dssu.dp.ua

Симуляція процесу руйнування зерна ударним різанням

У статті досліджено вплив конструктивних та кінематичних параметрів нового робочого органу дискового подрібнювача з ударними накладками на процес руйнування зерна кукурудзи, пшениці та ячменю методом ударного різання. Моделювання проведено із використанням методу дискретних елементів (DEM) у середовищі Simcenter STAR-CCM+. Встановлено залежності сили руйнування від відстані між накладками, кута їх розміщення та лінійної швидкості руху. Запропоновано інтегральний критерій ефективності, що дозволяє оптимізувати параметри подрібнення для досягнення енергоощадного та продуктивного режиму роботи. Визначено раціональні значення конструктивних параметрів для ефективного подрібнення основних зернових культур.

дисковий подрібнювач, ударні накладки, метод дискретних елементів, Simcenter STAR-CCM+, ударне різання, руйнування зерна, конструктивні параметри, оптимізація, енергоефективність

Постановка проблеми. Основною задачею чисельного моделювання є обґрунтування закономірностей взаємодії компонентів концентрованих кормів з робочими елементами подрібнювача для раціонального вибору геометричних та кінематичних характеристик обладнання. Моделювання (симуляція) спрямовано на уточнення параметрів руйнування досліджуваного зерна кукурудзи, пшениці та ячменю. Отримані аналітичні співвідношення і моделі становлять основу для подальшого планування експериментальних досліджень і оптимізації конструкції подрібнювача.

Для відтворення процесу руйнування зерна в симуляції потрібно детальніше дослідити його основні морфометричні і фізико-механічні (в тому числі реологічні) властивості. Зерно зернових культур є складним біологічним матеріалом, який широко досліджують через його морфологічні та механічні характеристики. Знання геометричних параметрів та механічних властивостей зернівок пшениці, ячменю й кукурудзи має велике значення для агроінженерії і технологій переробки – ці дані використовуються при конструюванні обладнання для очищення, сушіння, зберігання та подрібнення зерна [1–2]. Зокрема, розміри та форма зерна впливають на ефективність сепарації в зерноочисних машинах і на рівномірність прогріву при сушінні, а механічна міцність визначає опір зернівок руйнуванню в процесі збору й переробки [1].

Зернівки різних культур відрізняються розмірами та формою. Пшениця має відносно дрібні овальні зернівки: середня довжина близько 5–7 мм [3], ширина ~2,5–3,5 мм, товщина ~2–3 мм [4]. Типова маса 1000 зернин пшениці становить 30–45 г [5]. Ячмінь формує більш видовжені зернівки: довжиною біля 8–10 мм [3–4] при ширині ~3–4 мм і товщині ~2,5–3 мм [4]. Зерно ячменю зазвичай покрите квітковими плівками (лускою), що надають йому довгастої форми з загостреними кінцями. Кукурудза має найбільше зерно серед цих культур – крупні округло-клиноподібні зернівки довжиною в середньому 9–12 мм, шириною ~7–8 мм і товщиною ~4 мм [6].

Форма зерна часто характеризується показником сферичності або співвідношенням сторін. Сферичність визначають як відношення діаметра еквівалентної сфери до довжини зернівки [5]. Для пшеничного зерна зазвичай становить ~0,57 (тобто ~57%), що вказує на помірно витягнуту форму. У кукурудзи зернівки більш округлі: сферичність близько

0,63 (62–63%) [6]. Натомість ячмінь має значно більш витягнуті, веретеноподібні зернівки – сферичність лише $\sim 0,48$ (близько 48%) [3]. Еквівалентно можна навести співвідношення ширини до довжини зернівки: у кукурудзи воно становить $\sim 0,75$, у пшениці $\sim 0,46$, а в ячменю $\sim 0,37$ [3]. Ці морфометричні параметри підтверджують, що ячмінне зерно є найбільш видовженим (довжина в $\sim 2,5$ рази більша за ширину), пшеничне – овально-витягнуте (довжина в ~ 2 рази більша за ширину), а кукурудзяне – найближче до ізометричного (довжина лише на $\sim 30\%$ перевищує ширину).

Зернівки складаються переважно з міцного ендосперму (внутрішнього крохмалисто-білкового ядра) та зовнішніх оболонок (в тому числі алеїронового шару і плодової/насінневої оболонки у пшениці та кукурудзи, плюс остюкових плівок у ячменю). Механічна поведінка зерна визначається структурою цих компонентів. Модуль пружності (Юнга) зернівок характеризує жорсткість матеріалу ендосперму та оболонок.

При навантаженні зернівки до руйнування визначаються показники міцності на стиск та розтяг, тобто граничні напруження і зусилля, які витримує зерно. Зернівки проявляють характерні властивості крихких матеріалів: вони добре чинять опір стиску, але відносно слабкі на розтяг чи вигин [7].

Вологість зерна є ключовим фактором, що впливає на механічні показники. Зі зростанням вологості модуль пружності та максимальна напруга руйнування помітно зменшуються, зате збільшується пластичність і енергія деформації до руйнування [6, 8–9]. При вологості $>15\%$ зерно пшениці та ячменю стає настільки пластичним, що при ударі виникає менше уламків – це враховують при помелі, попередньо кондиціонуючи зерно до оптимальної вологості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасному машинобудуванні широкого застосування набуло проєктування технічних систем на основі моделей (Model-Based Systems Engineering, MBSE). Однією з базових концепцій цього підходу є створення віртуальних прототипів об'єктів та випробування їх характеристик у цифровому середовищі ще до фізичного виготовлення. Застосування MBSE дозволяє суттєво зменшити витрати ресурсів, скоротити час розробки нових машин та удосконалення існуючих конструкцій. Проте слід зазначити, що достовірність результатів такого моделювання безпосередньо залежить від точності та повноти вихідних даних, які використовуються для побудови моделей [10].

Для досягнення високої відповідності результатів моделювання реальному фізичному процесу необхідно створити модель зернини, яка буде максимально наближеною до її справжньої геометрії та фізико-механічних властивостей. Таким чином, завдання полягає не лише у правильному геометричному відтворенні форми об'єкта, але й у точному визначенні характеристик матеріалу.

Руйнування зерна може бути викликане як зовнішніми, так і внутрішніми чинниками. До зовнішніх відносять конструктивно-технологічні параметри обладнання для обробки, до внутрішніх – фізико-механічні властивості самого зерна, які визначаються його анатомічною структурою, текстурою та ступенем зрілості. Дослідження механічних властивостей зерна [11] свідчать, що текстура та структура клітин суттєво впливає на його механічні характеристики.

Метод дискретних елементів (DEM) довів свою ефективність у прогнозуванні пошкоджень зерна в промислових системах обробки. Експериментальні дослідження показали, що ступінь пошкодження зерна має сильну кореляцію з умовами технологічної обробки. Моделювання в середовищі DEM дозволяє оптимізувати технологічні параметри обладнання, що призводить до підвищення точності прогнозування процесів руйнування зерна [12]. Крім того, метод DEM широко використовується для аналізу поведінки частинок, для яких традиційними

експериментальними методами важко визначити дію перехідних сил або процеси розсіювання енергії.

Точність моделювання методом дискретних елементів значною мірою залежить від правильної побудови вхідної моделі, зокрема від її геометричної форми та фізико-механічних властивостей матеріалу [13]. Найбільш розповсюдженим підходом до відтворення складної геометрії зернин є метод агрегації сфер, який передбачає об'єднання кількох перекриваючих сфер для наближеного відтворення форми об'єкта [14–15]. Такий підхід був успішно застосований для моделювання зернин гороху [16], рису [17], сої [18].

Постановка завдання. Провести чисельне моделювання процесу подрібнення концентрованих кормів та встановити вплив фізико-механічних властивостей зерна, його орієнтації та параметрів дискового подрібнювача на силу руйнування при ударному різанні.

Виклад основного матеріалу. Враховуючи отримані результати вимірювань і базуючись на огляді сучасних досліджень з моделювання біоматеріалів у середовищі Simcenter STAR-CCM+ [19–20], було створено тривимірні багатосферні моделі зернин кукурудзи, пшениці і ячменю методом агрегації сфер (рис. 1). Такий підхід забезпечує максимально точне відтворення форми зерна при збереженні оптимальної обчислювальної складності для подальших чисельних експериментів.

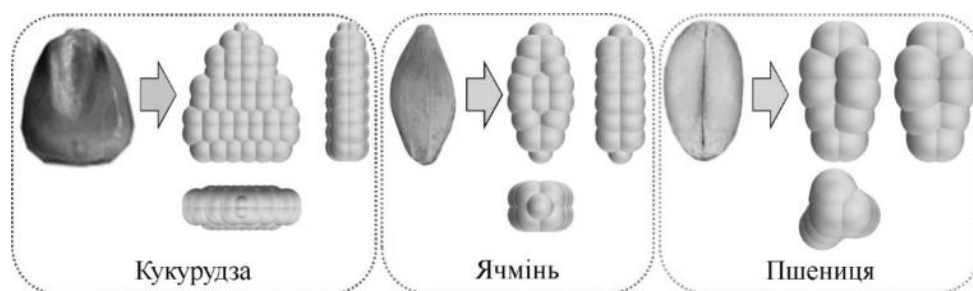


Рисунок 1 – Тривимірні моделі багатосферних зернин кукурудзи, ячменю та пшениці
Джерело: розроблено авторами

Для опису взаємодії між елементами моделі застосували контактну модель Герца–Міндліна, яка дозволяє моделювати пружно-пластичну деформацію тіл при їхньому локальному контакті. Контактна модель Герца–Міндліна є фундаментальним елементом фізико-математичного апарату методу дискретних елементів (DEM), що дозволяє описати сили взаємодії між двома тілами (наприклад, зерниною кукурудзи та пуансоном) при наявності контакту. Ця модель включає як нормальні сили стиску (модель Герца), так і тангенціальні сили зсуву (модель Міндліна), доповнюючи їх дисипативними компонентами і критерієм тертя Кулона. У випадку моделювання зернин у середовищі Simcenter STAR-CCM+ саме ця модель забезпечує адекватне відтворення фізичних процесів пружного стиску, зсуву і кочення.

Модель контактної сили багатосферних зернин представлено на рис. 2.

Нормальна $F_{aZ-P-bY}^n$ і тангенціальна $F_{aZ-P-bY}^t$ сили контактної взаємодії сфери a в багатосферній зернині Z і сфери b в точці контакту P задані як:

$$\overline{F_{aZ-P-bY}^n} = \left(\frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_{aZ-P-bY}^{\frac{3}{2}}, -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^*} v_{aZ-P-bY}^n \right) \overline{n_{aZ-P-bY}}, \quad (1)$$

$$\overline{F_{aZ-P-bY}^t} = -\min \left(S_t \overline{\xi_{aZ-P-bY}} + 2\sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^* v_{aZ-P-bY}^t}, \mu_r \left| \overline{F_{aZ-P-bY}^n} \right| \frac{\overline{\xi_{aZ-P-bY}}}{\left| \overline{\xi_{aZ-P-bY}} \right|} \right), \quad (2)$$

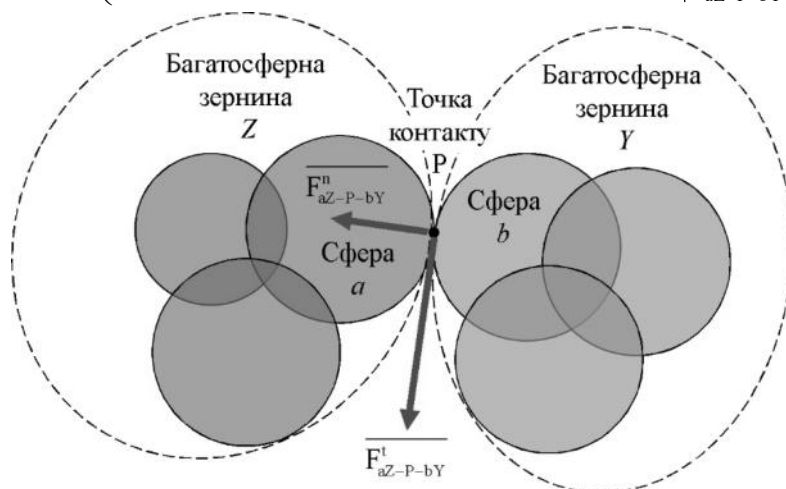


Рисунок 2 – Модель контактної сили багатосферних зернин

Джерело: розроблено авторами

де E^* – еквівалентний модуль Юнга, R^* – еквівалентний радіус:

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_{aZ}} + \frac{1}{R_{bY}}, \quad (3)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_Z^2)}{E_Z} + \frac{(1-\nu_Y^2)}{E_Y}, \quad (4)$$

R_{aZ} , R_{bY} – радіус кожної сфери в контакті; E_Z , E_Y – модуль Юнга; ν_Z , ν_Y – коефіцієнт Пуассона; $\delta_{aZ-P-bY}$ – нормальне перекриття сфери a в багатосферній зернині Z і сфери b в точці контакту P ; β – коефіцієнт демпфування:

$$\beta = \frac{-\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}, \quad (5)$$

e – коефіцієнт відновлення; S_n – нормальна жорсткість:

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_{aZ-P-bY}}, \quad (6)$$

m^* – еквівалентна маса:

$$m^* = \left(\frac{1}{m_{aZ}} + \frac{1}{m_{bY}} \right)^{-1}, \quad (7)$$

$v_{aZ-P-bY}^n$ – нормальна складова відносної швидкості; $\overline{n_{aZ-P-bY}}$ – вектор нормальної одиниці контакту, який спрямований від точки контакту P до центру часткової сфери a в багатосферній зернині Z ; S_t – тангенціальна жорсткість:

$$S_t = 8W^* \sqrt{R^* \delta_{aZ-P-bY}}, \quad (8)$$

W^* – еквівалентний модуль зсуву

$$W^* = \frac{1}{2(2-\nu_Z)(1+\nu_Z)/E_Z + 2(2-\nu_Y)(1+\nu_Y)/E_Y}, \quad (9)$$

$\xi_{aZ-P-bY}$ – сумарне тангенціальне зміщення часткової сфери a в багатосферній зернині Z і сфери b в точці контакту P ; $v_{aZ-P-bY}^t$ – тангенціальна складова відносної швидкості; μ_r – це коефіцієнт статичного тертя.

Сили і моменти, що діють на багатосферну частинку z , відповідно виражаються як:

$$\overline{F_{aZ-P-bY}^n} = \sum_W \sum_V \left(\overline{F_{aZ-P-bY}^n} + \overline{F_{aZ-P-bY}^t} \right), \quad (10)$$

$$\overline{M_{aZ-P-bY}} = \sum_W \sum_V \left(\left(\overline{x_P} - \overline{x_Z} \right) \times \overline{F_{aZ-P-bY}^t} - \mu_r \left| \overline{F_{aZ-P-bY}^n} \right| \left| \overline{x_P} - \overline{x_Z} \right| \overline{\omega_Z} \right), \quad (11)$$

де V і W – номери частинних сфер і точок дотику відповідно; $\overline{x_P}$ – вектор положення точки дотику P ; $\overline{x_Z}$ – вектор положення центру частинки Z ; $\overline{\omega_Z}$ – вектор кутової швидкості багатосферної частинки Z .

Зв'язування частинок використовується для розширення моделі частинок до більш складних (деформівних) форм або структур. Модель скупчення частинок (Particle Clumps Model) використовується для створення груп частинок, які представляють складну форму. У цій моделі застосовується модель зв'язаних частинок, у якій окремі частинки зберігають свою індивідуальність і з'єднані еластично деформівними зв'язками. Додавання моделі пошкодження дозволяє моделювати розтріскування та фрагментацію скупчення зі звільненням складових частинок.

Модель зв'язування частинок використовується як у моделі паралельних зв'язків, так і в моделі зв'язаних частинок (скупчень). У моделі паралельних зв'язків зв'язування частинок використовується для опису взаємодій між складовими частинками, а також для моделювання еластичних зіткнень між частинками відповідно до обраної користувачем моделі еластичного контакту. Модель зв'язаних частинок (Clumps) використовує лише модель зв'язування частинок.

Модель зв'язування частинок моделює кумулятивне пошкодження зв'язків. Якщо взаємодія призводить до пошкодження, але не до повного руйнування, рівень цього пошкодження враховується шляхом зменшення міцності зв'язку. Для проведення симуляції подрібнення зерна прийнята проста модель руйнування зв'язків (Simple Failure Model Reference), які миттєво руйнуються під навантаженням. Якщо між частинками (сферами зернини) виникають розтягувальні або зсувні напруження, що перевищують допустимі межі, зв'язок руйнується, і частинки розділяються. Після цього взаємодія частинок при зіткненні визначається іншими обраними моделями міжфазної взаємодії.

Зв'язок між частинками (сферами зернини) руйнується, якщо розтягувальне або зсувне напруження в ньому перевищує одне з заданих користувачем граничних значень.

Зв'язок руйнується, якщо:

$$W_{n-m} > W_{n-max} \text{ або } W_{t-m} > W_{t-max}, \quad (12)$$

де W_{n-max} – максимальне напруження розтягу, яке допускається без руйнування з'єднання; W_{t-max} – максимальне зсувне напруження, яке допускається без руйнування зв'язку. Для подальших розрахунків приймаємо, що $W_{n-max} = W_{t-max} = W$.

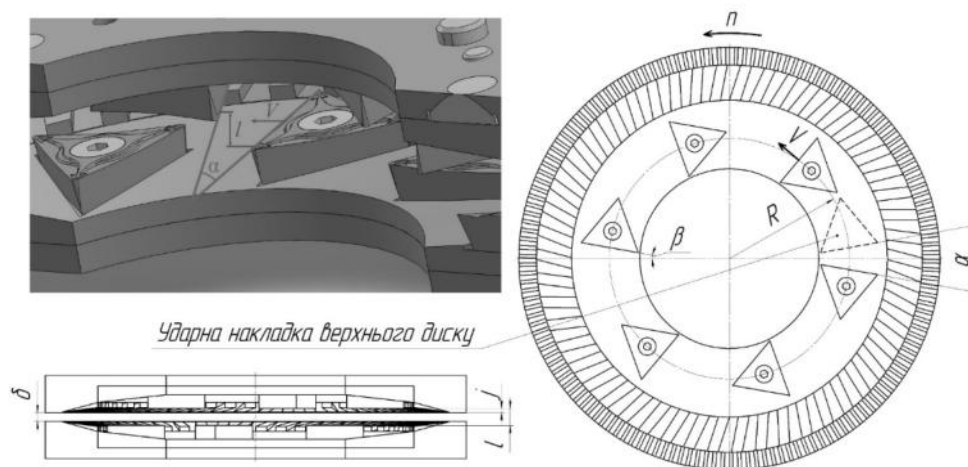
Граничні значення напружень розраховуються на основі теорії балок таким чином:

$$W_{n-m} = - \left| \overline{F_{aZ-P-bY}^n} \right| / A^* + \left| \left(\overline{x_P} - \overline{x_Z} \right) \times \overline{F_{aZ-P-bY}^t} \right| R^* / I^*, \quad (13)$$

$$W_{t-m} = \left| \overline{F_{aZ-P-bY}^t} \right| / A^* + \left| \mu_r \left| \overline{F_{aZ-P-bY}^n} \right| \left| \overline{x_P} - \overline{x_Z} \right| \overline{\omega_Z} \right| R^* / J^*, \quad (14)$$

де $A^* = \pi(R^*)^2$, $I^* = \pi(R^*)^4/4$, $J^* = \pi(R^*)^4/2$.

Враховуючи особливості конструктивної конфігурації запропонованого нового робочого органу дискового подрібнювача (рис. 3), виникла необхідність дослідити вплив додаткових факторів на силу руйнування зерна при його ударному різанні. Зокрема, оскільки ключову роль у процесі подрібнення виконують ударні накладки, було доцільне вивчення їх впливу на руйнування зернового матеріалу. Для цього в рамках чисельного експерименту було обрано три варійовані фактори, що найбільш повно характеризують кінематику та геометрію взаємодії зерна з ударними елементами удосконаленого дискового подрібнювача (рис. 3): відстань між ударними накладками l , кут між накладками α ; лінійна швидкість руху накладки V . Діапазони варіювання факторів були обрані з наступних міркувань: відстань між ударними накладками l (1,0 мм, 1,5 мм, 2,0 мм) – у відповідності до геометричних розмірів зернин, щоб забезпечити можливість контакту з окремими зернинами без надлишкового скупчення або прослизання; кут між ударними накладками α (10° , 35° , 60°) – з урахуванням забезпечення оптимального режиму подрібнення та рівномірного розподілу ударних навантажень по траєкторії руху; швидкість руху ударної накладки V (4,72 м/с, 7,07 м/с, 9,42 м/с) – згідно частот обертання диска дискового подрібнювача (1500 об/хв, 2250 об/хв, 3000 об/хв) і радіуса розташування накладки (30 мм), що визначає кінетичну енергію удару, яка передається зернині та безпосередньо впливає на ефективність руйнування її оболонки. Дослідження здійснювали відповідно до плану трьохфакторного повного факторного експерименту з трьома рівнями варіювання кожного фактору.



l – відстань між ударними накладками; α – кут між ударними накладками; V – швидкість руху ударної накладки; n – частота обертання диска; R – радіус встановлення накладки; δ – модульний зазор між дисками; l – відстань від накладки до краю диска; β – кут встановлення ударних накладок

Рисунок 3 – Схема обраних факторів для чисельного моделювання

Джерело: розроблено авторами

Відповідно до наведеного фізико-математичного апарату симуляції процесу руйнування зерна, всі параметри моделі поділяються на параметри властивостей матеріалу та параметри взаємодії, які наведені в табл. 2.

На рисунку 4 наведено кілька прикладів розвитку процесу руйнування зернини ударним різанням, зафіксованих під час чисельного моделювання в середовищі Simcenter STAR-CCM+. Скріншоти ілюструють різні варіанти положення зернини, їх

моделей та досліджуваних параметрів. У середовищі Simcenter STAR-CCM+ на основі розроблених DEM-моделей зернин було проведено серію віртуальних досліджень процесу руйнування ударним різанням, за якими визначалась залежність зусилля від деформації зернини. Приклад такої залежності представлений на рис. 5. Перший максимум залежності і будемо вважати силою руйнування зернини ударним різанням F.

Отримані в результаті віртуального повнофакторного експерименту було оброблено з використанням хмарного обчислювального середовища Wolfram Cloud, що дало змогу реалізувати ефективну математичну обробку великого масиву симуляційних результатів.

У результаті побудовано рівняння регресії в закодованому вигляді, які описують залежність сили руйнування зернини кукурудзи ударним різанням від варійованих факторів.

Таблиця 2 – Параметри симуляції DEM

Матеріали / взаємодія	Параметри	Значення
Кукурудза 	Коефіцієнт Пуассона Модуль Юнга, МПа Щільність частинок, кг/м ³ Коефіцієнт відновлення після зіткнення Коефіцієнт статичного тертя Гранична напруга розтягу, МПа Гранична напруга зсуву, МПа	0,48 [10] 10,1 [10] 1300 [18] 0,37 [21] 0,2 [22] 2,4 [10] 2,4 [10]
Пшениця 	Коефіцієнт Пуассона Модуль Юнга, МПа Щільність частинок, кг/м ³ Коефіцієнт відновлення після зіткнення Коефіцієнт статичного тертя Гранична напруга розтягу, МПа Гранична напруга зсуву, МПа	0,5 [10] 21,2 [10] 1320 [18] 0,37 [23] 0,2 [23] 2,2 [10] 2,2 [10]
Ячмінь 	Коефіцієнт Пуассона Модуль Юнга, МПа Щільність частинок, кг/м ³ Коефіцієнт відновлення після зіткнення Коефіцієнт статичного тертя Гранична напруга розтягу, МПа Гранична напруга зсуву, МПа	0,32 [10] 39,2 [10] 1250 [18] 0,37 [24] 0,2 [24] 3,0 [10] 3,0 [10]
Стінка (сталь)	Коефіцієнт Пуассона Модуль зсуву, Па Щільність, кг/м ³	0,3 [25] 7,9×10 ¹⁰ [25] 7800 [25]
Кукурудза та стінка (сталь)	Коефіцієнт відновлення після зіткнення Коефіцієнт статичного тертя Коефіцієнт тертя кочення	0,5 [18] 0,48 [26] 0,05 [18]
Пшениця та стінка (сталь)	Коефіцієнт відновлення після зіткнення Коефіцієнт статичного тертя Коефіцієнт тертя кочення	0,4 [18] 0,554 [27] 0,05 [16]
Ячмінь та стінка (сталь)	Коефіцієнт відновлення після зіткнення Коефіцієнт статичного тертя Коефіцієнт тертя кочення	0,4 [18] 0,51 [18] 0,05 [18]

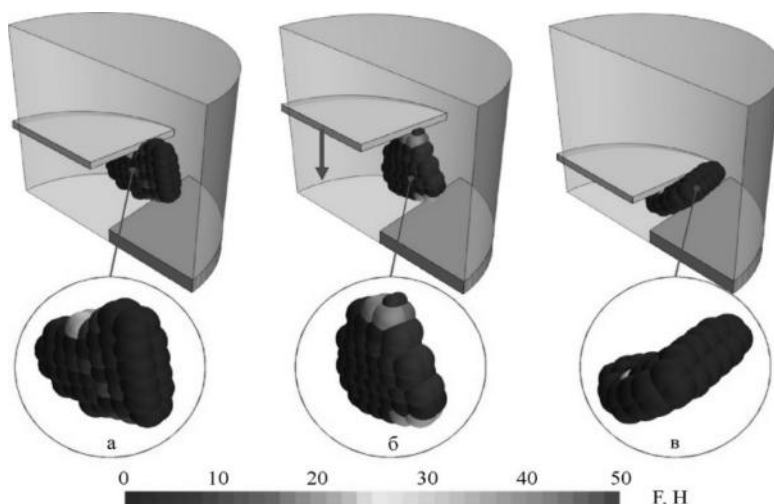


Рисунок 4 – Приклад симуляції руйнування зернини кукурудзи ударним різанням у положенні на бічній поверхні (а), вертикальному (б) та горизонтальному (в)

Джерело: розроблено авторами

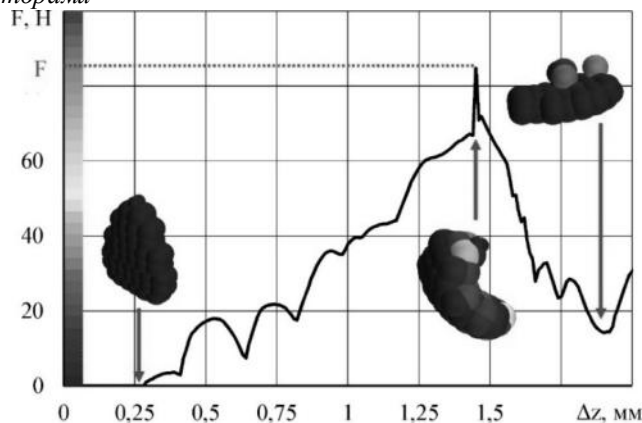


Рисунок 5 – Приклад динаміки зміни зусилля при руйнуванні зернини кукурудзи ударним різанням у вертикальному положенні

Джерело: розроблено авторами

Для кукурудзи:

– у горизонтальному положенні:

$$F_g^c = 1472,26 - 337,334l - 42,7824\alpha + 5,90499l\alpha + 0,35192\alpha^2; \quad (15)$$

– на бічній поверхні:

$$F_l^c = 506,258 - 127,277l - 9,46527\alpha + 2,05933l\alpha + 0,0399371\alpha^2; \quad (16)$$

– у вертикальному положенні:

$$F_v^c = 159,716 - 5,55777V + 1,11047V^2 - 1,74888\alpha - 0,189944V\alpha + 0,00982222\alpha^2. \quad (17)$$

Для пшениці:

– у горизонтальному положенні:

$$F_g^w = 133,741 - 42,5066l - 0,193652\alpha + 0,657696l\alpha - 0,0289088\alpha^2; \quad (18)$$

– на бічній поверхні:

$$F_l^w = 178,8 - 19,0944l - 1,90109\alpha; \quad (19)$$

– у вертикальному положенні:

$$F_v^w = 38,8957 + 4,4368V - 0,391895\alpha - 0,0876715V\alpha. \quad (20)$$

Для ячменю:

– у горизонтальному положенні:

$$F_g^b = 56,9373 - 11,7724l + 0,333859\alpha - 0,0147722\alpha^2; \quad (21)$$

– на бічній поверхні:

$$F_l^b = 105,222 - 11,0936l - 1,13344\alpha; \quad (22)$$

– у вертикальному положенні:

$$F_v^b = 27,4718 + 2,90126V - 0,284666\alpha - 0,057903V\alpha. \quad (23)$$

Графічна інтерпретація залежностей (15)–(23) наведена на рис. 6–8.

Аналіз отриманих результатів віртуального моделювання дозволив визначити ступінь впливу кожного з досліджуваних факторів на силу руйнування зерна кукурудзи. Найбільш впливовим чинником виявився кут між ударними накладками. Спостерігається чітка зворотна залежність: зі збільшенням кута відбувається зменшення сили, необхідної для руйнування зернини. Це пояснюється зменшенням компоненти нормального навантаження, яка передається на оболонку зерна при збільшенні кута взаємного розташування накладок. З фізичної точки зору, при малому куті ударні накладки спрямовані більш фронтально до зернини, забезпечуючи вищий рівень концентрованого механічного впливу у напрямку, перпендикулярному до оболонки. Це призводить до швидшого досягнення граничного стану напружень у зоні контакту та ініціювання руйнування.

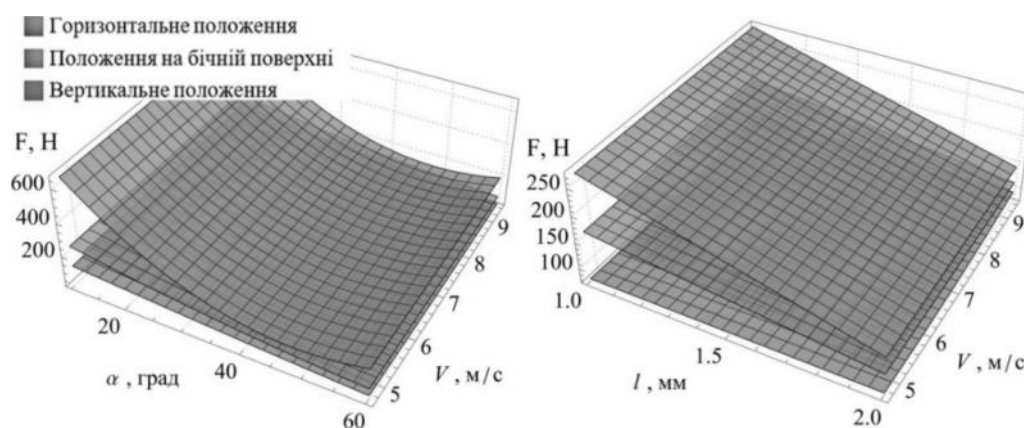


Рисунок 6 – Залежність сили руйнування зерна кукурудзи при ударному різанні від відстані між ударними накладками l , кута між накладками α та лінійної швидкості руху накладки V при її різному положенні
Джерело: розроблено авторами

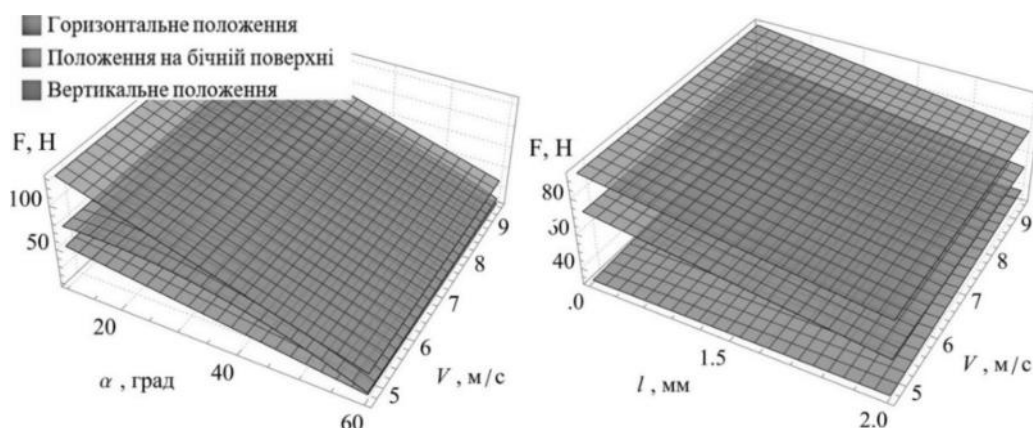


Рисунок 7 – Залежність сили руйнування зерна пшениці при ударному різанні від відстані між ударними накладками l , кута між накладками α та лінійної швидкості руху накладки V при її різному положенні
Джерело: розроблено авторами

Відстань між ударними елементами має помірний вплив порівняно з кутом. Встановлено, що зменшення відстані сприяє зростанню сили руйнування зерна. Це зумовлено тим, що при меншій відстані ударні накладки створюють сприятливіші умови для ефективного стискання оболонки, що пришвидшує розвиток локальних деформацій і формування тріщини. З фізичної точки зору, при зменшенні відстані між елементами зернина зазнає впливу двох майже одночасних ударів у ближчих зонах, що сприяє інтенсивнішому розподілу напружень у поперечному перерізі оболонки, прискорюючи процес накопичення пластичних деформацій та запуску механізмів зминання. Найбільш виражений ефект спостерігається у горизонтальному та бічному положеннях, де механізм руйнування реалізується переважно шляхом локального зминання та зсуву. У вертикальному положенні вплив відстані є менш суттєвим, оскільки навантаження діє вздовж найміцнішої геометричної осі.

Швидкість ударної накладки виявилася найменш впливовим фактором серед досліджуваних. Водночас, зі зростанням швидкості спостерігається тенденція до підвищення сили руйнування, особливо у вертикальному положенні зернина, де удар передається вздовж поздовжньої осі. У таких умовах кінетична енергія, яку передає накладка, ефективно концентрується в центральній частині зерна, сприяючи утворенню внутрішніх мікротріщин та підвищенню рівня напружень у структурі. З фізичної точки зору, швидкість впливає на імпульс та енергію удару: чим вища швидкість, тим більша миттєва сила взаємодії, що призводить до швидшого перевищення межі пружності матеріалу оболонки. Проте через короткий час взаємодії і швидку релаксацію напружень, ефект не є лінійним і проявляється лише в окремих просторових положеннях зернина, де ударна хвиля ефективніше передається вглиб структури.

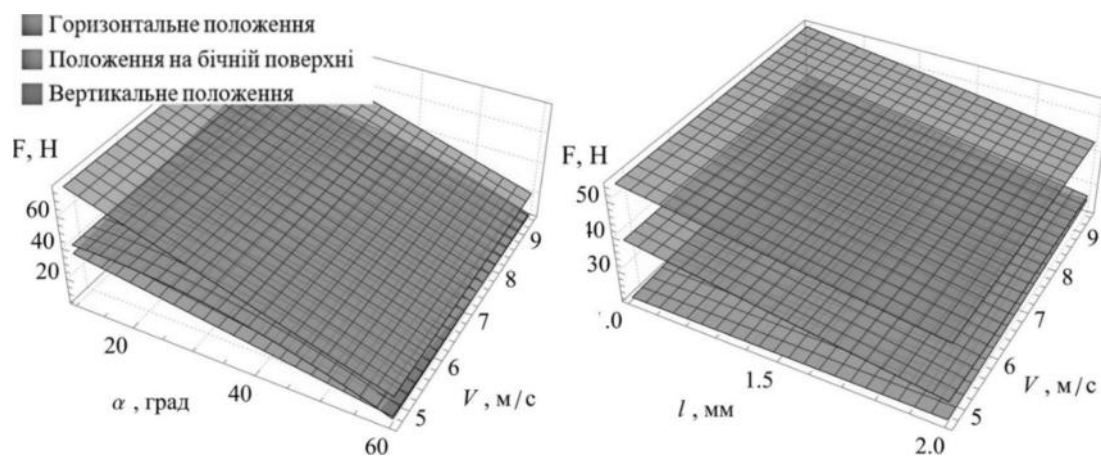


Рисунок 8 – Залежність сили руйнування зерна ячменю при ударному різанні від відстані між ударними накладками l , кута між накладками α та лінійної швидкості руху накладки V при її різному положенні
Джерело: розроблено авторами

Для комплексної оцінки було введено інтегральний критерій ефективності:

$$\Theta(l, \alpha, V) = \frac{F_x - F_{x\min}}{F_{x\max} - F_{x\min}} \cdot \frac{F_y - F_{y\min}}{F_{y\max} - F_{y\min}} \cdot \frac{F_z - F_{z\min}}{F_{z\max} - F_{z\min}} \cdot \frac{V - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} \cdot \frac{l_{\max} - l}{l_{\max} - l_{\min}} \rightarrow \min, \quad (24)$$

згідно якого повинна забезпечуватись умова мінімізації сили при найбільшій відстані між ударними накладками l (висока продуктивність процесу подрібнення) і найменшій швидкості руху ударної накладки V (менша витрати кінетичної енергії процесу подрібнення).

Вирішуючи спільно рівняння (24) разом із (15)–(23) в середовищі Wolfram Cloud отримуємо раціональні значення процесу подрібнення які наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Раціональні параметри процесу подрібнення з використанням розробленого робочого органу, отримані при чисельному моделюванні

Культура	Кукурудза	Пшениця	Ячмінь
Відстань між ударними накладками l , мм	1,78	1,68	1,79
Кут між ударними накладками α , °	43,8	43,6	50,7
Швидкість руху ударної накладки V , м/с	5,86	4,72	5,26
Сила руйнування зерна при ударному різанні F_x , Н	58,8	24,6	12,9
Сила руйнування зерна при ударному різанні F_y , Н	94,6	65,3	25,6
Сила руйнування зерна при ударному різанні F_z , Н	117,1	48,2	12,4
Частота обертання диска $n = 60V/(2\pi R)$, об/хв, де $R = 0,03$ м – радіус встановлення накладки, мм.	1865	1503	1676
Модульний зазор між дисками $\delta = l - 2t$, мм, де $t = 0,5$ мм – відстань від накладки до краю диска, мм	0,78	0,68	0,79
Кут встановлення ударних накладок $\beta = \alpha/2$, °	21,9	21,8	25,3

Висновки. Враховуючи специфіку конструкції нового робочого органу дискового подрібнювача з ударними накладками, досліджено вплив трьох ключових факторів (відстані між ударними накладками l , кута між ними α та лінійної швидкості руху накладки V) шляхом чисельного моделювання процесу руйнування зерна кукурудзи, пшениці та ячменю способом ударного різання із застосуванням методу дискретних елементів (DEM) у середовищі Simcenter STAR-CCM+. Встановлені закономірності сили руйнування зерна кукурудзи, пшениці і ячменя у трьох положеннях при ударному різанні від відстані між ударними накладками l , кута між накладками α та лінійної швидкості руху накладки V . Виявлені закономірності дозволяють дати кількісну оцінку та глибше фізичне розуміння процесів руйнування оболонки зерна в умовах ударного різання. Це є підґрунтям для оптимізації конструктивних параметрів подрібнювача, що забезпечить підвищення ефективності та енергоощадності процесу подрібнення різних типів зернового матеріалу. Для комплексної оцінки процесу подрібнення зернових культур було запропоновано інтегральний критерій ефективності, що забезпечує мінімізацію сили руйнування при максимальній відстані між ударними накладками та мінімальній швидкості їх руху. Це дозволяє досягти високої продуктивності процесу з одночасним зниженням витрат кінетичної енергії. Встановлені раціональні параметри подрібнення для основних зернових культур – кукурудзи, пшениці та ячменю. Аналіз отриманих результатів підтверджує, що параметри процесу (відстань між накладками $l = 1,68$ – $1,79$ мм, кути їх встановлення $\beta = 21,8$ – $25,3$ °, швидкість руху $V = 4,72$ – $5,86$ м/с, частота обертання диска $n = 1503$ – 1865 об/хв, модульний зазор $\delta = 0,68$ – $0,79$ мм) відображають фізико-механічні особливості кожної культури.

Список літератури

1. Gao P., Tian S., Xue X., Lu J. Determination methods and influencing factors of grain mechanical properties. *Journal of Food Quality*. 2024. P. 1–12. DOI: 10.1155/2024/3407485.

2. Осокіна Н. М., Костецька К. В., Герасимчук О. П. Physical and mechanical properties and quality indicators of grain of cereal cultures. *Збірник наукових праць Уманського НУС*. 2023. Т. 103, № 1. С. 292–307. DOI: 10.32782/2415-8240-2023-103-1-292-307.
3. Tavakoli M., Tavakoli H., Rajabipour A., Ahmadi H., Gharib-Zahedi S. M. T. Moisture-dependent physical properties of barley grains. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2009. Vol. 2, № 4. P. 84–91. DOI: 10.3965/j.issn.1934-6344.2009.04.084-091.
4. Sologubik C., Campañone L., Pagano A., Gely M. Effect of moisture content on some physical properties of barley. *Industrial Crops and Products*. 2012. Vol. 43. P. 762–767. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.08.019.
5. Firatligil-Durmuş E., Sýkorová A., Šárka E., Bubník Z., Schejbal M., Přihoda J. Geometric parameters of wheat grain determined by image analysis and FEM approach. *Cereal Research Communications*. 2010. Vol. 38, № 1. P. 122–133. DOI: 10.1556/crc.38.2010.1.13.
6. Seifi M. R., Alimardani R. The moisture content effect on some physical and mechanical properties of corn (Sc 704). *Journal of Agricultural Science*. 2010. Vol. 2, № 4. P. 125–134. DOI: 10.5539/jas.v2n4p125.
7. Coşkun M. B., Yalçın İ., Özarslan C. Physical properties of sweet corn seed (*Zea mays saccharata* Sturt.). *Journal of Food Engineering*. 2005. Vol. 74, № 4. P. 523–528. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2005.03.039.
8. Molenda M., Stasiak M. Determination of the elastic constants of cereal grains in uniaxial compression test. *International Agrophysics*. 2002. Vol. 16, № 1. P. 61–65.
9. Zewdu A., Solomon W. Moisture-dependent physical properties of TEF seed. *Biosystems Engineering*. 2006. Vol. 96, № 1. P. 57–63. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2006.09.008.
10. Дудін В. Ю., Білоус І. М. Дослідження процесу руйнування зерна кукурудзи з використанням цифрових моделей. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Т. 10, № 41, ч. 2. С. 123–130. DOI: 10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.123-130.
11. Kubík L., Božíková M., Kažimírová V. Mechanical properties of wheat grains at compression. *Acta Technologica Agriculturae*. 2021. Vol. 24, № 4. P. 202–208. DOI: 10.2478/ata-2021-0033.
12. Алієв Е. Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: *Аграрна наука*, 2023. 340 с. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9.
13. 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. Vol. 203. P. 107428. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107428.
14. 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: 10.1016/j.powtec.2021.05.065.
15. Kruggel-Emden H., Rickelt S., Wirtz S., Scherer V. A study on the validity of the multi-sphere Discrete Element Method. *Powder Technology*. 2008. Vol. 188, № 2. P. 153–165. DOI: 10.1016/j.powtec.2008.04.037.
16. 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. Vol. 217. P. 435–442. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.10.060.
17. Markauskas D., Kačianauskas R. Investigation of rice grain flow by multi-sphere particle model with rolling resistance. *Granular Matter*. 2010. Vol. 13, № 2. P. 143–148. DOI: 10.1007/s10035-010-0196-5.
18. 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. Vol. 53, № 4. P. 1201–1216. DOI: 10.13031/2013.32577.
19. Basiouny M., El-Yamani A. Performance evaluation of two different hammer mills for grinding corn cobs. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 7, № 1. P. 77–87. DOI: 10.21608/jssae.2016.39322.
20. Dibner J., Richards J. The digestive system: challenges and opportunities. *The Journal of Applied Poultry Research*. 2004. Vol. 13, № 1. P. 86–93. DOI: 10.1093/japr/13.1.86.
21. 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. Vol. 284. P. 187–194. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.06.042.
22. Markauskas D., Ramírez-Gómez Á., Kačianauskas R., Zdancevičius E. Maize grain shape approaches for DEM modelling. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2015. Vol. 118. P. 247–258. DOI: 10.1016/j.compag.2015.09.004.
23. Ramaj I., Romuli S., Schock S., Müller J. Discrete element modelling of bulk behaviour of wheat (*Triticum aestivum* L.) cv. ‘Pionier’ during compressive loading. *Biosystems Engineering*. 2024. Vol. 242. P. 123–139. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2024.04.005.

24. Molenda M., Horabik J. Mechanical properties of granular agro-materials and food powders for industrial practice. In: Characterization of mechanical properties of particulate solids for storage and handling. Eds. Horabik J., Laskowski J. Lublin : Institute of Agrophysics PAS, 2005. 146 p.
25. AZoM. AISI 1026 Carbon Steel (UNS G10260). URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6583> (дата звернення: 05.10.2022).
26. Boac J., Casada M., Pordesimo L., Petingco M., Maghirang R., Harner J. Evaluation of particle models of corn kernels for discrete element method simulation of shelled corn mass flow. *Smart Agricultural Technology*. 2023. Vol. 4. P. 100197. DOI: 10.1016/j.atech.2023.100197.
27. Wang X., Wu W., Jia H. Calibration of discrete element parameters for simulating wheat crushing. *Food Science & Nutrition*. 2023. Vol. 11, № 12. P. 7751–7764. DOI: 10.1002/fsn3.3693.

References

1. Gao, P., Tian, S., Xue, X., & Lu, J. (2024). Determination methods and influencing factors of grain mechanical properties. *Journal of Food Quality*, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2024/3407485>.
2. Osokina, N. M., Kostetska, K. V., & Herasymchuk, O. P. (2023). *Physical and mechanical properties and quality indicators of grain of cereal cultures. Collection of Scientific Papers of Uman NUH*, 103(1), 292–307 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32782/2415-8240-2023-103-1-292-307>.
3. Tavakoli, M., Tavakoli, H., Rajabipour, A., Ahmadi, H., & Gharib-Zahedi, S. M. T. (2009). Moisture-dependent physical properties of barley grains. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2(4), 84–91. <https://doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2009.04.084-091>
4. Sologubik, C., Campañone, L., Pagano, A., & Gely, M. (2012). Effect of moisture content on some physical properties of barley. *Industrial Crops and Products*, 43, 762–767. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.08.019>.
5. Firatligil-Durmuş, E., Sýkorová, A., Šárka, E., Bubník, Z., Schejbal, M., & Přihoda, J. (2010). Geometric parameters of wheat grain determined by image analysis and FEM approach. *Cereal Research Communications*, 38(1), 122–133. <https://doi.org/10.1556/crc.38.2010.1.13>.
6. Seifi, M. R., & Alimardani, R. (2010). The moisture content effect on some physical and mechanical properties of corn (Sc 704). *Journal of Agricultural Science*, 2(4), 125–134. <https://doi.org/10.5539/jas.v2n4p125>.
7. Coşkun, M. B., Yalçın, İ., & Özarslan, C. (2005). Physical properties of sweet corn seed (*Zea mays saccharata* Sturt.). *Journal of Food Engineering*, 74(4), 523–528. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.03.039>.
8. Molenda, M., & Stasiak, M. (2002). Determination of the elastic constants of cereal grains in uniaxial compression test. *International Agrophysics*, 16(1), 61–65.
9. Zewdu, A., & Solomon, W. (2006). Moisture-dependent physical properties of TEF seed. *Biosystems Engineering*, 96(1), 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.09.008>.
10. Dudin, V. Yu., & Bilous, I. M. (2024). *Study of the process of corn grain destruction using digital models. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 10(41/2), 123–130 [in Ukrainian]. [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).
11. Kubík, L., Božíková, M., & Kažimírová, V. (2021). Mechanical properties of wheat grains at compression. *Acta Technologica Agriculturae*, 24(4), 202–208. <https://doi.org/10.2478/ata-2021-0033>
12. Aliiev, E. B. (2023). *Numerical modeling of agro-industrial production processes: Textbook*. Kyiv: Agrarian Science [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9>.
13. 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>.
14. 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>.
15. 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), 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.037>.
16. 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>.
17. Markauskas, D., & Kačianauskas, R. (2010). Investigation of rice grain flow by multi-sphere particle model with rolling resistance. *Granular Matter*, 13(2), 143–148. <https://doi.org/10.1007/s10035-010-0196-5>

18. 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>.
19. Basiouny, M., & El-Yamani, A. (2016). Performance evaluation of two different hammer mills for grinding corn cobs. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 7(1), 77–87. <https://doi.org/10.21608/jssae.2016.39322>.
20. Dibner, J., & Richards, J. (2004). The digestive system: Challenges and opportunities. *The Journal of Applied Poultry Research*, 13(1), 86–93. <https://doi.org/10.1093/japr/13.1.86>
21. 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, 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.06.042>.
22. Markauskas, D., Ramírez-Gómez, Á., Kačianauskas, R., & Zdancevičius, E. (2015). Maize grain shape approaches for DEM modelling. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.09.004>.
23. Ramaj, I., Romuli, S., Schock, S., & Müller, J. (2024). Discrete element modelling of bulk behaviour of wheat (*Triticum aestivum* L.) cv. 'Pionier' during compressive loading. *Biosystems Engineering*, 242, 123–139. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.04.005>.
24. Molenda, M., & Horabik, J. (2005). Mechanical properties of granular agro-materials and food powders for industrial practice. In J. Horabik & J. Laskowski (Eds.), *Characterization of mechanical properties of particulate solids for storage and handling* (p. 146). Lublin: Institute of Agrophysics PAS.
25. AZoM. (n.d.). *ASTM A1026 Carbon Steel (UNS G10260)*. Retrieved October 5, 2022, from <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6583>.
26. Boac, J., Casada, M., Pordesimo, L., Petingco, M., Maghirang, R., & Harner, J. (2023). Evaluation of particle models of corn kernels for discrete element method simulation of shelled corn mass flow. *Smart Agricultural Technology*, 4, 100197. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100197>.
27. Wang, X., Wu, W., & Jia, H. (2023). Calibration of discrete element parameters for simulating wheat crushing. *Food Science & Nutrition*, 11(12), 7751–7764. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3693>.

Elchyn Aliiev, Sr. Researcher, DSc., **Illia Bilous**

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Simulation of the Grain Destruction Process by Impact Cutting

The aim of the research is to perform numerical modeling of the concentrated feed grinding process and to determine the influence of the physical and mechanical properties of the grain, its orientation, and the parameters of the disc crusher on the fracture force during impact cutting.

Considering the specific design of the new working unit of the disc crusher with impact inserts, the influence of three key factors – distance between impact inserts (l), angle between them (α), and the linear velocity of insert motion (V) – was investigated through numerical simulation of the grain fracture process for corn, wheat, and barley using the discrete element method (DEM) in the Simcenter STAR-CCM+ environment. The patterns of fracture force for corn, wheat, and barley grains under three orientations during impact cutting were established depending on the distance between inserts, the angle between them, and the linear velocity.

The identified patterns provide a quantitative assessment and a deeper physical understanding of the grain shell destruction processes under impact cutting conditions. This serves as a basis for optimizing the design parameters of the crusher to enhance the efficiency and energy savings in processing different types of grain materials.

To comprehensively evaluate the grain grinding process, an integral efficiency criterion was proposed, aiming to minimize fracture force at maximum distance between inserts and minimum insert speed. This allows for high process productivity while simultaneously reducing kinetic energy consumption. Rational grinding parameters were established for the main cereal crops – corn, wheat, and barley.

The analysis of the obtained results confirms that the process parameters (distance between inserts $l = 1.68\text{--}1.79$ mm, installation angle $\beta = 21.8\text{--}25.3^\circ$, insert velocity $V = 4.72\text{--}5.86$ m/s, disk rotation speed $n = 1503\text{--}1865$ rpm, modular clearance $\delta = 0.68\text{--}0.79$ mm) reflect the physical and mechanical characteristics of each crop.

disc crusher, impact inserts, discrete element method (DEM), Simcenter STAR-CCM+, impact cutting, grain destruction, design parameters, optimization, energy efficiency

Одержано (Received) 22.07.2025

Прорецензовано (Reviewed) 31.07.2025

Прийнято до друку (Approved) 27.08.2025