

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-26>

УДК 631.565:656.073.8:004.94

МІРСЬКИХ РУСЛАН

Одеський національний технологічний університет

<https://orcid.org/0009-0001-9012-5581>

e-mail: [rmirskykh@gmail.com](mailto:rmirskykh@gmail.com)

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТРАВМУВАННЯ ЗЕРНА ПРИ ЙОГО ПЕРЕМІЩЕННІ ТРАНСПОРТНО- ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ЛІНІЯМИ

У роботі розроблено методику моделювання процесу травмування зерна на основі теорії розмірностей та аналізу подібності у процесі підготовки до проведення дослідів, пов'язаних із впровадженням травмоощадних технологій у транспортно- технологічних лініях. Запропонований підхід дає можливість масштабувати результати експериментальних чи лабораторних досліджень до реальних умов роботи обладнання. За результатами дослідження визначено і класифіковано параметри, які призводять до негативного ефекту травмування зерна, зокрема фізико-механічні властивості, параметри зовнішнього впливу та біологічні особливості зерна. Класифікацію проведено на основі процесів або властивостей, що мають схожу природу фізичних характеристик. На основі визначених параметрів створено функціональну схему показника «травмування зерна» на рівні транспортно- технологічної системи. Застосовуючи критерії подібності, отримано безрозмірні комплекси, що дозволяють визначити вплив обраних параметрів на процес, які не залежать від одиниць вимірювання. Це робить їх корисними для виявлення основних закономірностей процесу. Як відомо, при проведенні підготовки та планування експерименту суттєве значення має визначення параметрів процесу. У дослідженнях ці параметри можна використовувати для порівняння як типових процесів транспортування зерна, так і відокремлених вузлів та елементів системи. При застосуванні теорії розмірностей (теорема Федермана–Букінгема) виділено три основних критерії, що впливають на пошкодження зерна при його транспортуванні, які не є взаємопов'язаними один з одним: густина оболонки зернівки, динамічна сила, яка діє на зерно та твердість поверхні дотику зернівки до робочого органу чи до обладнання. Отримані результати дослідження дозволяють не лише прогнозувати рівень травмування зернівки, але і розробляти рекомендації щодо вибору оптимальних режимів роботи транспортного обладнання та конструктивних рішень, спрямованих на мінімізацію втрат. Це підкреслює важливість комплексного підходу до проектування транспортних систем, що поєднує технічні, економічні та технологічні аспекти.

**Ключові слова:** травмоощадна технологія, травмування зерна, моделювання.

MIRSKYKH RUSLAN

Odesa National University of Technology

## MODELING OF THE GRAIN INJURY PROCESS DURING THE OPERATION OF TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL LINES

The process of grain transportation through technological lines is characterized by considerable mechanical damage to kernels. As is well known, the selection of process parameters plays a crucial role in the preparation and planning of experiments. The chosen parameters should encompass all major factors of the technological process, while their number must remain minimal for the designed experimental setup. This paper presents a methodology for modeling the grain damage process based on dimensional analysis and similarity theory during the preparatory stage of experiments aimed at implementing damage-reducing technologies in transport and technological lines. The proposed approach enables scaling experimental or laboratory results to real operating conditions of equipment. The study identifies and classifies parameters that cause adverse grain breakage effects, including physico-mechanical properties, external impact parameters, and biological characteristics of grain. Classification is carried out according to processes or properties sharing similar physical characteristics. Based on the defined parameters, a functional scheme of the “grain damage” indicator at the level of the transport-technological system has been developed. By applying similarity criteria, dimensionless complexes are obtained, allowing the assessment of parameter effects on the process independently of measurement units. This makes them useful for revealing fundamental regularities of the process. In research applications, these parameters can be employed to compare both typical grain transportation processes and individual nodes or system elements. Using dimensional analysis (Federman–Buckingham theorem), three main independent criteria affecting grain damage during transportation are identified: kernel shell density, dynamic force acting on the grain, and hardness of the contact surface between the kernel and the working body or equipment. The results obtained not only enable the prediction of kernel damage levels but also provide recommendations for selecting optimal operating modes of transport equipment and for developing design solutions aimed at minimizing losses. This highlights the importance of an integrated approach to the design of transport systems, combining technical, economic, and technological aspects.

**Keywords:** damage-reducing technology, kernel breakage, modeling.

Стаття надійшла до редакції / Received 14.01.2026

Прийнята до друку / Accepted 11.02.2026

Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Мірських Руслан

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

В Україні зерно є важливим, навіть стратегічним, ресурсом, що формує продовольчу безпеку держави та є цінною сировиною для виробництва великої кількості харчових продуктів. В даний час підвищення урожайності зерна стає ще більш актуальним завданням агроворобників, так як через війну площі сільськогосподарських угідь зменшилися, значна частина території України є або тимчасово окупованою, або потенційно забрудненою вибуховими та іншими небезпечними речовинами. Травмування та пошкодження зерна є однією з головних причин погіршення якості зерна як при зберіганні, так і для подальшого зниження

рівня схожості та сили росту насінневого матеріалу. Саме тому впровадження травмоощадних технологій при транспортуванні його транспортно-технологічними системами (ТТС) є актуальним та необхідним фактором сьогодення. Концепція травмоощадної технології є узагальненням технологічних процесів чи операцій, в результаті яких ми будемо мати зменшення пошкоджень та травмування насіння в післязбиральних виробничих процесах. Це системний підхід, де кожен елемент лінії від окремого гвинта до загальної технологічної схеми та розташування обладнання розглядається через призму його потенційного впливу на цілісність зерна. В результаті ми матимемо зменшення кількості травмованого та пошкодженого зерна і підвищення його якості за рахунок цього.

Одним із основних джерел втрат є травмування зерна, що спричиняється механічним шляхом при його переміщенні в транспортному обладнанні – норіях, конвеєрах, шнеках та самопливних трубах. Кожен етап переміщення (завантаження, розвантаження, вертикальне чи горизонтальне транспортування) призводить до зштовхування та тертя зернівок з робочими органами технологічного обладнання та між собою. Ці пошкодження призводять до зменшення товарної цінності зерна до погіршення посівних якостей насінневого матеріалу, а також до значних економічних втрат [1; 2]. Економічні збитки мають комплексний характер і складаються з прямих втрат зниження маси зерна, зниження виручки сільгоспвиробників через погіршення класності зерна, підвищення затрат на його зберігання, а також репутаційних втрат на внутрішніх та міжнародних ринках [3; 4; 5]

Травмування зерна є складним фізичним процесом, залежним від великої кількості співзалежних між собою факторів: конструктивних параметрів обладнання, проектування технологічних ліній транспортування, режимів роботи обладнання і фізико-механічних властивостей самого зерна [6]. При цьому виробники проектують обладнання, ставлячи в пріоритет підвищену продуктивність, знижену собівартість та загальну мінімальну капітальних затрат. Але часто не враховують делікатну природу зерна як живого біологічного об'єкта [7].

Через вищезазначені фактори оцінка та моделювання механічних пошкоджень зернівки набирає все більшого поширення. Традиційні підходи до моделювання, які засновані на емпіричних залежностях і методах часто мають обмежену сферу застосування і не дозволяють адекватно прогнозувати поведінку зернової маси при різних умовах [8]. Це вимагає більш універсальних методів, які здатні врахувати велику кількість факторів процесу та масштабувати результати досліджень до умов реального виробництва. Одним досить ефективних методів спрощення та систематизації складних фізичних процесів є теорія розмірностей та подібності.

#### **Аналіз досліджень та публікацій**

В сучасному елеваторному виробництві багато технологічних процесів, технічних і технологічних систем оцінюють великою кількістю факторів та параметрів, які є взаємозалежними та впливають на систему чи характеризують її.

У роботі [9] проведено комплексний огляд теорій та моделей, розроблених для вивчення та прогнозування пошкоджень зерна. Проведено порівняння аналітичних моделей Сакурмана і Раджашекхара, Кіцунай і Аракава, Саада і Малліка. Міу та Мартиненка. Позначено переваги та недоліки цих моделей. Автор вважає, що процес проектування механічних елементів обладнання за своєю суттю є інтеративним та досить залежним від досвіду та інтуїції конструктора. Однак єднання штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання в програми CAD допоможе подолати розрив між людською інтуїцією та обчислювальною потужністю. Автор робить висновки, що хоч і існують різноманітні підходи до моделювання, необхідний подальший розвиток для точного прогнозування та оптимізації процесів.

Емпіричні методи моделювання травмування зерна розроблено в роботі [5]. Вказано, що всі ці моделі є по суті графіками, що відповідають лише експериментальним даним, що часто не можливо узагальнити і зазвичай не дають повного уявлення про механіку пошкодження зерна. Для застосування та перевірки моделей на основі механіки потрібно прикласти багато зусиль.

Досить розповсюдженим в сучасному машинобудуванні є проектування систем за допомогою моделей MBSE (Model-Based System Engineering) [10; 11], яка об'єднує в себе три концепції: віртуальну модель, системне мислення і системну інженерію. Тобто створюється, випробовується віртуальна модель технічних засобів, що розробляється.

Метод дискретних елементів (DEM) – це механістичний підхід до моделювання, який використовує властивості матеріалу та взаємодії однієї частинки для моделювання механічної та динамічної поведінки зернівки у потоці [12–14]. Моделювання проводиться у напрямку оптимізації параметрів, що дозволяє підвищити точність прогнозування руйнування зернівки. Крім цього, DEM іноді використовують для розрахунків деталей, для яких важко визначити дію сил, що впливають на об'єкт та розсіювання енергії впливу звичайним експериментальним способом [4]. Цікавим є те, що даний метод дозволяє використовувати та варіювати вихідні параметри залежно від типу зерна і навіть від сорту зерна в межах одного сорту [10]. Однак автори зазначають, що точність DEM має велику залежність від коректності вхідних параметрів, визначення яких є окремою складною задачею.

#### **Формулювання цілей статті**

Незважаючи на потужний розвиток комп'ютерного моделювання, метод моделювання на основі теорії подібності не втрачає своєї актуальності. Завданням цієї роботи є розробка методології моделювання процесу травмування зерна на основі теорії розмірності та аналізу подібності у процесі підготовки до проведення

дослідів, пов'язаних із впровадженням травмоощадних технологій у ТТС. Запропонований підхід дозволяє ідентифікувати основні безрозмірні комплекси, які визначають ступінь пошкодження зерна. Використання критеріїв подібностей дає можливість уніфікувати експериментальні дані, які було отримано на моделях, та застосувати їх для проектування та експлуатації обладнання. Застосування даної моделі забезпечує чинний, діючий та функціональний зв'язок між теоретичною та експериментальною частинами. Також вона забезпечить функціональний зв'язок між сукупністю цілісних величин, що характеризують процес на рівні фізичному рівні та спрощує проведення експерименту, для якого властива велика кількість параметрів. Аналіз літератури показує, що комплексні роботи, які б систематизували критерії, що відповідають за процеси руйнування зернівки, потребують додаткового обґрунтування.

### Виклад основного матеріалу

**Механізм травмування зерна.** Механічні пошкодження зерна розрізняють за видами деформації, що її спричинили: удар, стиснення, зсув та тертя (стирання). Удар є найпоширенішим та найбільш небезпечним видом навантаження. Він виникає при зіткненні зернівки з робочими органами обладнання або з іншими зернівками при русі на великих швидкостях. При зіткненні двох пружних тіл у точці контакту виникають локальні напруги стиснення. Руйнування відбувається, коли ці напруги перевищують межу міцності зерна. Енергія, що поглинається зернівкою при ударі, частково переходить у пружну деформацію, а частково – у пластичну деформацію та руйнування. При зіткненні в зернівці також поширюються хвилі напружень, які призводять до виникнення розтягувань у віддалених від місця удару точках, що також може викликати утворення тріщини. Деформація стиснення виникає, коли зернівка потрапляє між двома поверхнями, що зближуються. При цьому, якщо навантаження зростає повільно, зернівка деформується пластично. Коли напруження в зернівці перевищують межу її міцності на стиск, відбувається роздавлювання [15]. Пошкодження від зсуву виникають, коли різні частини зернівки зміщуються одна відносно одної під дією дотичних напружень. Зазвичай міцність зерна на зсув значно нижча, ніж на стиск [16].

**Основи теорії розмірностей та аналізу подібності.** Теорія подібності – це область інженерної науки, що використовується при тестуванні різних інженерних моделей. Геометрична, кінематична та динамічна подібності є основними критеріями подібності теорії подібності. На їх базі можна побудувати масштабовану модель, яка застосовується експериментально для передбачення поведінки прототипу [7]. У наукових дослідженнях часто доводиться стикатися з тим, що кількість параметрів досить велика, щоб провести експериментальні випробування, а їх вартість значно висока. Тому розробка масштабованої моделі для проведення експерименту еквівалентного заміщення за допомогою теорії подібності є досить важливим методом. Аплікація методів теорії подібності та теорії розмірностей як підготовки до проведення експерименту, забезпечує взаємозв'язок між групами величин, що є характерними на рівні фізичної моделі [18]. Ключовим інструментом аналізу розмірностей є теорема Букінгема, а саме  $\pi$ -теорема. Суть цього методу полягає в тому, що узагальнення факторів може бути зведено до безрозмірних критеріїв подібності  $\pi_1, \pi_2, \dots$  т. д. Сенс  $\pi$ -критеріїв є таким, що вони являються безрозмірними змінними величинами, що допомагають полегшити та спростити аналіз складних процесів та зв'язати їх з основними параметрами. З їх допомогою можна досліджувати вплив різноманітних чинників на процес а також узагальнювати результати та робити висновки для характеристики процесу травмування зерна, які будуть діяти для цілого класу подібних явищ. Як результат, всі параметри згруповано в окремі безрозмірні критерії подібності. Для знаходження зазначених критеріїв подібності необхідно вибрати основні одиниці вимірювання, після чого через них виразити розмірність інших величин. Так, кількість факторів – це  $n$  величин, а  $r$  – це кількість величин, які мають незалежні розмірності, отримаємо  $n - r$  критеріїв. Умовою є те, що вибрані критерії повинні знаходитись в обумовленій залежності. Окрім цього, якщо два процеси є подібними, то і їхні безрозмірні критерії теж повинні бути однаковими. Це є основою моделювання, оскільки дозволяє переносити результати, отримані на моделі, на реальний об'єкт. На рис. 1 показано процес моделювання впливу всіх факторів процесу транспортування зерна ТТС на травмування зернівки.

Застосування описаної методології дозволяє розв'язати ряд важливих практичних задач при впровадженні травмоощадних технологій у транспортно-технологічних лініях. Так, на рис. 2 визначено параметри, які впливають на процес травмування зерна.

Згідно із даною структурною системою, травмування зерна можна визначити наступною залежністю:

$$L = f(Fm_i ; E_i ; Vam_i) \quad (1)$$

Функціональна схема формування показника пошкодження зерна на рівні ТТС показана на рис. 3.

Виходячи з цього, на підставі аналізу конструкційних особливостей транспортно-технологічного обладнання та використовуючи власні дослідження, можемо зробити висновок, що у сукупному вигляді залежність травмування зерна можна записати у вигляді наступного рівняння:

$$l = f(E, \rho, R_z, S, F, \mu_{пов}, R, M) \quad (2)$$

Для визначення необхідної кількості факторів використано метод зменшення числа критеріїв через виключення таких, що були менш вагомими. Таким чином деякі параметри, що суттєво не впливають на процес, до уваги не бралися. Як відомо, розмірність чинникового простору залежить від кількості факторів, а тому застосуємо теорему розмірностей для створення математичної моделі процесу пошкодження зерна. У вигляді критеріального рівняння можемо записати наступне:

$$\Delta l = F(\pi_1; \pi_2; \pi_3; \pi_4; \pi_5) \quad (3)$$

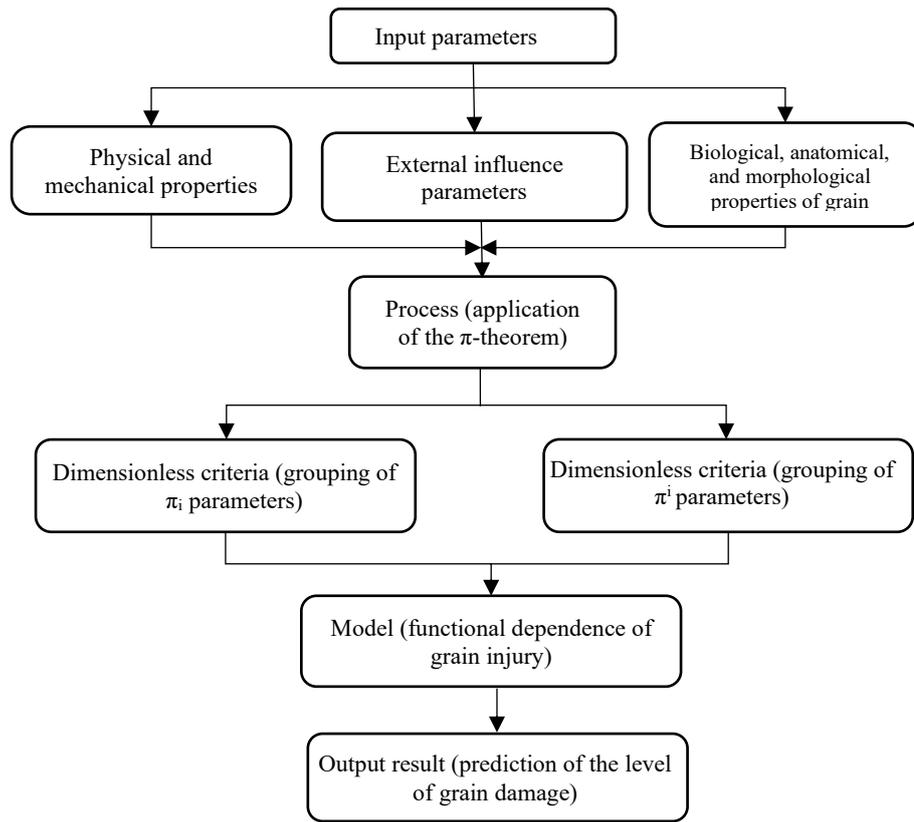


Рис. 1. Схема застосування теорії розмірності при моделювання процесу травмування зерна

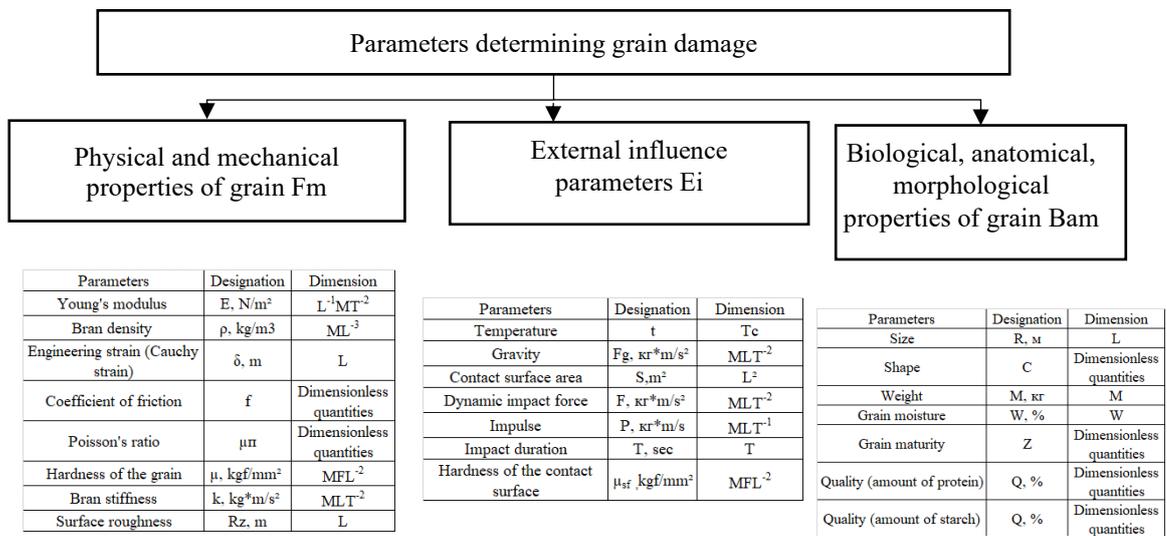


Рис. 2. Структурна модель параметрів, які чинять вплив на процес травмування зерна

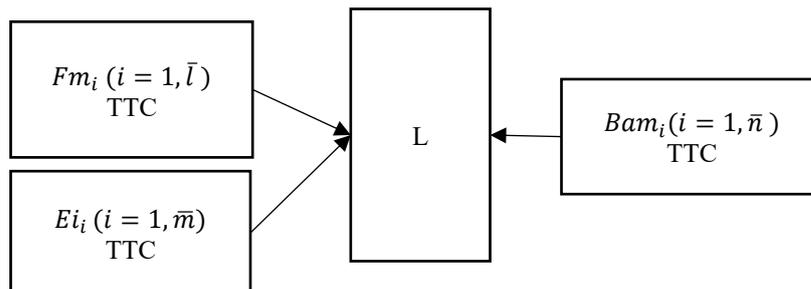


Рис. 3. Функціональна схема формування показника «травмування зерна» на рівні транспортно-технологічної системи

Щоб створити  $\pi$ -критерії, використаємо теорією розмірностей. Завдяки цьому ми зможемо звести всі параметри до безрозмірних факторів, що полегшить оцінювання, аналіз та моделювання процесу травмування зерна.

$$\pi_1 = \rho^{\varphi_{11}} F^{\varphi_{12}} \mu_{\text{пов}}^{\varphi_{13}} E \tag{4}$$

$$\pi_2 = \rho^{\varphi_{21}} F^{\varphi_{22}} \mu_{\text{пов}}^{\varphi_{23}} R_z \tag{5}$$

$$\pi_3 = \rho^{\varphi_{31}} F^{\varphi_{32}} \mu_{\text{пов}}^{\varphi_{33}} S \tag{6}$$

$$\pi_4 = \rho^{\varphi_{41}} F^{\varphi_{42}} \mu_{\text{пов}}^{\varphi_{43}} R \tag{7}$$

$$\pi_5 = \rho^{\varphi_{51}} F^{\varphi_{52}} \mu_{\text{пов}}^{\varphi_{53}} M \tag{8}$$

Сформулюємо рівняння (4) у розмірному вигляді:

$$M^0 L^0 T^0 = [ML^{-3}]^{\varphi_{11}} * [MLT^{-2}]^{\varphi_{12}} * [ML^3 T^{-2}]^{\varphi_{13}} * [ML^{-1} T^{-2}] \tag{9}$$

Перетворимо (9) в залежність:

$$[M^0 L^0 T^0] = M^{\varphi_{11} + \varphi_{12} + \varphi_{13} + 1} * L^{-3\varphi_{11} + \varphi_{12} + 3\varphi_{13} - 1} * T^{-2\varphi_{12} - \varphi_{13} - 2} \tag{10}$$

Визначимо показники ступенів з нижченаведеної системи рівнянь

$$\begin{cases} \varphi_{11} + \varphi_{12} + \varphi_{13} + 1 = 0 \\ -3\varphi_{11} + \varphi_{12} + 3\varphi_{13} - 1 = 0 \\ -2\varphi_{12} - \varphi_{13} - 2 = 0 \end{cases} \tag{11}$$

Після вирішення отриманої системи рівнянь отримаємо значення  $\varphi_{12}$ ,  $\varphi_{11}$ ,  $\varphi_{13}$ , які дорівнюють  $\varphi_{12} = 4$ ;  $\varphi_{11} = -8$ ;  $\varphi_{13} = 3$ .

Тоді перший критерій  $\pi$  запишемо як

$$\pi_1 = \rho^{-8} F^4 \mu_{\text{пов}}^3 E = \frac{F^4 \mu_{\text{пов}}^3 E}{\rho^8} \tag{12}$$

Точно так само визначимо значення всіх інших  $\pi$ -критеріїв, які після розв'язку систем будуть мати значення:

$$\pi_2 = \frac{R\sqrt{F}}{\sqrt{\mu_{\text{пов}}}} \tag{13}$$

$$\pi_3 = \frac{FS}{\mu_{\text{пов}}} \tag{14}$$

$$\pi_4 = \frac{\mu_{\text{пов}}}{\sqrt[3]{\rho L}} \tag{15}$$

$$\pi_5 = \frac{M \sqrt[3]{\mu_{\text{пов}}^3 \sqrt[3]{\rho^7}}}{\sqrt{F^3}} \tag{16}$$

Виходячи з цього, рівняння процесу травмування насіння у безрозмірній формі буде мати вигляд:

$$\Delta l = f\left(\frac{F^4 \mu_{\text{пов}}^3 E}{\rho^8}; \frac{R\sqrt{F}}{\sqrt{\mu_{\text{пов}}}}; \frac{FS}{\mu_{\text{пов}}}; \frac{\sqrt[3]{\rho L}}{\mu_{\text{пов}}}; \frac{M \sqrt[3]{\mu_{\text{пов}}^3 \sqrt[3]{\rho^7}}}{\sqrt{F^3}}\right) \tag{17}$$

Де  $\Delta l$  – це травмування зернівки при дії сили, що прикладається до неї.

Якщо вираз (17) переписати у вигляді суми критеріїв, ми отримаємо:

$$\Delta l = \frac{F^4 \mu_{\text{пов}}^3 E}{\rho^8} + \frac{R\sqrt{F}}{\sqrt{\mu_{\text{пов}}}} + \frac{FS}{\mu_{\text{пов}}} + \frac{\sqrt[3]{\rho L}}{\mu_{\text{пов}}} + \frac{M \sqrt[3]{\mu_{\text{пов}}^3 \sqrt[3]{\rho^7}}}{\sqrt{F^3}} \tag{18}$$

Розв'язавши дане рівняння, ми отримаємо критеріальне рівняння у наступному структурному вигляді:

$$\Delta l = \mu_{\text{пов}} * F * \frac{\rho}{E} + R^2 + \rho L + M\rho + S \tag{19}$$

Вираз  $\frac{\rho}{E}$  є часовим критерієм.

Таким чином, проаналізувавши вираз (19), ми отримаємо три основні критерії, які мають вплив на руйнування зерна при його русі в ТТС: густина оболонки зернівки  $\rho$ , динамічна сила, яка діє на зерно  $F$  та твердість поверхні дотику зернівки до робочого органу чи до обладнання  $\mu_{\text{пов}}$ .

### Висновки з даного дослідження

#### і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Після проведення аналізу роботи ТТС руху зерна було визначено критичні травмонебезпечні ділянки та структуровано параметри, що мають вплив на процес травмування зерна.

2. На основі теорії розмірностей було отримано безрозмірні комплекси, що дозволяють визначити важливість і коректність обраних на початку факторів та параметрів, які мають вплив на пошкодження зернівки. Виділено три основні критерії, що впливають на пошкодження зерна в ТТС, але при цьому не є пов'язаними один з одним: густина оболонки зернівки, динамічна сила, яка діє на зерно та твердість поверхні дотику зернівки до робочого органу чи до обладнання. Рівняння (19) можна застосовувати для прогнозування травмування зерна, якщо відомі дані параметри.

3. Використання теорії подібності і розмірного аналізу а також критеріальних величин доцільно використовувати при підготовці до проведення експерименту чи при проектуванні ТТС. Застосування цього методу забезпечує взаємозв'язок між цілими комплексами величин, які характеризують процес на рівні фізичної моделі та значно спрощують проведення експериментів для систем і процесів, які мають велику кількість параметрів.

*Перспективи подальших досліджень.* Буде продовжено вивчення та аналіз процесів, які відбуваються у гравітаційному вільному потоці руху зерна, в критичних ділянках системи транспортування зерна, а особливо в місцях зміни напрямку руху зернових потоків. Проводитиметься аналіз конструкторсько- просторових рішень для подальшого узгодження руху зерна з робочими органами технологічного транспортного обладнання, зменшення ймовірності їх руйнівного зіткнення та зменшення об'ємів травмування та пошкодження насіння.

### Література

1. Mesterházy A, Olah J, Popp J. Losses in the Grain Supply Chain: Causes and Solutions / A Mesterhazy, J. Olah, J. Popp // Sustainability. – 2020. – Vol. 12(6). - P. 2342-2361. — Режим доступу : [Doi.org/10.3390/su12062342](https://doi.org/10.3390/su12062342) (Дата звернення: 08.10.2025). — Назва з екрана.
2. GuiXiang C. Factors, Harms, and Control of Corn Kernel Breakage: A Review / C. GuiXiang, Y. YaHao, L. ChaoSai, L. WenLei, L. JingRan // Ann Food Process Preserv. - 2023. - №7(1). - P.1038-1057. - Режим доступу : [Doi.org/10.47739/2573-1033.foodprocessing.1038](https://doi.org/10.47739/2573-1033.foodprocessing.1038) (Дата звернення: 07.10.2025). — Назва з екрана.
3. Heruk S. The effect of grain size on strength and quality oof the seed / S. Heruk, S. Pustovit // Scientific journal of the Ternopil national technical university. - 2023. - Vol. 110, no. 2. P. 40–45. DOI:10.33108/visnyk\_tntu2023.02.040
4. Kruszelnicka W. Study of Selected Physical-Mechanical Properties of Corn Grains Important from the Point of View of Mechanical Processing Systems Designing / W. Kruszelnicka // Materials. - 2021. - №14 (6). - P. 1467-1476. DOI:10.3390/ma14061467
5. Zhengpu Chen. A Review of Grain Kernel Damage: Mechanisms, Modeling, and Testing Procedures / Zhengpu Chen, Carl Wassgren, Kingsly Ambrose // Transactions of the ASABE. - 2020.- №63(2). - P. 455-475. - Doi.org/10.13031/trans.13643
6. Rogatynskiy R. Model of flow transportation of bulk cargo by vertical screw conveyors / R. Rogatynskiy // Scientific journal of the Ternopil national technical university. - 2023. - Vol. 111, no. 3. - P. 5–14. - DOI:10.33108/visnyk\_tntu2023.03.005
7. Karp I. The process of moving grain material in the pneumatic line of a pneumatic screw conveyor / I. Karp // Scientific journal of the Ternopil national technical university. - 2025. - Vol. 118, no. 2. P. 79–90. - DOI:10.33108/visnyk\_tntu2025.02.079.
8. Romaniuk W. The Application of Similarity Theory and Dimensional Analysis to the Study of Centrifugal Rotary / W. Romaniuk // Energies. - 2021. - Vol. 14 (15). - P. 4501-4517. - DOI:10.3390/en14154501.
9. LooH G. A. Grain kernel damage during threshing: a comprehensive review of theories and models. / G. A. LooH // Journal of Agricultural Engineering. - 2025. - Vol. 56(1). – P. 25-41. - DOI:10.4081/jae.2025.1674.
10. Dudin V. Investigation of the Corn Kernel Destruction Process Using Digital Models / V. Dudin // Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. - 2024. - № 2, 10(41). - P. 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)
11. Aliiev E. Numerical simulation of agricultural production processes: textbook / E. Aliiev - Kyiv: Agrarna nauka, 2023. - 340 p. DOI:10.31073/978-966-540-584-9.
12. Chen Z., Wassgren C., Ambrose R. Development and validation of a DEM model for predicting impact damage of maize kernels / Z. Chen, C. Wassgren, R. Ambrose // Biosystems Engineering. - 2022. - Vol. 224. - P. 16–33.- DOI:10.1016/j.biosystemseng.2022.09.012.
13. Chen Z. Validation of a DEM Model for predicting grain damage in an industrial-scale handling system / Z. Chen // Smart Agricultural Technology. - 2023. - №5. - P. 100274 100289.- <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100274> (date of access: 07.10.2025). — Title from screen.
14. Arunyanart P, Kongkaew N, Sudsawat S. Optimizing Bucket Elevator Performance through a Blend of Discrete Element Method, Response Surface Methodology, and Firefly Algorithm Approaches / P. Arunyanart, N. Kongkaew, S. Sudsawat // Comput Mater Contin. - 2024. - №80(2). - P. 3379–3403.- <https://doi.org/10.32604/cmc.2024.054337> (date of access: 10.10.2025). — Title from screen.
15. Дерев'яно Д. Вплив транспортувальних технічних засобів на травмування і якість насіння зернових культур / Д. Дерев'яно // Scientific Horizons. - 2020. - №89(4). - С. 47–54. - Doi:10.33249/2663-2144-2020-89-4-47-54.
16. GuiXiang C. Factors, Harms, and Control of Corn Kernel Breakage: A Review / C. GuiXiang // Annals of Food Processing and Preservation. - 2023. - №7(1). - P. 1–13. - DOI:10.47739/2573-1033.foodprocessing.1038.
17. Wang Y. Numerical simulation and experimental verification of the steady-state heat transfer similarity theory based on dimensional analysis / Y. Wang // Case Studies in Thermal Engineering. - 2024. - №60. - P. 104714-104729. - DOI:10.1016/j.csite.2024.104714.
18. Мірських Р. Впровадження травмоощадних технологічних ліній для транспортування зернових культур / Р. Мірських // Grain Products and Mixed Fodder's. - 2024. – Том 25, №2.- С. 33–39. - DOI:10.15673/gpmf.v25i2.3126.

## References

1. Mesterházy A, Olah J, Popp J. Losses in the Grain Supply Chain: Causes and Solutions / A Mesterhazy, J. Olah, J. Popp // Sustainability. – 2020. – Vol. 12(6). – P. 2342-2361. — Mode of access: [Doi.org/10.3390/su12062342](https://doi.org/10.3390/su12062342) (date of access: 08.10.2025). — Title from screen.
2. GuiXiang C. Factors, Harms, and Control of Corn Kernel Breakage: A Review / C. GuiXiang, Y. YaHao, L. ChaoSai, L. WenLei, L. JingRan // Ann Food Process Preserv. - 2023. - №7(1). - P.1038-1057. [Doi.org/10.47739/2573-1033.foodprocessing.1038](https://doi.org/10.47739/2573-1033.foodprocessing.1038) (date of access: 07.10.2025). — Title from screen.
3. Heruk S. The effect of grain size on strength and quality oof the seed / S. Heruk, S. Pustovit // Scientific journal of the Ternopil national technical university. - 2023. - Vol. 110, no. 2. P. 40–45. DOI:10.33108/visnyk\_tntu2023.02.040
4. Kruszelnicka W. Study of Selected Physical-Mechanical Properties of Corn Grains Important from the Point of View of Mechanical Processing Systems Designing / W. Kruszelnicka // Materials. - 2021. - №14 (6). - P. 1467-1476. DOI:10.3390/ma14061467
5. Zhengpu Chen. A Review of Grain Kernel Damage: Mechanisms, Modeling, and Testing Procedures / Zhengpu Chen, Carl Wassgren, Kingsly Ambrose // Transactions of the ASABE. - 2020.- №63(2). - P. 455-475. - Doi.org/10.13031/trans.13643
6. Rogatynskiy R. Model of flow transportation of bulk cargo by vertical screw conveyors / R. Rogatynskiy // Scientific journal of the Ternopil national technical university. - 2023. - Vol. 111, no. 3. - P. 5–14. - DOI:10.33108/visnyk\_tntu2023.03.005
7. Karp I. The process of moving grain material in the pneumatic line of a pneumatic screw conveyor / I. Karp // Scientific journal of the Ternopil national technical university. - 2025. - Vol. 118, no. 2. P. 79–90. - DOI:10.33108/visnyk\_tntu2025.02.079.
8. Romaniuk W. The Application of Similarity Theory and Dimensional Analysis to the Study of Centrifugal-Rotary / W. Romaniuk // Energies. - 2021. - Vol. 14 (15). - P. 4501-4517. - DOI:10.3390/en14154501.
9. Looh G. A. Grain kernel damage during threshing: a comprehensive review of theories and models. / G. A. Looh // Journal of Agricultural Engineering. - 2025. - Vol. 56(1). – P. 25-41. - DOI:10.4081/jae.2025.1674.
10. Dudin V. Investigation of the Corn Kernel Destruction Process Using Digital Models / V. Dudin // Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. - 2024. - № 2, 10(41). - P. 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)
11. Aliiev E. Numerical simulation of agricultural production processes: textbook / E. Aliiev - Kyiv: Agrarna nauka, 2023. - 340 p. DOI:10.31073/978-966-540-584-9.
12. Chen Z., Wassgren C., Ambrose R. Development and validation of a DEM model for predicting impact damage of maize kernels / Z. Chen, C. Wassgren, R. Ambrose // Biosystems Engineering. - 2022. - Vol. 224. - P. 16–33.- DOI:10.1016/j.biosystemseng.2022.09.012.
13. Chen Z. Validation of a DEM Model for predicting grain damage in an industrial-scale handling system / Z. Chen // Smart Agricultural Technology. - 2023. - №5. - P. 100274 100289.- <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100274> (date of access: 07.10.2025). — Title from screen.
14. Arunyanart P, Kongkaew N, Sudsawat S. Optimizing Bucket Elevator Performance through a Blend of Discrete Element Method, Response Surface Methodology, and Firefly Algorithm Approaches / P. Arunyanart, N. Kongkaew, S. Sudsawat // Comput Mater Contin. - 2024. - №80(2). - P. 3379–3403.- <https://doi.org/10.32604/cmcc.2024.054337> (date of access: 10.10.2025). — Title from screen.
15. Derevianko D. THE IMPACT OF TRANSPORTING TECHNICAL MEANS ON GRAIN CROPS DAMAGING AND QUALITY / D. Derevianko // Scientific Horizons. - 2020. - №89(4). - P. 47–54. - Doi:10.33249/2663-2144-2020-89-4-47-54.
16. GuiXiang C. Factors, Harms, and Control of Corn Kernel Breakage: A Review / C. GuiXiang // Annals of Food Processing and Preservation. - 2023. - №7(1). - P. 1–13. - DOI:10.47739/2573-1033.foodprocessing.1038.
17. Wang Y. Numerical simulation and experimental verification of the steady-state heat transfer similarity theory based on dimensional analysis / Y. Wang // Case Studies in Thermal Engineering. - 2024. - №60. - P. 104714-104729. - DOI:10.1016/j.csite.2024.104714.
18. Mirskykh R. IMPLEMENTATION OF TRAUMA-PROTECTING TECHNOLOGICAL LINES FOR TRANSPORTATION OF GRAIN CROPS / R. Mirskykh // Grain Products and Mixed Fodder's. - 2024. - №25, no. 2.- P. 33–39. - DOI:10.15673/gpmf.v25i2.3126.