

Мірських Р.В.
аспірант

**Одеський національний
технологічний
університет**

Mirskykh R.
postgraduate student

**Odesa National University
of Technology**

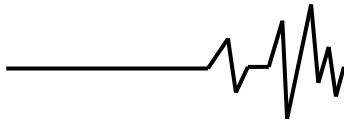
УДК 631.565[633.1:005.931.13] 515.127.1
DOI: 10.37128/2306-8744-2025-4-15

КРИТЕРІАЛЬНА ОЦІНКА ТРАВМООЩАДНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТРАНСПОРТУВАННЯ ЗЕРНА НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ РОЗМІРНОСТЕЙ ТА АНАЛІЗУ ЧАСТИННИХ ПОХІДНИХ

Процес транспортування зернових культур у сучасних технологічних лініях супроводжується інтенсивним механічним впливом, що призводить до значного травмування насіннєвого матеріалу. Складність явища полягає у синергетичній взаємодії біологічних властивостей об'єкта та технічних характеристик обладнання. Проблема мінімізації втрат якості потребує переходу від емпіричних спостережень до математичних моделей, що враховують як технічні параметри обладнання, так і біологічну природу об'єкта дослідження. В статті розглянуто математичну модель процесу пошкодження зерна та визначено безрозмірні критерії подібності на основі теорії розмірностей та π -теореми (Федермана–Букінгема). Процес травмування описано через функціональну залежність сумарної довжини тріщин та зламів L від трьох груп факторів: фізико-механічних властивостей зерна F_m та біологічних характеристик B_m та параметрів зовнішнього впливу E_i . Застосування запропонованого підходу дозволяє оптимізувати параметри транспортно-технологічного обладнання, забезпечуючи збереження енергії проростання та зниження пошкодження зерна, що є критично важливим для підвищення конкурентоспроможності аграрного сектору в умовах сучасних економічних викликів. На основі аналізу розмірностей виведено шість незалежних безрозмірних комплексів, що описують енергетичну та кінематичну взаємодію в системі «зерно–робочий орган–поверхня». Ключовими визначено критерії: густина оболонки зернівки, динамічне навантаження, що діє на зерно та ефект «інверсії твердості» – твердість поверхні дотику зернівки, через що енергія удару демпфується поверхнею робочого органу чи обладнання. За рахунок виключення малозначущих чинників підвищено придатність моделі для практичних інженерних розрахунків. Окреслено перспективи подальших досліджень, спрямованих на розробку математичних моделей руху зерна у технологічних системах та проведення практичного експерименту з метою визначення впливу зазначених параметрів на травмування зерна.

Ключові слова: механічне травмування зерна, травмоощадна технологія, теорія розмірностей, диференціальне моделювання.

Постановка проблеми. Аграрне господарство робить великий вклад у валовий внутрішній продукт України і в даний час формує близько 7% ВВП України, при цьому агросектор забезпечує майже 60% усього експорту країни [1].



Крім цього, аграрний сектор України у довоєнний час стикався з низкою викликів, серед яких деградація земельних ресурсів, недостатній рівень технологічного оновлення, вплив кліматичних змін та нестабільність державної підтримки. Під час війни до цих чинників додалися руйнування інфраструктури (прямі втрати АПК на початок 2025 року оцінюються у понад \$11 млрд.), обмеження можливості експорту та зберігання врожаю та зменшення площ, що оброблюються через мінування земель. Тому збільшення об'ємів вирощення зерна є актуальним для країни питанням. Одним з ведучих критеріїв, які впливають на підвищення виробництва зерна і врожайності є зменшення втрат на всіх стадіях його виробництва. Травмування та пошкодження зерна при його післязбиральній доробці та під час багаторазових механічних впливів на нього є однією з головних причин погіршення якості та подальшого зниження рівня схожості та сили росту насіннєвого матеріалу. Механічне пошкодження спричиняє фізичні та фізіологічні перетворення, погіршується його зберігання. У тріщини, розломи та мікротріщини проникає волога та повітря, що погано впливає на терміни зберігання зерна. При складуванні такого зерна посилюється сегрегація, що є важливим для безпечності продукту. Вона з'являється при гравітаційному завантаженні ємності компактным потоком. Зерно активно дихає, підвищується його температура, поширюються грибкові захворювання, мікроорганізми. В деякі роки пошкодження зерна при сукупній наявності погодних, кліматичних, механіко-технологічних, біологічних, ґрунтових та сортових особливостей може досягати 55-65 % від всього об'єму продукції [2; 3; 4].

У сучасному світі проходить інтенсивне технічне підвищення розвитку рівня машин та технологічного обладнання, яке застосовують у післязбиральній доробці зерна. Виникають нові матеріали та технологічні рішення щодо виготовлення обладнання, його елементів чи його робочого органу. Інновації використовуються і для виробництва нового технологічного обладнання, і для модернізації існуючого. Вживають нові матеріали, а якісні матеріали для виготовлення робочих органів стають більш доступними. Саме тому зменшення пошкодження зернового матеріалу при післязбиральній доробці у наш час є актуальною задачею для наукового, машинобудівного, сільськогосподарського та економічного секторів. Але водночас, зниженню механічних пошкоджень зерна на виробництвах приділяють доволі мало уваги, що показує практика. І хоча зниження силової взаємодії зернівки та робочого органу обладнання є одним із показників високого технологічного рівня виробника, більшість уваги все ж направлена на підвищення рівня механізації, збільшення

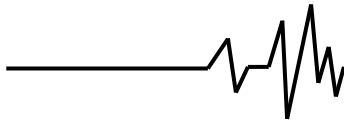
продуктивності роботи обладнання, підвищення надійності роботи обладнання та зниження експлуатаційних витрат. Результативність застосування існуючих засобів, які інспірують пошкодження зерна залишається дуже низькою. Під час доробки зерно піддається складним навантаженням, що складаються з різних комбінацій ударів, стиснення і зсуву. Відповідно досліджень, робочими органами транспортного обладнання і зерноочисної техніки травмується до 52 % зерна [4].

Саме тому застосування травмоощадних технологій дозволить збільшити частку повноцінного та нетравмованого зерна при післязбиральній доробці а також підвищити термін експлуатації робочих органів технологічного обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Здійснюються дослідження залежностей пошкодження насіння на багатьох етапах післязбиральної роботи із зерном. У роботах [5, 6, 7, 8, 9, 10] розглядають різні етапи роботи з зерновим матеріалом. При цьому проявляється причини і критерії, які впливають на пошкодження і якість насіння при його збиранні, доробці і зберіганні на елеваторах та проведенні передпосівних і посівних робіт. Покращення технологічних процесів у виробничих умовах виконується через поліпшення методів очистки, сушки і зберігання завдяки повній чи частковій автоматизації процесів або використовуючи додаткові елементи обладнання. Це можуть бути додаткові елементи, які спостерігають за чинниками впливу на продукцію під час доробки або параметрами заданого процесу, що інформують оператора і знижують ймовірність помилки. Монтуються частотно-регульовані приводи робочих органів, датчики, програмовані логічні контролери та спеціалізоване програмне забезпечення для виконання типових завдань управління виконавчими блоками [11, 12].

У дослідженнях [7, 13, 14, 15, 16.] досліджено геометричні показники та матеріал виготовлення ковша норії, їх вплив на параметри в процесі роботи. Проаналізовано процес роботи норії, позначено впливові динамічні навантаження та досліджено напружено-деформовані стани стрічкової норії. Вивчено динамічні властивості структури обладнання при коливальному збудженні. Проведено аналіз вивантаження матеріалу при різних режимах швидкості руху норії методом дискретного аналізу, розглянуто методи проектування та механіку роботи норії та ковшів, зв'язок геометрії ковша та напружень і прогинів, що виникають у процесах. Вказано доцільні форм ковшів залежно від матеріалів, які переміщують, а також раціональні швидкості для стрічки норії.

Вчені [2; 3] розглядають проектування і дослідження гвинтових конвеєрів з еластичними



поверхнями, розроблять методику експериментальних досліджень процесу травмування сипкого матеріалу під час його транспортування лопатевим робочим органом конвеєра. Встановлено, що основним фактором, що призводить до збільшення травмування зерна є частота обертання робочого органу.

Дослідження багатьох вчених підтверджують залежність фізико-механічних властивостей зерна від біологічних та якісних характеристик. Значна кількість цих характеристик і властивостей залежить від вологості початкового продукту [13, 17]. Так, у праці [4] встановлено залежність коефіцієнта травмування зерна від кута удару зернівки пшениці по поверхні, швидкості удару (аналога коефіцієнта миттєвого тертя) та матеріалу. Експериментально було визначено оптимальну вологість пшениці на рівні 12,7-15,3 %. Кількість пошкодженого зерна збільшувалася як при зменшенні відсотку вологи, так і при збільшенні її від оптимальної. Це пов'язано насамперед із порушеннями у внутрішній крохмалє-білковій мережевій системі через збільшення або зменшення вмісту вологи. Водопоглинаюча здатність у білку сильніша, ніж у крохмалю. Тому при відхиленнях від оптимальних значень крохмалє-білкова мережева система стає неправильною, що і послаблює механічні властивості зернівки [17].

Отже, як видно, проблема травмування зерна широко висвітлена у працях вітчизняних і світових дослідників. У той же час, велика частина досліджень мають емпіричний характер і обмежені конкретними умовами експерименту. Відсутність універсального підходу ускладнює перенесення отриманих результатів на інші типи обладнання. Це обумовлює необхідність застосування методів узагальнення, зокрема теорії розмірностей, яка дозволяє описати процес травмування через систему безрозмірних критеріїв.

Мета і завдання роботи. Метою роботи є об'єктивне обґрунтування впровадження травмоощадних технологій транспортування зерна шляхом зниження втрат на основі застосування теорії розмірностей. Проведення комплексного аналізу роботи пересічної транспортно-технологічної лінії для роботи з зерном, визначення її травмонебезпечних ділянок і елементів, які співдіють із зерном. Визначення факторів, що впливають на пошкодження зерна у цих зонах.

Матеріали і методи досліджень.

Методами дослідження, що застосовувалися у роботі, є аналітичні дослідження з використанням методів механіки

суцільних середовищ, законів фізики та теоретичної механіки. Матеріалом дослідження є зернова маса, що рухається технологічною лінією транспортування під час однієї з основних дій – переміщення (транспортування). При цьому відбувається зміна швидкості та вектору руху зернівки, з'являються нові динамічні навантаження, які підвищують ймовірність деградації продукту. Таким чином, застосування комплексу матеріалів і методів досліджень забезпечує об'єктивну оцінку ефективності роботи лінії транспортування зерна та дозволяє обґрунтувати напрями її вдосконалення.

Результати та їхнє обговорення. На пошкодження зерна впливає багато факторів. Першочергово це особливості виду й сорту, продовжуючи внесенням мінеральних добрив під час вирощування і закінчуючи якістю отриманого зерна та його фізіологічними властивостями. При цьому найвищу вагу ударно-циклічного впливу маємо від засобів для переміщення і доробки зерна: очистка і протрусення. В роботі відбувається зштовхування насінин між собою та його тертя об поверхню робочого органу. Внаслідок такої ударної взаємодії може підсилюватися при наявності у потоці зерна важких абразивних часинок, що мають більшу твердість, ніж у зернівки. Це можуть бути насіння бур'янів, дрібні камінці, підібрані комбайном при обмолоті. Значна кількість технологічних процесів відбувається за умови швидкісного гравітаційного руху матеріалу. Умовами швидкого руху зернового потоку є наявність лінійних та кутових швидкостей у зернівок та їх хаотичне переміщення в зерновому шарі потоку. Внаслідок таких швидких гравітаційних потоків окремі зернини взаємодіють одна з одною та з'являються такі технологічні ефекти як змішування чи розділення [18].

За результатами дослідження встановлено критерії, що впливають на пошкодження зерна. Вони розділені на кілька видів, які показано на рис. 1. В дослідженнях ці параметри можна використовувати для порівняння однотипових процесів транспортування насіння, а також і окремих вузлів та елементів системи.

До фізико-механічних параметрів F_m відносимо наступні чинники. Модуль Юнга E (модуль пружності, модуль поздовжньої еластичності) показує спроможність зернівки до еластичного видовження внаслідок сил розтягу або стиснення. Фактично, це показник напруженості зернини, що викликається зовнішньо прикладеними силами по відношенню до площі контакту цієї сили.

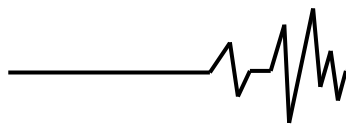
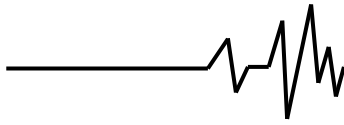


Рис. 1 - Структурна модель параметрів, які визначають пошкодження зерна

Цей показник відображає вплив внутрішніх сил зв'язку в зернівці при взаємодії із зовнішніми силами. Якщо E буде більшим за F , то об'єкт відновлюється до стану перед прикладанням сили. При цьому молекулярні зв'язки відновлюються і архітектура зернівки відновлюється. У випадку, коли E буде меншим за F , молекулярні зв'язки рвуться і починається незворотне руйнування тіла. Зрілість зерна впливає на його густину ρ , жорсткість оболонки k , модуль Юнга E , коефіцієнт Пуассона $\mu_{пов}$, твердість μ та відносне видовження δ . Фізико-механічні критерії показують можливість зернівки протистояти механічному навантаженню і її здатність гнучкого деформування під час впливу механічного навантаження. В залежності від параметрів впливу на насіння її розмір і форма може змінюватися. Під час дії параметрів зовнішньої сили ми отримуємо деформації, як пружні, так і пластичні, тобто зворотні чи незворотні. При перевищенні цієї деформації в зернівці внаслідок впливу визначених критеріїв ми отримуємо її руйнування. Тріщина виникає при перевищенні межі, що називається межею міцності. Значення шорсткості поверхні зерна

на його травмування є досить мало вивченим, але надзвичайно важливих критеріїв у механіці взаємодії зернової маси з робочими органами обладнання. Шорсткість R_z (мікрорельєф поверхні) безпосередньо впливає на коефіцієнт тертя та розсіювання енергії удару. Шорсткість поверхні зернівки визначає характер контакту з поверхнею обладнання, у тому числі коефіцієнт зовнішнього тертя. Чим вища шорсткість, тим більшою є тангенціальна складова сили взаємодії. Це призводить до виникнення напружень зсуву в поверхневих шарах зерна, що спричиняє стирання оболонки та мікротріщини. При зіткненні більш шорсткого зерна з поверхнею незначна частка кінетичної енергії трансформується у теплову енергію тертя та енергію обертання зернівки. Це може як зменшити прямий нормальний удар, так і посилити поверхневе руйнування зернівки. Густина залежить від хімічного складу зернівки та пропорцій органічних компонентів. До зерна необхідно ставитись як до композитного матеріалу, який складається з шарів з різними характеристиками міцності. Так, оболонка і ендосперм відповідають за різні механічні властивості [18, 19, 20]. Збільшення товщини



оболонки викликає збільшення деформації зерна, що підвищує ймовірність утворення і розвитку тріщини. Це, викликає зменшення твердості зернівки μ . Ендосперм по своїй суті є сумішшю білкових та крохмальних клітин. Збільшення частки ендосперму підвищує міцність і твердість зерна, на що впливає компактна структура частинок крохмалю, які утворюють склоподібний ендосперм. Масова частка білку в ендоспермі також впливає на твердість зернівки. Чим більша кількість клітин білку, тим вища твердість зернівки. При цьому між внутрішньою структурою зерна та його механічними властивостями існує взаємний зв'язок [16].

До параметрів зовнішнього впливу E_i відносимо наступні чинники. Температура зерна, яка має вплив на властивості зберігання, у тому числі і на фізичні та механічні властивості зернівки. Як відомо, із зменшенням температури збільшується крихкість зернівки. Тип контактної поверхні та її твердість є важливим критерієм, що впливає на ступінь пошкодження. Дослідження цього критерію пов'язане, в першу чергу, з вивченням концентрації та величини напруження, яке виникає на межі розподілу поверхня-зернівка. Логічно, що величина пошкодження зернівки пропорційна силі, яку прикладено до неї. Цю силу можна виразити через тиск, що чиниться на зернівку і виписати у формулу:

$$F = P * S,$$

де F – сила, яку прикладено до зерна; P – тиск, що чиниться на зернівку; S – площа контакту між поверхнею та зернівкою.

Якщо вважати тиск P як силу, що впливає на площу, маємо результат, що можна записати формулою:

$$P = \frac{F}{S}.$$

Припускаючи, що тиск $P \propto$ травмуванню, ми можемо зробити висновок, що контактна поверхня впливає на травмування через величину контакту: чим вона більша, тим пошкодження будуть менші.

І третім параметром, що впливає на ступінь травмування, будуть біологічні, анатомічні та морфологічні властивості зерна. Розмір, форма, вага та геометрія має значний вплив на ступінь пошкодження зернівки. Інформація про техніко-технологічні властивості зернівки є беззаперечною вимогою при проектуванні, конструюванні робочих органів, компонуванні технологічних ліній на виробничих процесах при післязбиральному обробленні зерна, підготовці насінневого матеріалу. Розміри зернини визначаються лінійними параметрами – довжиною, шириною і товщиною, які під впливом багатьох об'єктивних та суб'єктивних чинників змінюються у великих межах ще під час росту. Вологість має досить значний вплив на пошкодження зерна. Властивості зернівки істотно змінюються залежно від вмісту вологи, що

безпосередньо позначається на її стійкості до механічних впливів. За низької вологості зерно стає більш твердим і крихким. Зменшення вмісту вологи призводить до зниження еластичності оболонки зернівки та підвищення її схильності до розтріскування під дією ударних і стискальних навантажень. У таких умовах зростає частка мікропошкоджень ендосперму та зародка, які часто є непомітними зовні, але мають негативний вплив. За підвищеної вологості зерно, навпаки, набуває більшої пластичності, що знижує ймовірність механічного руйнування оболонки при транспортуванні чи переміщенні. Однак надмірна вологість може спричинити інші види пошкоджень, зокрема деформацію, роздавлювання та налипання зернової маси на робочі органи машин. Крім того, вологе зерно має більшу масу та коефіцієнт тертя, що підвищує навантаження на транспортне обладнання і може опосередковано збільшувати інтенсивність механічного впливу.

Розуміння механізмів пошкодження зерна має вирішальне значення для проектування та оптимізації процесів доробки зерна з метою мінімізації втрат якості. Після проведення комплексного аналізу пересічної транспортно-технологічної лінії встановлено неузгодженість руху зернового матеріалу та робочого органу, виявлено травмонебезпечні вузли та елементи робочих органів обладнання, що взаємодіє з зернівкою.

1. Це вузол самоплив- норія. А саме – місце входження зерна в башмак норії.

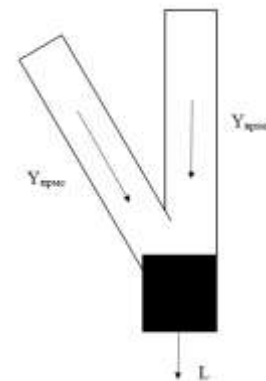
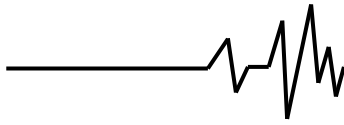


Рис. 2. Параметрична модель роботи системи самоплив- норія

У цьому випадку травмування відбувається за рахунок отриманого зерном імпульсу від різниці векторів кінетичної енергії зерна, яке входить в норію, та ковшів норії, які при проходженні через барабан зіштовхуються з зерном. Параметричну модель роботи даної системи показано на рис. 2.

$Y_{прмс}$ – умови похилого руху зернового матеріалу в самопливі. Сюди входять фізичні і геометричні параметри самопливу: довжина, переріз, кут нахилу, вид матеріалу та футерування (критерій зовнішнього впливу),



фізико- механічні властивості зерна, біологічні, анатомічні, морфологічні властивості зерна.

$Y_{\text{врмс}}$ - умови вертикального руху зернового матеріалу. Сюди входять геометричні параметри ковшів та башмака норії, швидкість руху норійної стрічки, фізико- механічні та біологічні, анатомічні і морфологічні властивості зернових матеріалів.

2. Це вузол самоплив - ланцюговий транспортер. А саме – місце входження зерна з самопливу у конвеєр.

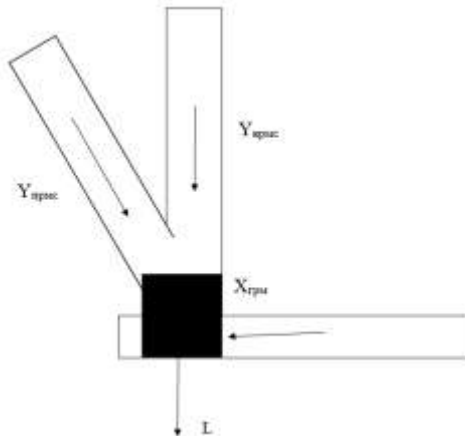


Рис. 3. Параметрична модель роботи системи самоплив- ланцюговий транспортер

Ланцюговий транспортер з точки зору технічних, технологічних параметрів та надійності є найбільш оптимальним і розповсюдженим для елеваторної промисловості. У цьому випадку травмування зерна відбувається за рахунок отриманого ним імпульсу від різниці векторів кінетичної енергії зерна, яке входить у транспортер, та його робочих органів, які зіштовхуються з зерном. Параметричну модель роботи даної системи показано на рис. 3.

$Y_{\text{врмс}}$ - умови вертикального руху зернового матеріалу в самопливі. $Y_{\text{врмс}} = Y_{\text{гpm}} \cdot \cos \alpha$

$X_{\text{гpm}}$ - умови горизонтального руху зернового матеріалу. Сюди входять геометричні параметри робочих органів, швидкість руху робочого органу, матеріал, з якого вони зроблені, наявність безпосереднього контакту робочого органу з коробом транспортера (критерії зовнішнього впливу), фізичні, механічні та біологічні, анатомічні і морфологічні властивості зернових матеріалів.

Ці параметричні моделі можна відтворювати і на інших типових вузлах: самоплив- бункер, самоплив-силос, самоплив-стрічковий транспортер тощо.

Процес функціонування таких систем в усіх випадках характеризується впливом на травмування зерна L такими функціоналами, як $X_{\text{гpm}}$ – умови горизонтального руху зернового матеріалу та $Y_{\text{врмс}}$ – умови вертикального руху

зернового матеріалу. При цьому і $X_{\text{гpm}}$ і $Y_{\text{врмс}}$ можуть бути як прямими, так і похилими.

Травмування зерна є доволі складним явищем, яке пов'язано з великою кількістю процесів. Так, як цей процес корелює з розмірами тріщинами і розломами, для характеристики цього процесу встановимо розмірність L . Відповідно критеріїв, що вказані на рис. 1, встановимо залежність:

$$L = f(F_m) + f(E_i) + f(B_{am}) . \quad (1)$$

Використаємо теорію розмірностей для опису процесу пошкодження зерна. Прикладення методів цієї теореми [21] полягає в тому, що вирішення систем диференціальних рівнянь можемо визначити у вигляді функції між критеріями подібності даної системи. Провівши аналіз теоретичних досліджень та порівнявши його з експериментальними дослідженнями, можна зробити висновки, що формулювання критеріїв процесу є основним при застосуванні теорії розмірностей. Співзалежність між змінними F_m , E_i і B_{am} , що охарактеризують процес, з a_i основними одиницями виміру, можна показати як залежність безрозмірних комплексів (тобто критеріїв подібності), які включають ці змінні. І ці критерії будуть знаходитися у визначеній залежності. З метою визначення потрібної кількості факторів впливу частіше всього користуються методом зменшення кількості факторів через виключення менш важливих. Через це параметри, що недостатньо впливові за своїми функціональними характеристиками, до уваги не беруться. Не бралися до уваги когезія зернівок, коефіцієнт тертя зерна об стінки обладнання, кути внутрішнього тертя зернівок одна об одну. Залежність кожного з критеріїв можна записати наступними закономірностями:

$$F_m = f(E, p, f, k, R_z), \quad (2)$$

$$E_i = f(S, F, \mu_{\text{пов}}), \quad (3)$$

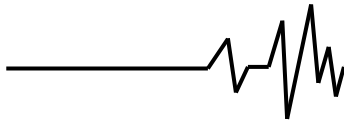
$$B_{am} = f(R, M, W). \quad (4)$$

У вигляді критеріального рівняння запишемо:

$$f(E, p, f, k, R_z, S, F, \mu_{\text{пов}}, R, M, W) = L . \quad (5)$$

Обов'язково потрібно звернути увагу: щоб визначена модель достовірно відображала головні характеристики залежності процесу, який ми досліджуємо, кожен показник повинен відображати диференціацію, різнобічність та гнучкість по відношенню до впливу на L .

За допомогою теорії розмірностей спрощується і полегшується зручна і доцільна форма обробки інформації, при цьому існує зв'язок між цілими комплексами величин. З метою спрощення завдання використаємо теорію розмірності, а саме π -теорему. Її сутність полягає в тому, що вся сукупність факторів може бути згрупована в безрозмірні критерії подібності π_1 ,



π_2 , і т.д. Сенс π -критеріїв полягає в тому, 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 знаходження цих величин необхідно вибрати ідентичні одиниці

вимірювання. Після цього через них ми виразимо розмірність всіх інших величин.

$$[H / m^2] [kg / m^3] [kg \cdot m / c^2] [m] [m^2] [kg \cdot m / c^2] [kg / mm^2] [kg] = [m]$$

У нашому випадку $n = 11$ величин отримаємо $n - r = 8$ критеріїв подібності. Визначені розмірності, які вказано на рис. 1, ми приймаємо 3 основних з них: довжина L , м; час T , сек. та масу M , кг. Розмірності всіх факторів приводимо в табл. 1.

Таблиця 1. Розмірність критеріїв, при роботі транспортної системи.

Параметри	E	ρ	f	k	R_z	S	F	$\mu_{пов}$	R	M	W
M	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0
L	-1	-3	0	1	1	2	1	-2	1	0	0
T	0	0	0	-2	0	0	-2	0	0	0	0

Відповідно π -теореми, перетворимо систему на набір безрозмірних комплексів. Кожен π -критерій було отримано шляхом розв'язання системи лінійних рівнянь, щоб сумарний показник ступеня при M , L і T дорівнював нулю.

Критерій π_1 . Цей критерій отримано шляхом порівняння динамічної сили впливу F та сили пружного опору зернівки, яка визначається як $E \cdot R^2$:

$$F [MLT^{-2}] / (E [L^{-1}MT^{-2}] \cdot R^2 [L^2]) = [MLT^{-2}] / [MLT^{-2}] = [1]$$

$$\pi_1 = \frac{F}{E \cdot R^2}$$

Цей критерій визначає, чи перевищує енергія удару межу пружної деформації зерна. Назвемо його критерієм силової деформації.

Аналогічним чином визначаємо і інші критерії.

Критерій π_2 . Критерій динамічної жорсткості системи.

$$\pi_2 = \frac{k}{F}$$

Відображає здатність оболонки зерна витримувати динамічне навантаження без розламування.

Критерій π_3 . Критерій відносної твердості (контактний критерій).

$$\pi_3 = \frac{\mu}{\mu_{пов}}$$

Визначає результат взаємодії в точці контакту. Якщо $\pi_3 > 1$ - пошкоджується поверхня обладнання; якщо $\pi_3 < 1$, то основна деформація та руйнування припадають на зернівку.

Критерій π_4 - геометричний критерій контакту.

$$\pi_4 = \frac{S}{R^2}$$

Характеризує концентрацію напружень. Збільшення цього критерію (наприклад, через еластичне покриття) знижує питомий тиск.

Критерій π_5 - критерій інерційності та часу.

$$\pi_5 = \frac{T \cdot \sqrt{F}}{\sqrt{M \cdot R}}$$

Пов'язує тривалість контакту з масою та прикладеною силою, визначаючи імпульс удару. Характеризує тривалість удару та інерційну відповідь зернівки.

Критерій π_6 - критерій мікрогеометрії.

$$\pi_6 = \frac{R_z}{R}$$

Співвідношення шорсткості поверхні обладнання до здатності оболонки до її геометрії. Визначає ймовірність виникнення поверхневих мікротріщин.

Таким чином, рівняння процесу травмування зерна у безрозмірному вигляді можна записати наступним чином:

$$L = f\left(\frac{F}{E \cdot R^2}, \frac{k}{F}, \frac{\mu}{\mu_{пов}}, \frac{S}{R^2}, \frac{T \cdot \sqrt{F}}{\sqrt{M \cdot R}}, \frac{R_z}{R}\right). \quad (6)$$

Для розуміння, як кожен із критеріїв впливає на розвиток тріщин L , необхідно провести диференціальний аналіз чутливості кожної функції. Зробимо це шляхом взяття частинних похідних від критеріального рівняння. Запишемо рівняння (6) у формі степеневої функції.

$$L = \pi_1^a \cdot \pi_2^b \cdot \pi_3^c \cdot \pi_4^d \cdot \pi_5^e \cdot \pi_6^g. \quad (7)$$

Критерій π_1 відповідає за силовий вплив.

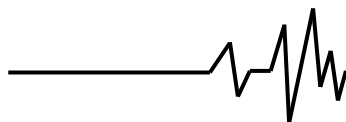
$$\frac{\partial L}{\partial \pi_1} = a \frac{L}{\pi_1}$$

Похідна показує інтенсивність приросту тріщин при збільшенні сили удару. Оскільки показник ступеня $a > 1$, то функція має параболічний характер. Це означає, що після досягнення критичної сили навіть незначне її зростання призводить до катастрофічного руйнування зернівки.

Критерій π_2 характеризує внутрішній опір.

$$\frac{\partial L}{\partial \pi_2} = b \frac{L}{\pi_2}$$

Оскільки жорсткість k стоїть у чисельнику,



а пошкодження L мають зменшуватися при його зростанні, показник b буде від'ємним ($b < 0$). Похідна від'ємна, що підтверджує: зміцнення структури оболонки (наприклад, через селекційні особливості сорту чи оптимальну вологість) та диференціально знижує швидкість поширення тріщин.

Критерій π_2 – критерій контактного руйнування.

$$\frac{\partial L}{\partial \pi_2} = c \frac{L}{\pi_2}$$

Цей критерій є ключовим показником взаємодії в точці дотику. Похідна c має від'ємне значення. Відповідно, при збільшенні π_2 (тобто коли зерно стає твердішим за поверхню), травмування L стрімко падає. Відповідно, коли $\mu_{\text{пов}}$ зменшується (застосування полімерів, гуми) – робочий орган починає демпфувати удар, приймаючи деформацію на себе.

Критерій π_4 – критерій концентрації навантаження.

$$\frac{\partial L}{\partial \pi_4} = d \frac{L}{\pi_4}$$

Цей геометричний критерій визначає, наскільки рівномірно розподіляється динамічна сила F по поверхні зернівки. Похідна d є від'ємною. Збільшення площі контакту S призводить до зменшення сили напружень. Відповідно, навіть при незмінній силі F , збільшення π_4 знижує питомий тиск.

Критерій π_5 – критерій кінетичного імпульсу.

$$\frac{\partial L}{\partial \pi_5} = e \frac{L}{\pi_5}$$

Цей комплекс пов'язує тривалість контакту T з інерційними властивостями зерна (M ,

R) та силою впливу F . Частинна похідна за часом впливу $\frac{\partial L}{\partial T}$ показує, що критичним є не лише значення сили, а й час її наростання. Критерій описує "м'якість" удару. При малих значеннях T (жорсткий удар) виникає «акустична» хвиля напружень, яка спричиняє крихке руйнування. При збільшенні T (плавна взаємодія) енергія встигає розподілитися по об'єму зернівки без розлому тканин.

Критерій π_6 пов'язує шорсткість поверхні з її геометрією і характеризує відносну мікрогеометрію контакту.

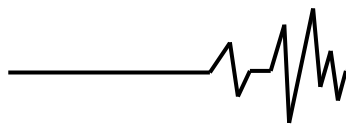
$$\frac{\partial L}{\partial \pi_6} = \frac{\partial L}{\partial S} = g \frac{L}{\pi_6}$$

Моделювання через диференціал площі контакту ∂S показує, що при високих значеннях π_6 (наприклад, дрібне зерно на грубій поверхні) контакт стає дискретним. Сила F передається не через всю площу S , а через вершини мікронерівностей. Це призводить до зростання локальних тисків у сотні разів. Тобто, для кожної культури є критичний поріг π_6^{crit} . Якщо $\pi_6^{\text{crit}} > \rho$, шорсткість робочого органу починає діяти як абразивний інструмент. Для великих зерен поверхня може бути гладкою, тоді як для дрібних – агресивно шорсткою.

На підставі вищезазначеного дослідження, ми маємо підсумкову, яка систематизує результати диференціального моделювання за всіма вашими критеріями. Вона демонструє, як зміна безрозмірних комплексів впливає на інтенсивність травмування зерна.

Таблиця 2. Матриця впливу критеріїв на показник травмування L

Критерій	Фізичний зміст	Градiєнт впливу	Наукова пояснення
$\pi_1 = \frac{F}{E * R^2}$	Динамічне навантаження	+ (Високий)	Визначено поріг переходу від пружної деформації до ініціації магістральних тріщин.
$\pi_2 = \frac{k}{F}$	Жорсткість оболонки	- (Помірний)	Визначено, що власна жорсткість зерна є демпфуючим фактором, що протидіє динамічній силі.
$\pi_3 = \frac{\mu}{\mu_{\text{пов}}}$	Контактна пара	+ (Високий)	Обґрунтовано ефект інверсії твердості: при $\pi_3 > 1$ руйнування зернівки мінімізується.
$\pi_4 = \frac{S}{R^2}$	Концентрація напружень	+ (Високий)	Встановлено зворотну залежність між площею контакту та розміром зернівки
$\pi_5 = \frac{T * \sqrt{F}}{\sqrt{M * R}}$	Кінетичні імпульси	+ / - (Складний)	Визначено часовий інтервал взаємодії, при якому імпульс удару розсіюється без руйнування тканин.
$\pi_6 = \frac{R_z}{R}$	Масштабний фактор	- (Помірний)	Позначено масштабний ефект: при $R \rightarrow \min$ шорсткість R_z діє як мікроабразив, що спричиняє травми оболонки

**Висновки.**

1. Після проведення аналізу цілісної роботи транспортно-технологічної системи руху зерна було визначено критичні травмонебезпечні ділянки по типових вузлах обладнання та параметри, які впливають на пошкодження зерна на цих ділянках.

2. На основі теорії розмірностей і подібностей було розроблено багатофакторну математичну модель травмування зерна, яка об'єднує 11 фізико-біологічних параметрів у систему з шести незалежних безрозмірних комплексів. Це дозволило встановити, що процес руйнування оболонки визначається не поодинокими чинниками, а комплексом енергетичних та геометричних залежностей у системі «зерно–контактна поверхня». Отримані безрозмірні комплекси дозволяють прогнозувати рівень пошкоджень для різних культур.

3. Встановлено, що твердість контактної поверхні обладнання ($\mu_{\text{пов}}$) відіграє домінуючу роль у трансформації енергії удару. Використання твердих поверхонь призводить до концентрації динамічної сили впливу F на зернівку у зоні контакту, що спричиняє розвиток напружень, які можуть перевищувати її межу міцності. Зниження твердості точок контакту дозволить перерозподілити навантаження та знизити рівень травмування.

4. Доведено, що густина оболонки ρ є ключовим індикатором механічної резистентності зерна. Розрахований безрозмірний комплекс π_2 показав, що збільшення густини оболонки підвищує опір мікротріщинам, проте за умов високої твердості поверхонь він корелює зі зростанням крихкості та схильності до макроруйнувань.

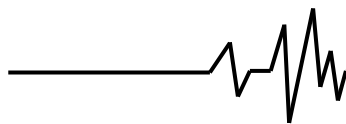
5. Розроблена модель дозволяє прогнозувати рівень травмування на стадії проектування транспортних систем. Результати можна застосувати для розробки нових технологій транспортування зерна та вдосконалення існуючих систем з урахуванням сучасних тенденцій автоматизації та енергоефективності. Отримані висновки сприятимуть покращенню якості насіннєвого матеріалу та підвищенню ефективності агропромислового комплексу. Впровадження запропонованих рішень сприятиме підвищенню конкурентоспроможності аграрного сектору. Це підкреслює важливість комплексного підходу до проектування транспортних систем, що поєднає технічні, економічні та технологічні аспекти.

Перспективи подальших досліджень. В подальшому буде проводитися вивчення та аналіз процесів, що відбуваються в гравітаційному та вільному русі сипкого матеріалу, що відбувається в критичних ділянках системи транспортування зерна. Буде

продовжено проведення математичного моделювання процесу зміни напрямку руху зерна у даних вузлах. Планується проведення практичного експерименту з метою визначення впливу зазначених параметрів на травмування зерна. Кінцевою метою аналізу є розробка методики оцінювання навантажень та пошук найбільш раціональних режимів роботи транспортного обладнання з метою синхронізації руху зернівки й робочих органів, зниження ймовірності нищівного зіткнення їх із зернівкою та зниження пошкодження насіння. Це є основою травмоощадного технологічного процесу.

Список використаних джерел

1. Агробізнес України 2024-2025. Інформаційний довідник. <https://agribusinessinukraine.com/the-infographics-report-ukrainian-agribusiness-2025/> (дата звернення: 04.01.2025).
2. Гевко Р.Б. та ін. Гвинтові конвеєри з еластичними поверхнями. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2024. 239 с.
3. Mesterházy Á., Oláh J., Popp J. Losses in the Grain Supply Chain: Causes and Solutions. *Sustainability*. Вип. 12, № 6. С. 2342. DOI:10.3390/su12062342.
4. Степаненко С. П. та ін. Дослідження впливу параметрів та режимів роботи обладнання на ступінь пошкодження зерна в технологічних лініях для його очищення. *Механіко-технологічні процеси, робочі органи та машини в АГВ*. 2023. № 2 (116). С. 88-99.
5. Weronika Kruszelnicka, et al. Breakage behavior of corn kernels subjected to repeated loadings. *Powder Technology*. 2024. V. 435. P. 25-36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119372>
6. Zhengpu Chen, Carl Wassgren, Kingsly Ambrose. A Review of Grain Kernel Damage: Mechanisms, Modeling, and Testing Procedures. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2020. V. 63(2). P. 455-475. DOI:10.13031/trans.13643
7. Дерев'янка Д. А. та ін. Вплив транспортувальних технічних засобів на травмування і якість насіння зернових культур. *Наукові горизонти*. 2020. № 04 (89). С. 47–54. doi: 10.33249/2663-2144-2020-89-4-47-54.
8. GuiXiang C, et al. Factors, Harms, and Control of Corn Kernel Breakage: A Review. *Annals of Food Processing and Preservation* 2023. 7(1): 1038. <https://doi.org/10.47739/2573-1033.foodprocessing.1038>
9. Kubik L., Bozikova M., Kazimsrova V. Mechanical Properties of Wheat Grains at Compression. *Acta Technologica Agriculturae*. 2021. V. 24. DOI: <https://doi.org/10.2478/ata-2021-0033>



10. Łukasz Gierz et al. Effects of Thickness of the Corn Seed Coat on the Strength of Processed Biological Materials. *Materials*. 2025. V.18(2):222. DOI:10.3390/ma18020222

11. Бурдільна Є. та ін. Оптимізація процесу керування перевантаження зернових продуктів у функції енергоресурсозбереження. *Електромеханічні системи, методи оптимізації та моделювання*. 2023. N4(63). С. 8-18. DOI <https://doi.org/10.32782/2072-2052.2023.4.63.1>

12. Тимчук С. О., Кунденко П. М., Мардзявко В. А. Аналіз автоматизованих систем керування обладнанням для транспортування зернової продукції на елеваторах. *Енергетика і автоматика*. 2021. № 6. DOI:10.37700/enm.2020.4(18).35-41

13. Chaudhary H. et al. Optimisation of rectangular bucket elevator system by analysis bucket and shafts. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2021. Vol. 8, no. 5. P. 4360–4363.

14. Masnaji Rajaram Nukulwar. Material optimization and Modal Analysis of Elevator bucket. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 2016. 6(2):574.

15. Arunyanart P, Kongkaew N, Sudsawat S. Optimizing Bucket Elevator Performance through a Blend of Discrete Element Method, Response Surface Methodology, and Firefly Algorithm Approaches. *Computers, Materials & Continua*. 2024. № 80(2). P. 3379-3403. DOI: 10.32604/cmc.2024.054337

16. Boslovyyak P. V., Shagimardanov V. R. Calculation and comparative analysis of bucket of the belt elevator. *Conference Series Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1129. P. 012069. doi:10.1088/1757-899x/1129/1/012069.

17. Gang Wang, et al. Reducing Grain Damage in Moist Corn Threshing via Corn cob Division. *Agriculture*. 2024. V.14(9). P. 1648. doi.org/10.3390/ agriculture14091648

18. Peng Gao et al. Determination Methods and Influencing Factors of Grain Mechanical Properties. *Journal of Food Quality*. 2024. P. 1-12. <https://doi.org/10.1155/2024/3407485>

19. Арендаренко В. М., Самойленко Т. В., Иванов О. М. Дослідження руху зернового матеріалу по лоткам гравітаційної установки. *Scientific Progress & Innovations*. 2021. N1. 302–309. <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.01.38>

20. Kruszelnicka W. Study of Selected Physical-Mechanical Properties of Corn Grains Important from the Point of View of Mechanical Processing Systems Designing. *MDPI*. 2021. V. 14. P. 1467. <https://doi.org/10.3390/ma14061467>

21. Твердохліб І. В. Транспортування зерна в процесі його післязбиральної обробки. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 2(113). С. 75-82.

22. Дмитрів В., Саган О. Я., Городняк Р. В. Застосування теорії розмірностей в дослідженнях дозаторів сипких матеріалів за багатофакторного експерименту. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2023. Випуск 57. С. 13 – 20. <https://doi.org/10.23939/istcipa.2023.57.013>

References

1. Vydannia 2025 roku. (n.d.). Infografichnyi dovidnyk Ahrobiznes Ukrainy. <https://agribusinessinukraine.com/the-infographics-report-ukrainian-agribusiness-2025/> [in Ukrainian].

2. Hevko, R. B., Hevko, I. B., Liashuk, O. L., Diachun, A. Ye., Zalutskyi, S. Z., Stanko, A. I., & Dovbush, T. A. (2024). Hvyntovi konveiry z elastychnymy poverkhniamy. FOP Palianytsia V.A. [in Ukrainian].

3. Mesterházy, Á., Oláh, J., & Popp, J. (2020). Losses in the Grain Supply Chain: Causes and Solutions. *Sustainability*, 12(6), 2342. <https://doi.org/10.3390/su12062342> [in English].

4. Stepanenko, S. P., Aneliak, M. M., Kuzmich, A. Y., Shvidya, V. O., Volyk, D. A., Konoval, O. O., & Popadyuk, I. S. (2023). Study of the influence parameters and operating modes of equipment on the degree of grain damage in processing lines for its cleaning. *MECHANICS and AUTOMATICS of AGROINDUSTRIAL PRODUCTION*, (2(116)), 88–99. <https://doi.org/10.37204/2786-7765-2023-2-10> [in Ukrainian].

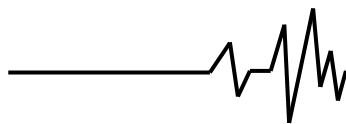
5. Kruszelnicka, W., Leda, P., Tomporowski, A., & Ambrose, K. (2024). Breakage behavior of corn kernels subjected to repeated loadings. *Powder Technology*, 119372. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119372> [in English].

6. Chen, Z., Wassgren, C., & Ambrose, K. (2020). A Review of Grain Kernel Damage: Mechanisms, Modeling, and Testing Procedures. *Transactions of the ASABE*, 63(2), 455–475. <https://doi.org/10.13031/trans.13643> [in English].

7. Derevianko, D., Sukmaniuk, E., Chychulyuk, S., Derevianko, O., & Polischuk, V. (2020). The impact of transporting technical means on grain crops damaging and quality. *Scientific Horizons*, 89(4), 47–54. <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2020-89-4-47-54> [in Ukrainian].

8. GuiXiang, C., YaHao, Y., ChaoSai, L., WenLei, L., & JingRan, L. (2023). Factors, Harms, and Control of Corn Kernel Breakage: A Review. *Annals of Food Processing and Preservation*, 7(1), 1–13. <https://doi.org/10.47739/2573-1033.foodprocessing.1038> [in English].

9. 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> [in English].

10. Gierz, Ł., Kruszelnicka, W., Łykowski, W., Steike, M., Wichliński, M., Estrada, Q., & Przybył, K. (2025). Effects of Thickness of the Corn Seed Coat on the Strength of Processed Biological Materials. *Materials*, 18(2), 222. <https://doi.org/10.3390/ma18020222> [in English].

11. Burdilna, E., Serhienko, S., Borysenko, M., & Yazovtsev, M. (2023). Optimization of the grain handling process for energy conservation. *Electromechanical and energy saving systems*, 63(4), 8–18. <https://doi.org/10.32782/2072-2052.2023.4.63.1> [in Ukrainian].

12. Mardziavko, V. (2021). Analiz orhanizatsii keruvannia obladnanniam dla zabezpechennia transportuvannia zernovoi produktsii na elevatorakh. *Naukovyi zhurnal «Inzheneriia pryrodokorystuvannia»*, (4(18)), 35–41. [https://doi.org/10.37700/enm.2020.4\(18\).35-41](https://doi.org/10.37700/enm.2020.4(18).35-41) [in Ukrainian].

13. Journal, I. (2021, January 1). Irjet-optimisation of rectangular bucket elevator system by analysing bucket and shafts. *Academia.edu - Find Research Papers, Topics, Researchers*. https://www.academia.edu/53906115/irjet_optimisation_of_rectangular_bucket_elevator_system_by_analysing_bucket_and_shafts [in English].

14. Masnaji, R. N. (2016). Material optimization and Modal Analysis of Elevator bucket. *International Journal of Current Engineering and technology*, 6(2), 574. [in English].

15. Arunyanart, P., Kongkaew, N., & Sudsawat, S. (2024). Optimizing Bucket Elevator Performance through a Blend of Discrete Element Method, Response Surface Methodology, and Firefly Algorithm Approaches. *Computers, Materials & Continua*, 1–10. <https://doi.org/10.32604/cmc.2024.054337> [in English].

16. Boslovyak, P. V., & Shagimardanov, V. R. (2021). Calculation and comparative analysis of bucket of the belt elevator. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1129(1), 012069. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1129/1/012069> [in English].

17. Wang, G., Jin, C., Zhang, M., Wu, C., Tang, Q., & Yang, Y. (2024). Reducing Grain Damage in Moist Corn Threshing via Corn cob Division. *Agriculture*, 14(9), 1648. <https://doi.org/10.3390/agriculture14091648> [in English].

18. Gao, P., Tian, S., Xue, X., & Lu, J. (2024). Determination Methods and Influencing Factors of Grain Mechanical Properties. *Journal of Food Quality*, 2024, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2024/3407485> [in English].

19. Arendarenko, V. M., Samoilenko, T. V., & Ivanov, O. M. (2021). Doslidzhennia rukhu ZERNOVOHO MATERIALU PO LOTKAM hravitatsiinoi USTANOVKY. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii*, (1), 302–309. <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.01.38> [in Ukrainian].

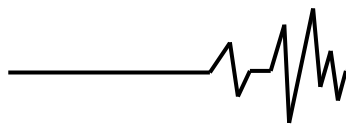
20. Kruszelnicka, W. (2021). Study of Selected Physical-Mechanical Properties of Corn Grains Important from the Point of View of Mechanical Processing Systems Designing. *Materials*, 14(6), 1467. <https://doi.org/10.3390/ma14061467> [in English].

21. Tverdokhlib, I., Kovalchuk, O., Spirin, A., & Pavlenko, V. (2024). Grain transportation in the process of its post-harvest processing. *Vibrations in engineering and technology*, (2(113)), 75–82. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-2-8> [in Ukrainian].

22. Dmytriv, V., Sahan, O., & Gorodnyak, R. (2023). Application of the theory of dimensions in research of floor materials dispensers in multifactor experiment. *Avtomatizaciâ virobničih procesiv u mašinobuduvanni ta priladobuduvanni*, 57, 13–20. <https://doi.org/10.23939/istcipa2023.57.013> [in English].

CRITERIA-BASED ASSESSMENT OF TRAUMA-SAVING GRAIN TRANSPORT TECHNOLOGY BASED ON DIMENSION THEORY AND PARTIAL DERIVATIVE ANALYSIS

The process of grain transportation in modern technological lines is accompanied by intensive mechanical impact, leading to significant injury to the seed material. Addressing the challenge of minimizing quality losses necessitates a transition from empirical observations to mathematical models that account for both the equipment's technical parameters and the biological nature of the research subject. This article examines a mathematical model of the grain damage process and identifies dimensionless similarity criteria based on dimensional analysis. The methods of dimensional theory and the π -theorem (Buckingham-Federman theorem) were applied. The injury process is described through a functional dependence of the total length of cracks and fractures L on three groups of factors: physico-mechanical properties of the grain F_m , biological characteristics B_m and external impact parameters E_i . Based on dimensional analysis, six independent dimensionless complexes were derived to describe the energetic and kinematic interactions within the "grain-working element-surface" system. The key identified criteria include the density of the grain, the dynamic load acting on the grain, and the hardness of the contact surface,



which determines the damping of impact energy by the working element or equipment surface. By excluding insignificant factors, the model's suitability for practical engineering calculations has been enhanced. The developed model enables the prediction of injury levels at the design stage of transport systems. The implementation of the proposed solutions will contribute to increasing the competitiveness of the agricultural sector,

emphasizing the importance of an integrated approach to transport system design that combines technical, economic, and technological aspects.

Keywords: grain damage, dimensional analysis, Buckingham π -theorem, seed quality.

Відомості про автора

Мірських Руслан Васильович – здобувач вищої освіти ступеня доктора філософії, спеціальність 133 «Галузеве машинобудування» кафедри процесів, обладнання та енергетичного менеджменту Одеський національний технологічний університет (вул. Канатна, 112, м. Одеса, Україна, 65039), e-mail: rmirskykh@gmail.com, ORCID: 0009-0001-9012-5581.

Mirskykh Ruslan – PhD-student, specializing 133 “Industrial Engineering”, Department of Processes, Equipment and Energy Management, Odesa National University of Technology (Odesa, Kanatna Str. 112, Ukraine, 65039) e-mail: rmirskykh@gmail.com, ORCID: 0009-0001-9012-5581.

Стаття надійшла 21.10.2025

Стаття прийнята 30.10.2025

Опубліковано 25.12.2025