

Дніпровський державний аграрно-економічний університет  
Інженерно-технологічний факультет  
Кафедра інжинірингу технічних систем

**Пояснювальна записка**  
до дипломної роботи  
освітнього ступеня "Магістр" на тему:  
**Чисельне моделювання стрічкового транспортеру для зерна**

**Виконав:** студент 2 курсу, групи МгАІ-1-24  
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

\_\_\_\_\_ Семісалов Андрій Олександрович

**Керівник:** \_\_\_\_\_ Алієв Ельчин Бахтияр огли

**Рецензент:** \_\_\_\_\_ Яропуд Віталій Миколайович

Дніпро, 2025

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ  
АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем  
Освітній ступінь: «Магістр»  
Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

ДОЦЕНТ

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«24» жовтня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Семісалову Андрію Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Чисельне моделювання стрічкового транспортеру для зерна

керівник роботи: Алієв Ельчин Бахтияр огли, д-р техн. наук, старший дослідник

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від  
«24» жовтня 2025 року № 3182

2. Строк подання студентом роботи 05.12.2025 року

3. Вихідні дані до проекту Огляд стану питання в галузі механізації сільського господарства та існуючих технічних засобів для транспортування зерна. Патентний пошук, аналіз літературних джерел, останніх досліджень з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Стан і напрями досліджень. 2. Аналітичні дослідження процесу транспортування зерна. 3. Методика чисельного моделювання. 4. Результати чисельного моделювання. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 6. Економічна ефективність. Висновки. Список використаних джерел. Додатки

## 5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Тема. Мета і задачі досліджень (2 аркуша, А4). 2. Стан і напрями досліджень (1 аркуш, А4). 3. Аналітичні дослідження (1 аркуш, А4). 4 Чисельне моделювання (3 аркуша, А4). 5. Економічні показники (1 аркуш, А4). 6. Висновки (2 аркуш, А4)

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-6	Алієв Е. Б., професор	24.10.2025	05.12.2025
Нормоконтроль	Івлєв В. В., доцент	05.10.2025	05.12.2025

7. Дата видачі завдання: 24 жовтня 2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний	до 05.11.2025 р	виконано
2	Теоретичний	до 14.11.2025 р	виконано
3	Експериментальний	до 26.11.2025 р	виконано
4	Охорона праці	до 28.11.2025 р	виконано
5	Економічний	до 01.12.2025 р	виконано
6	Демонстраційна частина	до 05.12.2025 р	виконано

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Семісалов А. О.

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

Алієв Е. Б.

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)



Семісалов А. О. Чисельне моделювання стрічкового транспортеру для зерна. Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія». ДДАЕУ, Дніпро, 2025.

У роботі досліджено процес транспортування зерна стрічковим транспортером та оцінено його ефективність з технічної й економічної точок зору. Проаналізовано стан виробництва зернових культур в Україні, способи транспортування та конструкції механічних транспортерів, зокрема стрічкових, їхні переваги та сфери застосування. Виконано аналітичні розрахунки поперечного перерізу зернового шару та продуктивності транспортера. Запропоновано методику чисельного моделювання процесу з використанням FEM–DEM для оцінки опору згину зернової маси та навантаження на опори. Представлено результати моделювання, включно з аналізом прогину стрічки та силових характеристик шару зерна. Розглянуто питання охорони праці та безпеки. Оцінено економічну ефективність удосконаленого транспортера, його енергоспоживання, експлуатаційні витрати та строк окупності порівняно з базовою конструкцією.

**Ключові слова:** стрічковий транспортер, транспортування зерна, продуктивність, чисельне моделювання, FEM–DEM, опір згину зернової маси, економічна ефективність, прогин стрічки, оптимізація конструкції.

**Апробація.** Семісалов А. О. (2025). Аналіз конструкцій стрічкового транспортера для зерна. Збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (21 листопада 2025 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ, 260–262.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	10
1.1 Виробництво основних зернових культур в Україні .....	10
1.2 Способи транспортування зерна .....	12
1.3 Аналіз конструкцій механічних транспортерів зерна.....	15
1.3 Аналіз конструкцій стрічкового транспортера для зерна .....	20
1.4 Висновки з розділу .....	23
2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ СТРІЧКОВОГО ТРАНСПОРТЕРУ ДЛЯ ЗЕРНА .....	25
2.1 Площа поперечного перерізу стрічкового транспортеру .....	25
2.2 Продуктивність стрічкового транспортера .....	30
2.3 Розрахунок продуктивності стрічкового транспортера.....	32
2.4 Висновки з розділу.....	34
3 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СТРІЧКОВОГО ТРАНСПОРТЕРУ ДЛЯ ЗЕРНА.....	35
3.1 Аналіз опору сипкого зерна при деформації стрічки транспортера .....	35
3.2 Комбіноване моделювання FEM–DEM .....	37
3.3 Моделювання навантаження на опори стрічкового транспортера.....	39
4 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СТРІЧКОВОГО ТРАНСПОРТЕРУ ДЛЯ ЗЕРНА.....	43
4.1 Модель симуляції опору згину зернової маси та якісні результати.....	43
4.2 Кількісні результати моделювання процесу транспортування зерна .....	45
4.3 Прогноз прогину стрічки зернового транспортера .....	52
4.4 Висновки з розділу.....	54
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	56

6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СТРІЧКОВОГО ТРАНСПОРТЕРУ ДЛЯ ЗЕРНА .....	60
6.1 Вихідні дані для розрахунків.....	60
6.2 Розрахунок економічних показників .....	61
6.3 Висновки з розділу.....	63
ВИСНОВКИ .....	64
Бібліографія .....	66
Додатки .....	69

## ВСТУП

Сучасні технологічні процеси транспортування зерна на підприємствах агропромислового комплексу вимагають високої ефективності, надійності та енергоощадності обладнання. Одним із ключових елементів таких технологічних ліній є стрічкові транспортери, які забезпечують безперервне переміщення зернової маси між різними ділянками виробництва – від приймання до зберігання, очищення та переробки. Від правильності вибору конструктивних параметрів транспортера, геометрії його вузлів та режимів роботи залежить не лише продуктивність системи, а й збереження якості зерна.

Традиційні методи проєктування стрічкових транспортерів базуються на емпіричних формулах і спрощених розрахунках, що не завжди дозволяє врахувати складні динамічні процеси руху сипкого матеріалу. У зв'язку з цим актуальним є застосування чисельного моделювання, яке дає змогу глибше дослідити вплив конструктивних і технологічних параметрів на роботу транспортера, оцінити навантаження на стрічку та роликоопори, визначити оптимальні умови транспортування зерна.

Використання методів комп'ютерного моделювання на основі програмних пакетів типу ANSYS, SolidWorks Simulation або Simcenter Star-CCM+ забезпечує можливість візуалізації руху зернового матеріалу, розрахунку напружено-деформованого стану елементів конструкції та оптимізації параметрів для підвищення довговічності й ефективності роботи машини.

Таким чином, чисельне моделювання стрічкового транспортера для зерна є важливим етапом інженерного аналізу, який дозволяє мінімізувати експериментальні витрати, скоротити терміни проєктування та підвищити надійність транспортувальних систем у зернопереробній промисловості.

**Мета дослідження** – підвищення ефективності процесу транспортування зерна шляхом удосконалення конструкції стрічкового транспортера на основі аналітичних розрахунків і чисельного моделювання процесу його роботи, що

забезпечить зниження енергоспоживання, рівномірність руху сипкої маси та зменшення навантажень на стрічку й опори.

**Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:**

1. Проаналізувати сучасний стан виробництва основних зернових культур в Україні та обґрунтувати актуальність удосконалення процесів транспортування зерна.
2. Розглянути існуючі способи транспортування зерна й визначити їхні переваги та обмеження.
3. Провести аналіз конструкцій механічних транспортерів, зокрема стрічкових, з позицій ефективності та надійності роботи.
4. Виконати аналітичні розрахунки площі поперечного перерізу, продуктивності та навантаження на стрічку транспортера.
5. Розробити методику чисельного моделювання процесу транспортування зерна з використанням комбінованого підходу FEM–DEM.
6. Провести моделювання розподілу навантажень на опори та оцінити вплив властивостей зерна на прогин стрічки.
7. Отримати кількісні та якісні результати моделювання, побудувати залежності для прогнозування параметрів роботи транспортера.
8. Оцінити економічну ефективність використання удосконаленого стрічкового транспортера в умовах агропромислового виробництва.
9. Розробити заходи з охорони праці та безпеки під час експлуатації транспортних систем для зерна.

**Об'єкт дослідження** – процес транспортування зерна у стрічковому транспортері.

**Предмет дослідження** – вплив конструктивних і технологічних параметрів стрічкового транспортера (ширини, швидкості руху стрічки, кута жолоблення, навантаження сипкої маси, опору роликоопор) на рівномірність подачі, продуктивність та напружено-деформований стан елементів конструкції.

## 1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 1.1 Виробництво основних зернових культур в Україні

У 2024/25 маркетинговому році виробництво основних зернових культур в Україні дещо скоротилося порівняно з попереднім сезоном, однак залишилося на стабільному рівні, що забезпечує як внутрішні потреби країни, так і значний експортний потенціал. За оцінками Української зернової асоціації, загальний урожай зернових становив близько 51 млн тонн, що трохи менше, ніж у 2023/24 МР, коли було зібрано понад 55 млн тонн. Зменшення виробництва пояснюється поєднанням кількох факторів – зниженням площ під посівами в окремих регіонах, складними погодними умовами під час вегетації, а також ускладненням логістики через військові дії.

Найбільшу частку у структурі виробництва зернових традиційно займає кукурудза, урожай якої у 2024/25 році оцінюється на рівні 24 млн тонн. Незважаючи на певне скорочення площ, ця культура залишається головною для українського експорту завдяки стабільному попиту на світовому ринку та високій врожайності. На другому місці за обсягами є пшениця – приблизно 21,5 млн тонн, що на 1–1,5 млн тонн менше, ніж торік. Урожайність озимої пшениці коливалася в межах 4,0–4,3 т/га залежно від регіону, а якість зерна переважно відповідала продовольчим стандартам. Частка пшениці, придатної для виробництва хлібопекарської муки, залишилася стабільною на рівні 60–65 %.

Виробництво ячменю становило близько 5,4 млн тонн, що також свідчить про незначне скорочення порівняно з минулим роком. Зменшення врожайності пов'язане переважно з погодними стресами на початку вегетації, однак культура зберегла своє значення для фуражного та пивоварного напрямів. Урожай жита оцінюється на рівні близько 300 тис. тонн, що цілком задовольняє внутрішній попит. Також незначні площі відведені під овес та гречку, врожай яких у сумі становить близько 400 тис. тонн.

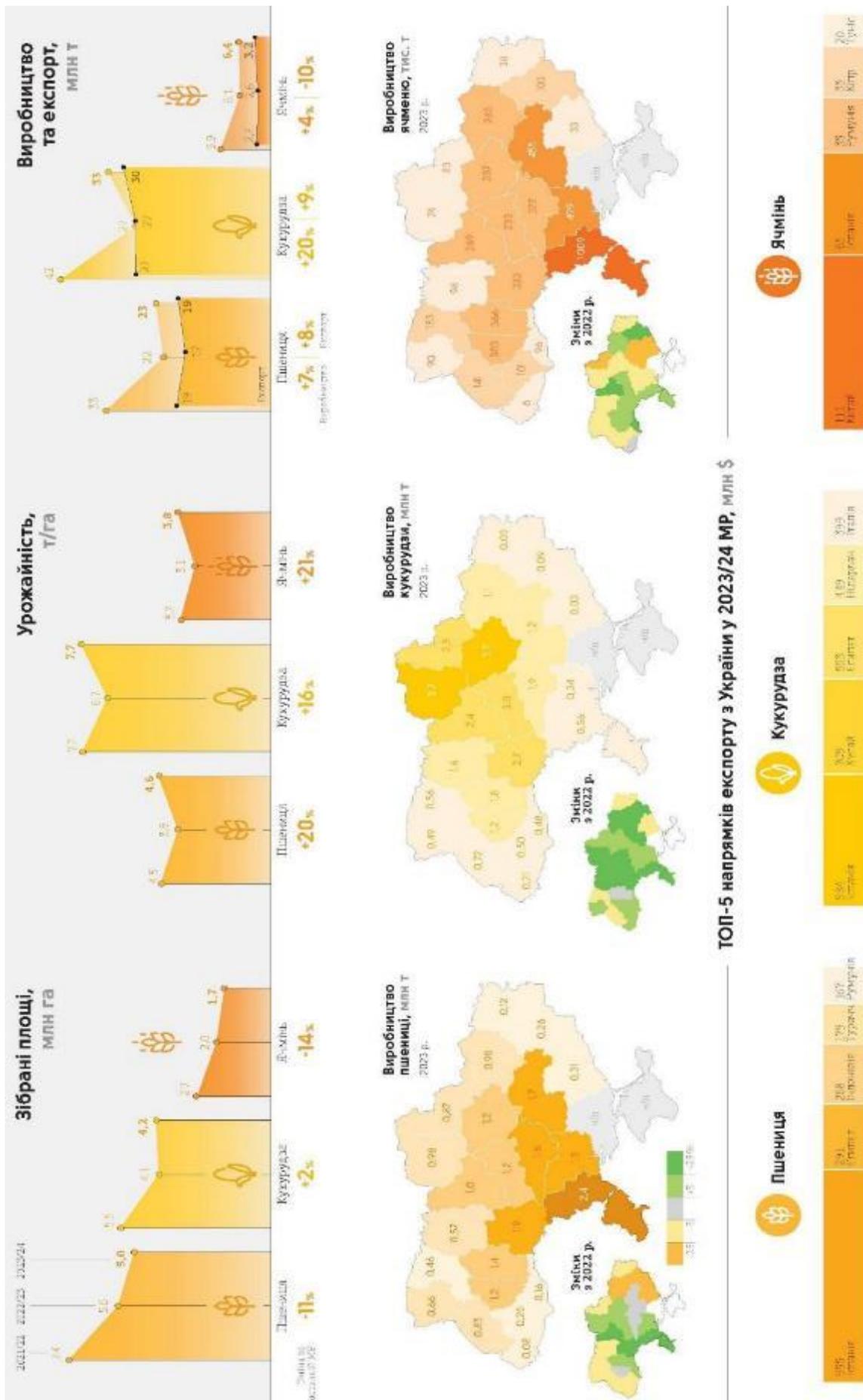


Рисунок 1.1 – Виробництво основних зернових культур в Україні

Найвищі показники виробництва зернових у 2024/25 році зафіксовано у центральних і північних областях – Полтавській, Черкаській, Вінницькій, Сумській та Хмельницькій, де сприятливі агрокліматичні умови дозволили отримати стабільну врожайність навіть за підвищених ризиків. У південних регіонах – Одеській, Миколаївській, Запорізькій – через посушливу погоду в окремі періоди сезону врожайність знизилася на 10–15 %.

Загалом зерновий комплекс України у 2024/25 МР демонструє адаптивність до складних умов. Сільськогосподарські підприємства активно впроваджують технології точного землеробства, використовують стійкі сорти та гібриди, а також удосконалюють систему удобрення й захисту рослин, що дозволяє частково компенсувати негативні впливи клімату та економічних обмежень.

Україна продовжує залишатися одним із ключових постачальників зерна на світові ринки, зокрема пшениці та кукурудзи, забезпечуючи продовольчу безпеку багатьох країн. Попри скорочення валового збору, ефективність виробництва зросла завдяки підвищенню врожайності в більшості регіонів та оптимізації структури посівів. Надалі розвиток зернового виробництва в Україні буде спрямований на підвищення стійкості до кліматичних ризиків, енергоефективність технологій і вдосконалення логістики, що створює передумови для відновлення зростання у наступних сезонах.

## **1.2 Способи транспортування зерна**

Транспортування зерна є важливою складовою післязбиральної та переробної технології, що забезпечує переміщення зернової маси між окремими етапами виробничого процесу. Від способу транспортування залежать збереження якості зерна, рівень механічного травмування зернівок, санітарний стан виробництва, енерговитрати та загальна ефективність роботи підприємства. Під час переміщення зерно піддається дії механічних навантажень, тертя, ударів і стискання, що може призводити до пошкодження оболонки, зменшення схожості або погіршення товарних якостей. Тому вибір раціонального способу

транспортування має ґрунтуватися на урахуванні фізико-механічних властивостей зернової маси, напрямку руху, довжини транспортних трас, умов експлуатації та призначення кінцевого продукту.

Основними способами транспортування зерна є механічний, пневматичний та комбінований. Кожен з них має свої особливості, переваги й обмеження, що визначають сферу його ефективного застосування.

*Механічний спосіб транспортування* є найпоширенішим у зернопереробній промисловості. Він базується на переміщенні зерна за допомогою різних механічних рухів – поступальних, обертальних або коливальних. Цей спосіб забезпечує стабільну подачу зернової маси при порівняно невисоких енерговитратах. Механічне транспортування характеризується простотою організації процесу, високою надійністю та можливістю точного дозування подачі матеріалу. Його застосовують для горизонтального, похилого й вертикального переміщення зерна між окремими технологічними ланками – під час очищення, сушіння, зберігання та відвантаження. До переваг цього способу належать висока продуктивність, тривалий строк служби транспортних систем, невелика потреба у технічному обслуговуванні та низький рівень пиловиділення. Недоліком є певне обмеження у відстані транспортування та ризик травмування зерна при різких змінах напрямку руху чи перевантаженні системи.

*Пневматичний спосіб транспортування* заснований на використанні повітряного потоку, який переносить зерно трубопроводами за рахунок різниці тиску або розрідження. У цьому випадку зернова маса переміщується у зваженому стані, що забезпечує плавний і безперервний рух. Основними перевагами пневматичного способу є компактність системи, гнучкість у розміщенні транспортних ліній, можливість транспортування у будь-якому напрямку, включаючи вертикальний, а також простота автоматизації процесу. Пневмотранспорт широко застосовується в елеваторах, зернопереробних заводах і комбикормових виробництвах, особливо у випадках, коли необхідно переміщувати зерно між кількома рівнями або технологічними відділеннями. Недоліками цього способу є підвищене енергоспоживання, можливе подрібнення

зерна при високих швидкостях руху, утворення пилу та потреба в системах очищення повітря. Проте при правильному розрахунку параметрів повітряного потоку пневматичне транспортування забезпечує достатньо високу ефективність і мінімальні втрати якості зерна.



Рисунок 1.2 – Пневматичний спосіб транспортування зерна

*Комбінований спосіб транспортування* передбачає поєднання двох або більше принципів переміщення зерна. Найчастіше це комбінація механічного та пневматичного транспорту, яка дає змогу максимально ефективно використовувати переваги кожного способу. Комбіновані системи забезпечують гнучкість виробничої схеми, дозволяють скорочувати довжину транспортних трас, зменшують кількість перевантажувальних пунктів і, відповідно, втрати зерна. Такий підхід особливо ефективний у сучасних зернопереробних комплексах, де передбачено автоматизацію управління та оптимізацію енергоспоживання.

Вибір способу транспортування здійснюють з урахуванням низки чинників: виду зерна, його вологості, сипкості, насипної густини, кута природного укосу, відстані транспортування, продуктивності лінії, компоновки обладнання, а також допустимого рівня травмування зернівок. Для зерна продовольчого або

насінного призначення перевагу надають способам, що забезпечують мінімальне пошкодження зерна, навіть за рахунок зменшення швидкості руху. Для фуражного зерна допустиме використання більш інтенсивних методів транспортування.

Таким чином, кожен спосіб транспортування зерна має своє призначення та область ефективного застосування. Механічний спосіб оптимальний для горизонтального та похилого переміщення на середні відстані, пневматичний – для вертикального підйому й транспортування у важкодоступних місцях, а комбінований – для складних виробничих систем, де важлива автоматизація та гнучкість. Раціональний вибір способу транспортування забезпечує збереження якості зерна, підвищення енергоефективності технологічного процесу та надійну роботу зернопереробного підприємства в цілому.

### **1.3 Аналіз конструкцій механічних транспортерів зерна**

Механічні транспортери є невід'ємною частиною технологічного процесу транспортування зерна на елеваторах, у зерносховищах, млинах, комбікормових заводах та інших підприємствах аграрно-промислового комплексу. Вони призначені для переміщення зернової маси між окремими технологічними ланками – від приймання до очищення, сушіння, зберігання та відвантаження готової продукції. Ефективність роботи механічних транспортерів безпосередньо впливає на продуктивність підприємства, ступінь збереження якості зерна, рівень енерговитрат і надійність усього виробничого процесу. Тому вивчення, порівняння та аналіз конструкцій таких машин має важливе значення для удосконалення технологічних ліній і підвищення їхньої ефективності.

Механічні транспортери відрізняються конструктивними особливостями, принципом дії, напрямком транспортування, продуктивністю та рівнем впливу на зерно. Основою їхньої роботи є переміщення матеріалу за рахунок дії механічних сил, які передаються робочими органами — гнучкими або жорсткими елементами, що рухаються уздовж замкненої або відкритої траєкторії. Основними вимогами до

таких конструкцій є забезпечення рівномірного і безперервного транспортування, мінімізація травмування зернівок, надійність і довговічність вузлів, зручність обслуговування та економічність у споживанні енергії.

Серед усіх типів механічних транспортерів найбільш поширеними є стрічкові, ланцюгові (скребкові), шнекові, ковшові (елеватори) та вібраційні. Кожен із них має власну область раціонального застосування, конструктивні особливості та експлуатаційні переваги.

*Стрічкові транспортери* використовуються для горизонтального і слабопохилого переміщення зерна на значні відстані. Їхня робота базується на русі безкінечної гнучкої стрічки, що спирається на роликкоопори і приводиться у рух барабаном. Такий спосіб транспортування забезпечує плавний рух зернової маси, мінімальний рівень пошкоджень і високу продуктивність. Стрічкові системи відзначаються простою конструкцією, невеликим рівнем енерговитрат, низьким шумом під час роботи та високою надійністю. Водночас вони потребують достатнього простору для монтажу, періодичного регулювання натягу стрічки, очищення від налиплого матеріалу і дотримання правильного центрування. Їх переважно застосовують у зерносховищах і портах, де потрібне транспортування великих потоків зерна на значну відстань при мінімальних втратах якості.



Рисунок 1.3 – Стрічкові транспортери для зерна

*Ланцюгові або скребкові транспортери* призначені для переміщення зерна у жолобі за допомогою руху ланцюга з прикріпленими скребками. Зернова маса захоплюється скребками і просувається вздовж корпуса. Такі транспортери можуть працювати під більшими кутами нахилу, ніж стрічкові, та займають менше місця, що робить їх придатними для компактних виробничих приміщень. Вони забезпечують герметичність транспортного каналу, що знижує пиловиділення та покращує санітарні умови. Недоліками таких конструкцій є підвищене травмування зерна через тертя і тиск між скребками та стінками жолоба, а також знос ланцюга, особливо при роботі з абразивними матеріалами. У сучасних моделях ці проблеми частково усуваються шляхом використання полімерних вставок, оптимізованої форми скребків і регулювання швидкості руху ланцюга.



Рисунок 1.3 – Ланцюгові або скребкові транспортери для зерна

*Шнекові транспортери, або гвинтові, належать до найбільш компактних засобів транспортування. Їх робочим органом є гвинтова спіраль, що обертається в циліндричному корпусі. Під час обертання гвинта зерно пересувається вздовж осі.*

Шнекові транспортери широко використовуються для подавання зерна у сушарки, бункери, змішувачі та дозатори. Вони мають просту конструкцію, невеликі габарити, добре герметизуються і можуть працювати у будь-якому напрямку нахилу. Однак цей тип транспорту супроводжується значним травмуванням зерна, особливо при високій швидкості обертання, а також має обмеження щодо довжини, оскільки зі збільшенням гвинта різко зростає енергоспоживання та знижується продуктивність. Для зменшення негативного впливу на зерно у сучасних шнеках використовують спіралі зі змінним кроком, спеціальні полімерні покриття та плавне регулювання частоти обертання.



Рисунок 1.4 – Шнекові транспортери для зерна

*Ковшові елеватори, або норії, застосовують для вертикального підйому зерна на значну висоту. Конструкція складається з безкінечного ланцюга або стрічки з прикріпленими ковшами, які захоплюють зерно з нижнього бункера та вивантажують його у верхній частині під дією відцентрової або гравітаційної сили. Норії забезпечують безперервне транспортування при високій продуктивності, займають мінімум площі та мають тривалий строк служби. Проте вони потребують ретельного балансування, герметизації для запобігання*

запиленню, а також регулярного технічного обслуговування. Основною проблемою залишається травмування зерна під час завантаження та розвантаження, особливо при великих швидкостях руху ковшів.



Рисунок 1.5 – Ковшові елеватори для зерна

*Вібраційні транспортери* здійснюють переміщення зерна за рахунок коливального руху лотка, який передає матеріалу імпульс для поступового пересування. Такий принцип роботи дозволяє забезпечити рівномірну подачу зерна, самоочищення робочої поверхні та мінімальне травмування зернівок. Вібраційні транспортери відзначаються невеликими розмірами, простотою конструкції та низьким енергоспоживанням, але мають обмежену довжину переміщення та підвищений рівень шуму і вібрацій, що потребує відповідних заходів із шумоізоляції.

Порівняльний аналіз конструкцій механічних транспортерів свідчить, що кожен їхній тип має свою область оптимального застосування. Стрічкові транспортери доцільно використовувати для переміщення великих обсягів зерна на значні відстані при мінімальному травмуванні. Ланцюгові — ефективні у

замкнених або пилонебезпечних приміщеннях, де важлива герметичність та компактність системи. Шнекові – зручні для коротких транспортних ліній і дозування потоку. Ковшові елеватори незамінні для вертикального підйому зерна, а вібраційні – для точної подачі у технологічні вузли.

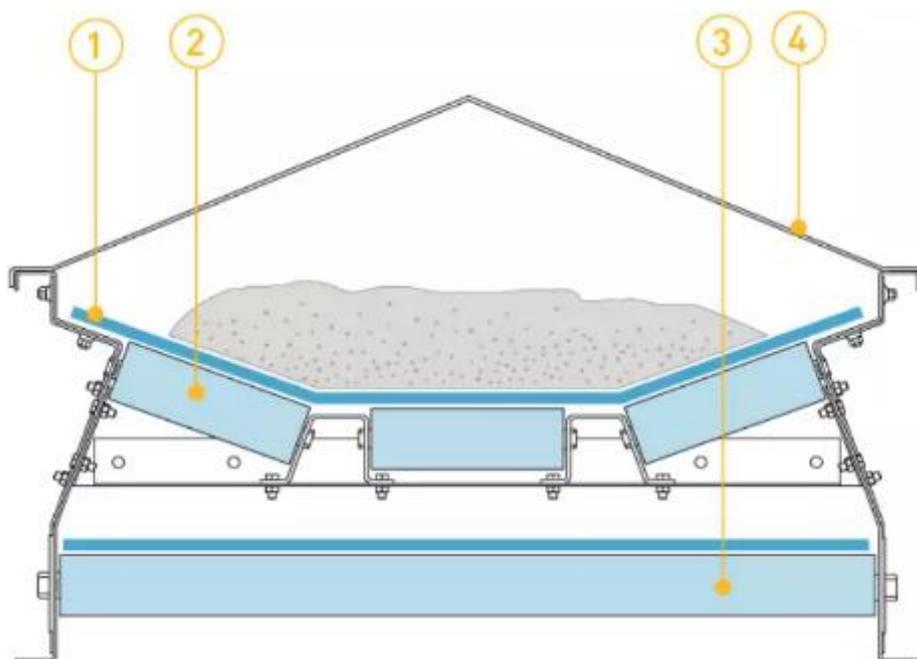
З метою підвищення енергоефективності та надійності у сучасних механічних транспортерах впроваджуються інноваційні технічні рішення, такі як застосування легких композитних матеріалів, енергозберігаючих електроприводів із частотним регулюванням, систем контролю навантаження, а також автоматизованих систем керування. Це дозволяє не лише оптимізувати процес транспортування, а й значно зменшити експлуатаційні витрати, підвищити довговічність вузлів і знизити ризик аварійних зупинок.

Узагальнюючи проведений аналіз, можна зазначити, що ефективність механічних транспортерів зерна визначається не лише їх конструкцією, а й правильністю підбору параметрів для конкретних умов виробництва. Раціональне поєднання типів транспортерів у межах одного підприємства забезпечує безперервність технологічного процесу, мінімальні втрати якості зерна та зниження енергоспоживання. Перспективним напрямом розвитку є створення комбінованих систем транспортування з автоматизованим керуванням, що поєднують переваги різних механічних принципів і дозволяють досягти високого рівня технологічної надійності та ефективності роботи зернопереробних комплексів.

### **1.3 Аналіз конструкцій стрічкового транспортера для зерна**

Стрічкові транспортери є одним із найпоширеніших і найбільш ефективних засобів механічного транспортування зерна на елеваторах, зернопереробних підприємствах, у сільському господарстві та на комбикормових заводах. Їхня популярність пояснюється простою конструкцією, високою продуктивністю, надійністю, економічністю й універсальністю у використанні. Стрічковий транспортер забезпечує безперервне, рівномірне переміщення зерна по

горизонталі, під нахилом або у вертикальному напрямку при мінімальному пошкодженні зернової маси.



- 1 – стрічка конвеєра; 2 – ролик-опори із підшипниками закритого типу;  
3 – зворотна гілка стрічки; 4 – кожух

Рисунок 1.6 – Схема стрічкового транспортера для зерна

Основними складовими стрічкового транспортера є несуча стрічка, приводний і натяжний барабани, ролик-опори, рама, приводний механізм та завантажувально-розвантажувальні пристрої. Конструкція стрічки визначає ефективність роботи транспортера, оскільки саме вона виконує основну функцію переміщення матеріалу. Для транспортування зерна застосовують прогумовані або тканинно-прогумовані стрічки, що мають високу гнучкість, достатню міцність і зносостійкість. Залежно від умов експлуатації, стрічки можуть бути плоскими або жолобчастими, що покращує умови утримання сипких матеріалів та запобігає їх висипанню.

Рама транспортера зазвичай виготовляється із сталевих профілів, що забезпечують жорсткість конструкції і дозволяють витримувати значні навантаження. Ролик-опори підтримують стрічку в робочому положенні, зменшують опір руху і забезпечують рівномірне натягнення. Вони можуть бути

горизонтальними або жолобчастими, залежно від форми стрічки. Жолобчата конфігурація роликоопор сприяє утворенню "лотка", який утримує зерно під час транспортування, особливо при нахилених або горизонтальних ділянках траси.

Привідний механізм складається з електродвигуна, редуктора і барабана, що передає обертання на стрічку. Зазвичай приводний барабан розташовують на вихідному кінці транспортера, оскільки натягнута гілка забезпечує краще зчеплення зі стрічкою. Натяжний барабан, розташований на завантажувальному кінці, компенсує подовження стрічки в процесі експлуатації. Натягнення може здійснюватися гвинтовим або вантажним пристроєм.

Важливим аспектом конструкції є система завантаження і розвантаження. Завантаження зерна може відбуватися безпосередньо з бункера, живильника або іншого транспортного засобу. Розвантаження здійснюють через кінцевий скид або через проміжні розвантажувальні пристрої, наприклад, пересувні плуги чи перекидні жолоби. Такі рішення дозволяють створювати гнучкі схеми транспортування, коли зерно може спрямовуватися одночасно у різні технологічні потоки.

При аналізі конструкцій стрічкових транспортерів важливо враховувати їх експлуатаційні параметри: продуктивність, кут нахилу, швидкість руху стрічки, ширину стрічки, а також допустимий радіус вигину. Продуктивність визначається швидкістю руху стрічки та поперечним перерізом шару зерна. Оптимальна швидкість залежить від виду зернового матеріалу, щоб уникнути розсипання та травмування зернівок.

Конструктивні варіанти стрічкових транспортерів можуть відрізнятися за призначенням: стаціонарні, пересувні, похилі, замкнені, відкриті або телескопічні. Стаціонарні транспортери застосовують у елеваторних комплексах для постійних технологічних ліній, тоді як пересувні — для навантаження, розвантаження або переміщення зерна між тимчасовими сховищами. Замкнені варіанти використовують у приміщеннях, де необхідно запобігти пиловиділенню і втратам матеріалу.

Особливу увагу приділяють енергетичній ефективності конструкції. Оптимізація розташування роликів, зменшення опору руху, використання енергоощадних електродвигунів і автоматичного регулювання швидкості дозволяють суттєво знизити витрати електроенергії. Крім того, сучасні тенденції розвитку стрічкових транспортерів пов'язані з упровадженням систем моніторингу стану стрічки, контролю натягнення, температури барабанів і навантаження на привід, що підвищує надійність і безпеку експлуатації.

Отже, аналіз конструкцій стрічкових транспортерів для зерна показує, що вони залишаються універсальним і технологічно ефективним засобом переміщення сипких матеріалів. Завдяки простоті конструкції, можливості адаптації до різних умов транспортування, високій продуктивності та мінімальному травмуванню зерна ці транспортери є невід'ємним елементом сучасних зернопереробних виробництв. Подальші напрямки удосконалення конструкції полягають у підвищенні енергоефективності, автоматизації керування та зниженні рівня шуму й вібрацій при роботі.

#### **1.4 Висновки з розділу**

1. Проведений аналіз способів і конструкцій транспортних систем для переміщення зерна показав, що транспортування є однією з ключових ланок технологічного процесу на зернопереробних підприємствах. Від правильного вибору способу та типу транспортера залежить збереження якості зерна, рівень його травмування, енергоефективність виробництва та надійність роботи технологічних ліній.

2. Серед основних способів транспортування зерна найбільш поширеними є механічний, пневматичний і комбінований. Механічні методи забезпечують стабільність подачі, низьке енергоспоживання та простоту обслуговування, тому їх застосовують у більшості технологічних схем. Пневматичні системи характеризуються гнучкістю, компактністю й можливістю транспортування у будь-якому напрямку, що робить їх доцільними в автоматизованих виробництвах і

на великих елеваторних комплексах. Комбіновані схеми дозволяють поєднати переваги різних способів і забезпечити найвищу ефективність у складних умовах роботи.

3. Аналіз конструкцій механічних транспортерів показав, що кожен тип має свої переваги і сферу раціонального використання. Стрічкові транспортери є оптимальним рішенням для переміщення великих обсягів зерна на значні відстані з мінімальним травмуванням. Ланцюгові транспортери відзначаються компактністю та герметичністю, що важливо для закритих приміщень і пилонебезпечних середовищ. Шнекові (гвинтові) транспортери зручні для коротких транспортних ліній і точного дозування, а ковшові елеватори – незамінні при вертикальному підйомі зерна. Вібраційні системи, у свою чергу, забезпечують рівномірну подачу матеріалу при низьких енергозатратах.

4. Окрему увагу заслуговують стрічкові транспортери, які залишаються базовим елементом зернопереробних систем. Вони поєднують високу продуктивність, плавність руху матеріалу, довговічність і простоту конструкції. Завдяки жолобчастій формі роликкоопор і якісним прогумованим стрічкам забезпечується дбайливе переміщення зернової маси без її пошкодження. Можливість регулювання швидкості, застосування енергоощадних приводів і автоматизованих систем контролю робить стрічкові транспортери високотехнологічними та ефективними засобами транспортування.

## 2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ СТРІЧКОВОГО ТРАНСПОРТЕРУ ДЛЯ ЗЕРНА

### 2.1 Площа поперечного перерізу стрічкового транспортеру

Максимальна продуктивність стрічкового транспортера для зерна  $I_v$  визначається як добуток швидкості руху стрічки  $v$ , коефіцієнта ухилу  $k$  та максимальної площі поперечного перерізу шару матеріалу на стрічці  $S$ .

Величина площі поперечного перерізу шару зерна залежить від корисної ширини стрічки  $b$ , що, у свою чергу, є функцією загальної ширини транспортної стрічки  $B$ . Крім того, вона визначається формою жолоба, тобто кількістю роликкоопор та їх геометрією (довжина центрального ролика  $l_3$  і кут жолоблення  $\lambda$ ), а також формою поверхні шару зерна, яка обмежується параболічною кривою, що описує насип зернового матеріалу. Ця парабола характеризується кутом природного укосу зерна  $\Theta$ .

Якщо відомий кут природного укосу зерна  $\Theta$  та ширина стрічки транспортера  $B$ , то корисну ширину стрічки  $b$  можна виразити залежно від  $B$  за співвідношенням:

$$b = 0,9B - 0,05, \quad B \leq 2 \text{ м} \quad (2.1)$$

$$b = B - 0,25, \quad B > 2 \text{ м}$$

Ці залежності отримані експериментально та враховують частину країв стрічки, не заповнену зерном, що запобігає його висипанню під час транспортування.

Відстань точки  $D$  (рис. 2.1) від початку координатної системи ( $Oxy$ ) становить  $b_1/2$ , де горизонтальна проекція корисної ширини стрічки  $b_1$  може бути визначена з урахуванням кута жолоблення  $\lambda$ :

$$b = z + l_3 + z = 2 \cdot z + l_3 \Rightarrow z = \frac{b - l_3}{2} \quad (2.2)$$

$$z_1 = z \cdot \cos\lambda = \frac{b - l_3}{2} \cdot \cos\lambda \quad (2.3)$$

$$b_1 = 2 \cdot z_1 + l_3 = 2 \cdot \frac{b - l_3}{2} \cdot \cos\lambda + l_3 = b \cdot \cos\lambda + l_3 \cdot (1 - \cos\lambda) \quad (2.4)$$

де  $z$  – відстань від краю стрічки до центрального ролика,  $l_3$  – довжина центрального ролика,  $\lambda$  – кут жолоблення стрічки.

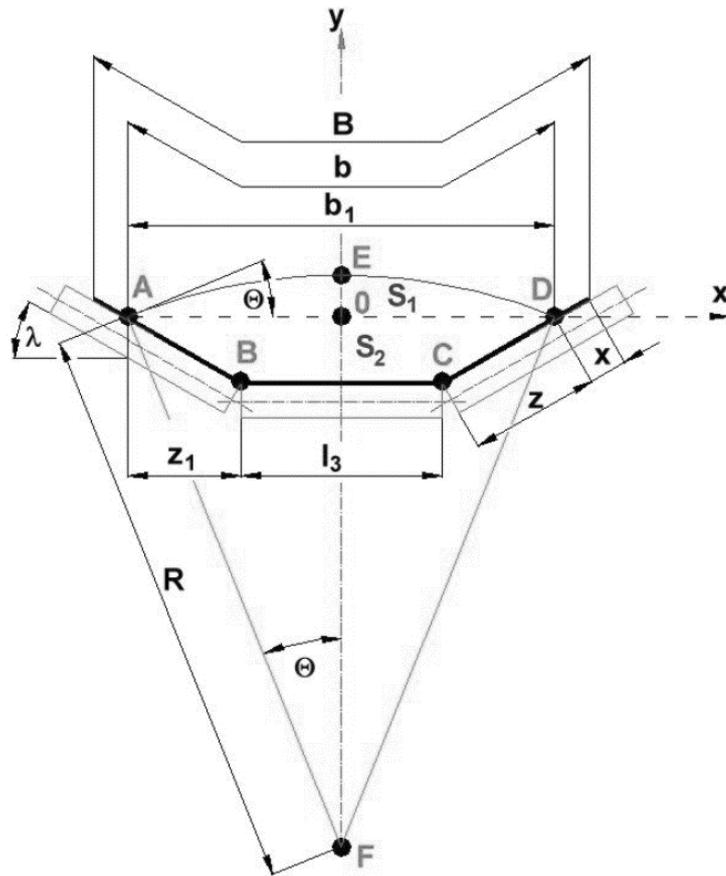


Рисунок 2.1 – Поперечний переріз жолобчастого стрічкового транспортера

Для опису насипу зерна на стрічці (рис. 2.2) використовується параболічна крива, параметр якої  $p$  та максимальна висота шару  $h_{\max}$  визначаються геометричними залежностями.

Відомо, що якщо до параболи провести дотичну  $t$ , то відстань між віссю параболи  $y$  та прямою, перпендикулярною дотичній у точці дотику  $D$ , дорівнює  $2p$ . Звідси:

$$\cotg\Theta = \frac{2 \cdot p}{\frac{b_1}{2}} \Rightarrow p = \frac{b_1}{4} \cdot \cotg\Theta \quad (2.5)$$

де  $\Theta$  – кут природного укосу зерна, який для пшениці становить приблизно 25–30°, для кукурудзи – 22–28°.

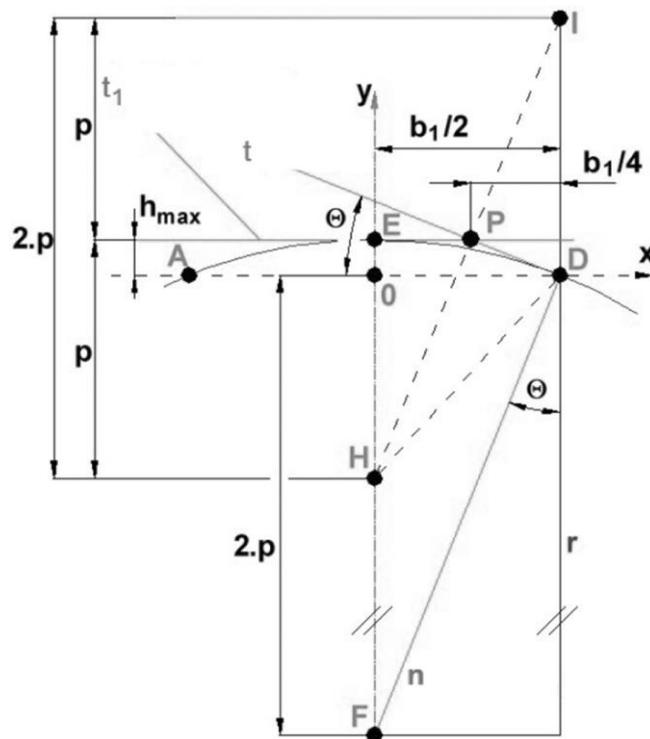


Рисунок 2.2 – Параболічна форма шару зерна на стрічці

Згідно з геометричними співвідношеннями (рис. 2.3), максимальна висота насипу зерна на стрічці визначається:

$$h_{max} = \frac{b}{4} \cdot \tan \Theta \quad (2.6)$$

Таким чином, поперечний профіль шару зерна на стрічці може бути змодельований як парабола, параметри якої залежать від ширини транспортера, кута жолоблення та кута природного укосу зерна. Це дозволяє точно оцінити площу поперечного перерізу  $S$ , що безпосередньо впливає на продуктивність транспортера.

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{h_{max}}{\frac{b_1}{4}} \Rightarrow h_{max} = \frac{b_1}{4} \cdot \operatorname{tg} \Theta \quad (2.7)$$

Побудова параболи виконується на основі її геометричного визначення: кожна точка параболи розташована на однаковій відстані від фокуса  $H$  та директриси  $d$ .

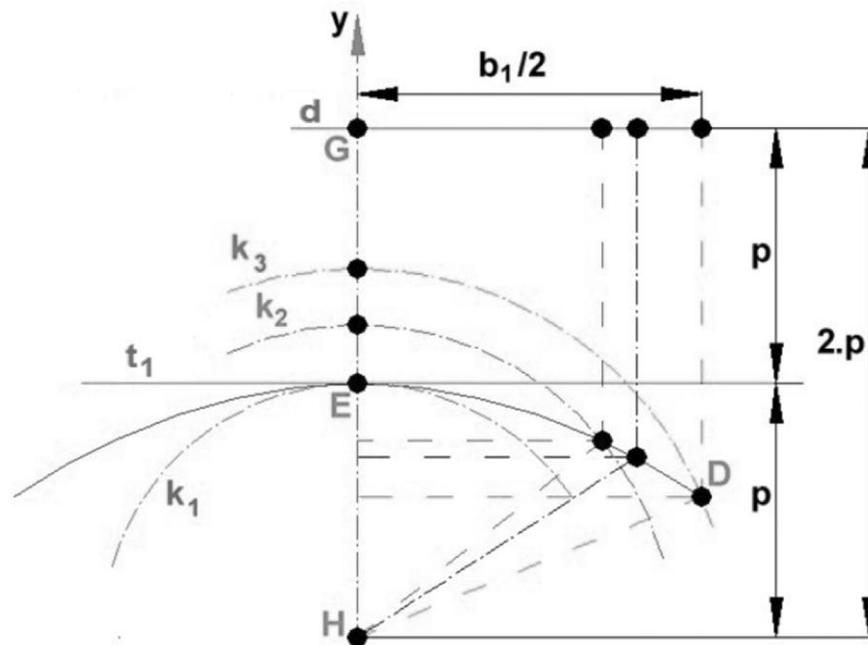


Рисунок 2.3 – Схема визначення параметра параболи

Для заданого параметра  $p$  визначаються координати точок  $H$ ,  $E$ ,  $G$  відповідно до схеми на рисунку 2.3. Парабола перетинає вісь  $x$  у точці  $D$ , віддаленій від початку координат на  $b_1/2$ . Якщо провести через цю точку пряму, паралельну осі  $y$ , то вона перетне параболу саме в точці  $D$ .

Максимальна висота параболи  $h_{\max}$ , що описує поверхню насипу зерна на стрічці транспортера, визначається за геометричною схемою (рис. 2.4).

Позначимо точку перетину дотичної до параболи  $t$  з віссю параболи  $y$  як  $L$ , а точку  $O$  – як основу перпендикуляра, опущеного з точки  $D$  (місце дотику дотичної) на вісь  $y$ . Точка  $F$  – це точка перетину нормалі до параболи, проведеної в точці  $D$ , з віссю  $y$ . Відрізок  $OL$  називають піддотичкою довжиною  $2s$ , а відрізок  $OF$  – піднормаллю довжиною  $2p$ .

Згідно з відомими співвідношеннями описової геометрії, вершина параболи ділить піддотичку навпіл. Крім того, у чотирикутнику  $LHDI$  діагоналі  $LD$  і  $HI$  є взаємно перпендикулярними, а  $LD$  ділить  $HI$  навпіл, причому сторони  $DI$  і  $LH$  паралельні. Отже, фігура  $LHDI$  є ромбом або квадратом, звідки випливає, що  $LP = PD$ , а через паралельність прямих  $PM//D0$  маємо  $LM = M0$ . Звідси також випливає, що  $EP = PM$ .

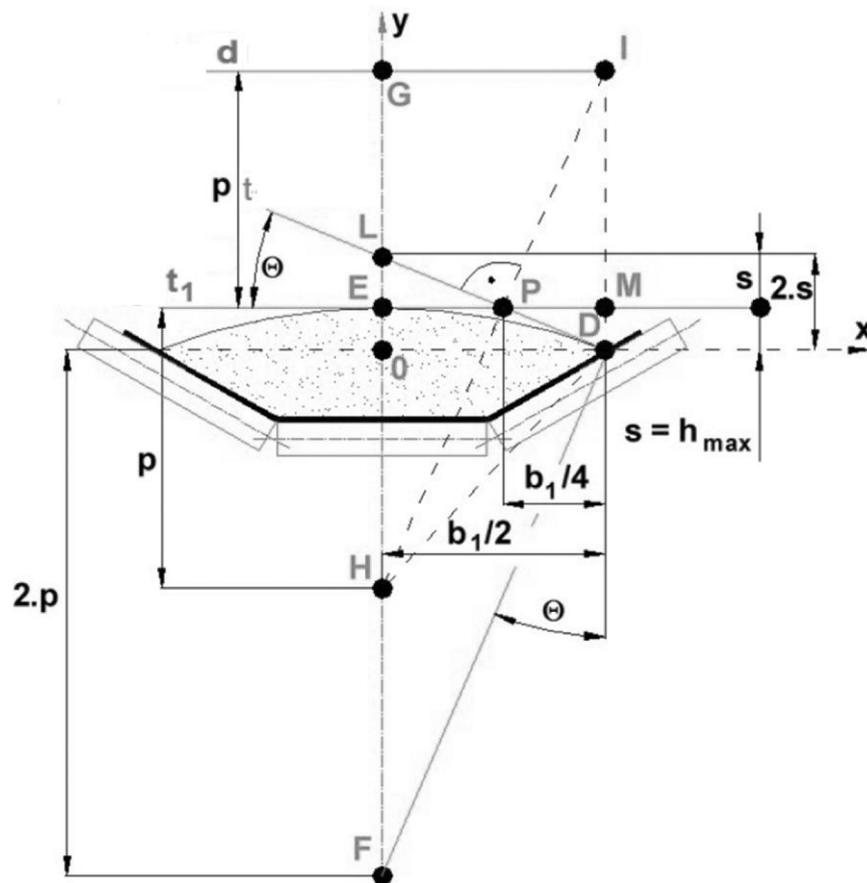


Рисунок 2.4 – Геометрія поперечного профілю шару зерна на стрічці транспортера

Загальне рівняння параболи, яка описує форму насипу зерна на стрічці, має вигляд:

$$y = -p \cdot x^2 + h_{\max} \quad (2.8)$$

Підставивши у рівняння (2.8) параметр параболи  $p$  з формули (2.6):

$$\begin{aligned} y &= -p \cdot x^2 + h_{\max} = -\frac{b_1}{4} \cdot \cot^2 \Theta \cdot x^2 + \frac{b_1}{4} \cdot \operatorname{tg} \Theta - \frac{b_1}{4} \cdot (\operatorname{tg} \Theta - \cot^2 \Theta \cdot x^2) = \\ &= \frac{b_1}{4} \cdot \left( \operatorname{tg} \Theta - \frac{1}{\operatorname{tg} \Theta} \cdot x^2 \right) = \frac{b_1}{4} \cdot \left( \frac{\operatorname{tg}^2 \Theta - x^2}{\operatorname{tg} \Theta} \right) [\text{m}] \end{aligned} \quad (2.9)$$

та максимальну висоту  $h_{\max}$  з формули (2.7) одержимо кінцеву форму рівняння параболи (2.9), яка описує поверхню шару зерна на стрічці.

Отримане рівняння дозволяє визначати форму поверхні насипу зерна в жолобчастій зоні транспортера. У поперечному перерізі матеріал утворює симетричний параболічний профіль, який забезпечує:

- рівномірний розподіл навантаження на стрічку та роликоопори;
- максимальне використання об'єму жолоба без пересипання матеріалу через краї;
- оптимальні умови для збереження сипких властивостей зерна.

## 2.2 Продуктивність стрічкового транспортера

Виведення формули здійснюється на основі аналітичних залежностей геометрії жолобчастої стрічки. Продуктивність транспортера визначається площею поперечного перерізу шару зерна на стрічці, що формується трьома роликоопорами рівної довжини (центральною та двома бічними).

На рисунку 2.1 схематично показано поперечний переріз транспортера, де:  $\Theta$  – кут природного укусу зерна;  $\lambda$  – кут жолоблення стрічки;  $B$  – загальна ширина стрічки;  $l_3$  – довжина центрального ролика.

При розрахунку вважається, що:

1. Стрічка заповнена рівномірно по всій довжині.
2. Насип зерна займає всю ширину жолоба до певної відстані  $x$  від краю стрічки, щоб запобігти висипанню матеріалу.
3. Цю відстань  $x$  визначають емпірично як частку ширини стрічки плюс постійну величину:

$$2. x = B - b = B - (0,9 \cdot B - 0,05) \Rightarrow x = \frac{0,1 \cdot B + 0,05}{2} = 0,05 \cdot B + 0,025 \quad (2.10)$$

Поперечний переріз шару матеріалу складається з трапеції ABCD та сегмента кола AED, що зображено на рисунку 2.5.

$$z = \frac{B}{2} - \frac{l_3}{2} - x \quad (2.11)$$

Для визначення площі трапеції  $S^2$  необхідно знати довжину ділянки  $z$  по бічному ролику до межі шару зерна:

$$S_2 = S_{21} + 2 \cdot S_{22} = l_3 \cdot z \cdot \sin \lambda + 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot z \cdot \sin \lambda \cdot z \cdot \cos \lambda \quad (2.12)$$

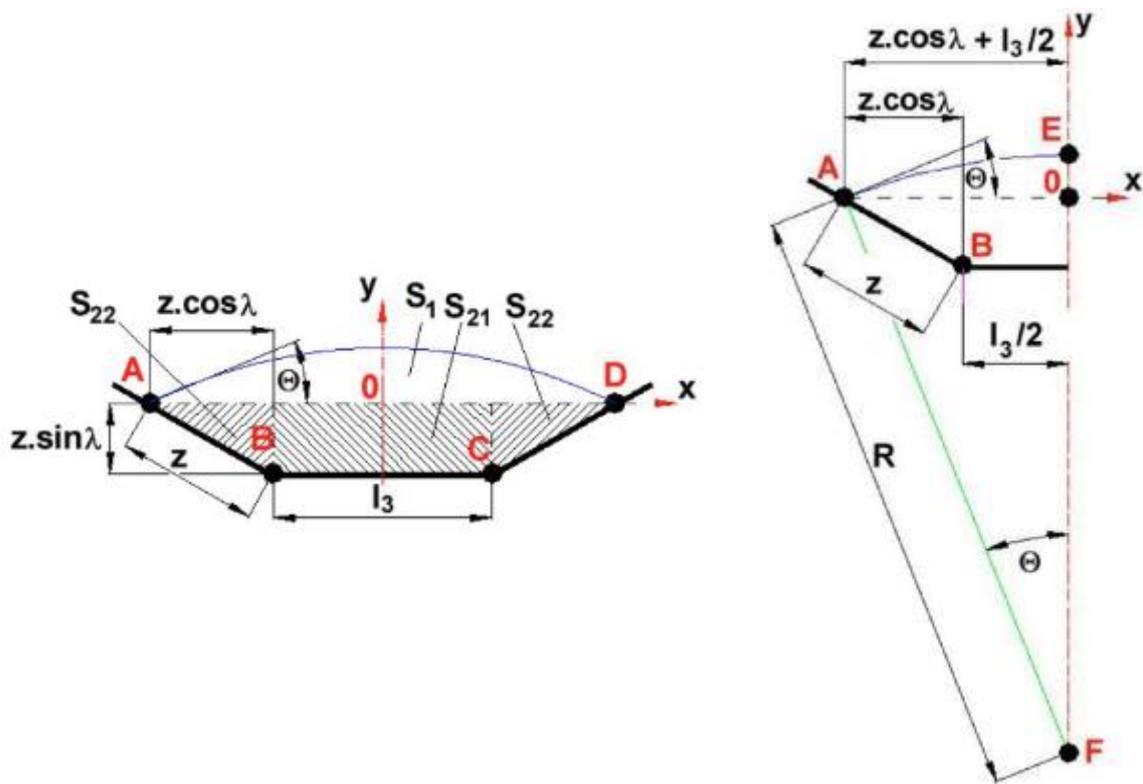


Рисунок 2.5 – Геометрія площі трапеції у жолобчастій частині стрічки

Площа трапеції визначається як:

$$S_2 = z \cdot \sin \lambda \cdot (l_3 + z \cdot \cos \lambda) \quad (2.13)$$

де  $\lambda$  – кут жолоблення роликкоопор.

Для розрахунку площі сегмента кола  $S_1$ , який утворюється над трапецією, необхідно визначити радіус дуги  $R$ :

$$R = \frac{z \cdot \cos \lambda + \frac{l_3}{2}}{\sin \Theta} = \frac{2 \cdot z \cdot \cos \lambda + l_3}{2 \cdot \sin \Theta} \quad (2.14)$$

де  $\Theta$  – кут природного укусу зерна.

Площа сектору FAEDF:

$$\pi \cdot R^2 \cdot \frac{2 \cdot \Theta}{2 \cdot \pi} = R^2 \cdot \Theta \quad (2.15)$$

Площа двох трикутників FA<sub>0</sub> і FD<sub>0</sub>:

$$\frac{1}{2} \cdot R \cdot \sin \Theta \cdot R \cdot \cos \Theta = R^2 \cdot \sin \Theta \cdot \cos \Theta \quad (2.16)$$

Площа сегмента (матеріалу, який знаходиться вище рівня трапеції) визначається як різниця між площею сектору і площами трикутників:

$$S_1 = R^2 \cdot \frac{\pi \cdot \Theta}{180} - R^2 \cdot \sin \Theta \cdot \cos \Theta = \frac{1}{2} \cdot R^2 \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot \Theta}{180} - \sin 2 \cdot \Theta \right) \quad (2.17)$$

Загальна площа  $S$  поперечного перерізу шару зерна на стрічці визначається як сума площі трапеції  $S_2$  і сегмента  $S_1$ :

$$S = S_1 + S_2 = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{2 \cdot z \cdot \cos \lambda + l_3}{2 \cdot \sin \Theta} \right)^2 \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot \Theta}{180} - \sin 2 \cdot \Theta \right) + z \cdot \sin \lambda \cdot (l_3 + z \cdot \cos \lambda) \text{ [m}^2\text{]} \quad (2.18)$$

### 2.3 Розрахунок продуктивності стрічкового транспортера

Для стрічкового транспортера шириною 1,0 м з кутом жолоблення роликів  $35^\circ$  та кутом природного укусу пшениці  $28^\circ$  було визначено корисну ширину стрічки, враховуючи частину країв, яка не заповнена зерном, щоб уникнути висипання. Горизонтальна проєкція корисної ширини склала приблизно 0,9 м, що дозволяє забезпечити безпечне транспортування зерна без втрат матеріалу.

Максимальна висота шару зерна над стрічкою становила близько 0,10 м. Поперечний профіль шару зерна мав симетричну параболічну форму. Така форма забезпечує рівномірний розподіл зерна по ширині жолоба та оптимальне використання об'єму, а також мінімальне травмування зернової маси.

Розподіл зерна у поперечному перерізі показав, що центральна частина жолоба вміщує приблизно 70 % об'єму зерна, а дві бічні ділянки – близько 30 %. Це гарантує рівномірне навантаження на роликкоопори та підтримує стабільність роботи транспортеру.

Поперечний переріз шару зерна складається з трапецієвидної частини та сегмента над трапецією. Площа трапеції склала приблизно  $0,065 \text{ м}^2$ , а площа сегмента над нею – близько  $0,020 \text{ м}^2$ . В сумі загальна площа поперечного перерізу шару зерна становила приблизно  $0,085 \text{ м}^2$ .

Завдяки такому поперечному профілю зерновий матеріал заповнює жолоб максимально ефективно, без утворення пустот і без висипання через краї стрічки. Це створює оптимальні умови для транспортування великих обсягів пшениці з мінімальними втратами.

Додатково, симетрична форма шару забезпечує:

- рівномірний розподіл навантаження на стрічку та роликоопори;
- максимальне використання об'єму жолоба без пересипання зерна;
- підтримку сипких властивостей пшениці протягом транспортування;
- стабільний потік зерна при різних швидкостях стрічки.

Продуктивність транспортера визначалася виходячи з площі поперечного перерізу шару зерна  $0,085 \text{ м}^2$  та швидкості руху стрічки  $2,5 \text{ м/с}$ . Враховуючи коефіцієнт заповнення жолоба  $0,9$ , максимальна продуктивність транспортера для пшениці становила близько  $600 \text{ т/год}$ .

Під час розрахунку враховувалися наступні параметри:

- рівномірне заповнення жолоба по всій ширині та довжині транспортера;
- частина країв стрічки, що не заповнена зерном, забезпечує безпечне транспортування без висипання;
- об'єм зерна розподілений так, щоб центральна зона жолоба несла більшу частину матеріалу, а бічні — меншу, що оптимізує навантаження на роликоопори.

Загальні висновки з розрахунку:

- Стрічковий транспортер шириною  $1 \text{ м}$ , з кутом жолоблення  $35^\circ$  та кутом природного укосу пшениці  $28^\circ$ , забезпечує високу продуктивність  $600 \text{ т/год}$ .
- Профіль шару зерна у поперечному перерізі дозволяє використовувати весь об'єм жолоба без пересипання та зберігає сипкі властивості зерна.

- Така конструкція гарантує рівномірне навантаження на роликоопори, що продовжує ресурс транспортера та зменшує енергоспоживання.

Отримані результати дають змогу прогнозувати роботу стрічкового транспортера для пшениці за різних параметрів: зміни ширини стрічки, кута жолоблення роликів або кута природного укусу зерна. Це забезпечує можливість оптимізації конструкції та режимів експлуатації транспортерів, підвищення їх продуктивності та економічної ефективності.

## 2.4 Висновки з розділу

1. У ході аналітичних досліджень процесу роботи стрічкового транспортера для зерна встановлено, що продуктивність транспортера безпосередньо залежить від геометричних параметрів жолоба (ширини стрічки, кута жолоблення роликоопор, довжини центрального ролика) та фізико-механічних властивостей сипкого матеріалу, зокрема кута природного укусу зерна.

2. Розроблена математична модель поперечного перерізу шару зерна на стрічці базується на геометричному описі насипу у вигляді параболи, параметри якої визначаються із співвідношень між висотою насипу, шириною стрічки та кутом природного укусу. Такий підхід дозволив встановити аналітичну залежність площі поперечного перерізу шару зерна від основних конструктивних параметрів транспортера.

3. Отримані рівняння для розрахунку площі поперечного перерізу (як суми площі трапеції та сегмента кола) забезпечують високу точність оцінювання корисного об'єму жолоба, що заповнюється зерном. Це, у свою чергу, дало змогу вивести формулу для визначення теоретичної продуктивності транспортера.

4. Аналітичні розрахунки показали, що для транспортера зі стрічкою шириною 1,0 м, кутом жолоблення  $35^\circ$ , кутом природного укусу пшениці  $28^\circ$  та швидкістю руху стрічки 2,5 м/с максимальна продуктивність становить близько 600 т/год.

### 3 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СТРІЧКОВОГО ТРАНСПОРТЕРУ ДЛЯ ЗЕРНА

#### 3.1 Аналіз опору сипкого зерна при деформації стрічки транспортера

Опір сипкого матеріалу до деформації стрічки слід розглядати детальніше для короткої ділянки стрічкового транспортера, що спирається на стаціонарні роликоопори з трьома роликами (рис. 3.1). При русі стрічки від однієї роликоопори до наступної її форма змінюється: після виходу із зони роликів стрічка поступово розкривається до приблизно половини відстані між роликооперами (ділянка А–С), де досягає максимальної деформації поперечного перерізу.

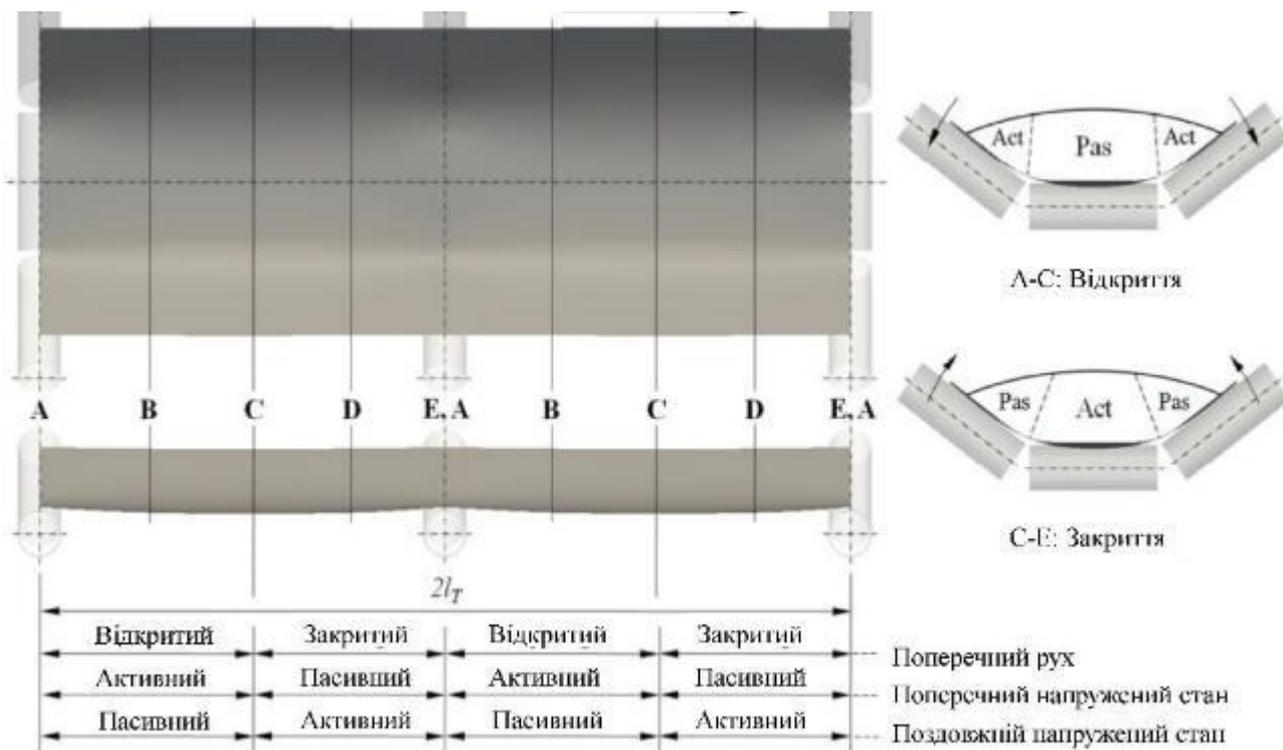


Рисунок 3.1 – Схема відкривання та закривання стрічки між трьома роликооперами та відповідні стани напруження в зерновій масі (за Вілером)

Через власну масу, жорсткість на згин і навантаження зерновим матеріалом стрічка прагне повернутися до плоского, ненавантаженого стану.

Однак цьому протидіє задана геометрія жолоблення, що створюється роликооперами, а також попереднє натягнення стрічки. Подальший рух стрічки від точки максимальної деформації до наступної роликоопори (ділянка С–Е) називають закриванням жолоба.

Процес відкривання та закривання стрічки супроводжується зміною активного і пасивного станів напружень у зерновій масі. Ці стани виникають не лише в поперечному напрямку (через форму жолоба), але й у поздовжньому напрямку – на відстані між роликооперами ( $l_T$ ). У результаті зерновий матеріал постійно зазнає чергування розпушування (активний стан) і ущільнення (пасивний стан), що безпосередньо впливає на опір руху стрічки.

Опір сипкого зерна до згинання стрічки залежить від поточного стану напружень, або точніше – від накладання поперечних і поздовжніх деформацій стрічки. Пластична деформація шару зерна починається у точці максимального прогину стрічки і закінчується біля роликоопори. Ця деформація вимагає подолання внутрішнього тертя зернового матеріалу, тому збільшення коефіцієнта внутрішнього тертя призводить до підвищення опору деформації сипкої маси. Додатково на цей опір впливає тертя між зерном і поверхнею стрічки (стінкове тертя).

Поздовжня деформація стрічки спричиняє максимальний прогин  $z_{\max}$ , який залежить від:

- лінійної ваги стрічки  $q_{\text{belt}}$ ;
- лінійної ваги зернового матеріалу  $q_{\text{bulk}}$ ;
- відстані між роликооперами  $l_T$ ;
- попереднього натягнення стрічки  $F_{\text{pre}}$ .

Згідно з DIN 22101, максимальний прогин стрічки можна визначити за наближеною формулою, що базується на параболічній залежності для гнучкого канату:

$$z_{\max} = \frac{(q_{\text{Belt}} + q_{\text{Bulk}}) \cdot l_T^2}{8 \cdot F_{\text{Pre}}}. \quad (3.1)$$

Ця формула справедлива для випадків, коли відношення  $z_{\max}/l_T < 0,02$ , що

характерно для промислових стрічкових транспортерів.

Крім навантаження, на опір деформації впливає швидкість руху стрічки  $v_{belt}$ , яка визначає динамічний характер змін напружень у зерновому шарі.

Зазначена формула описує лише поздовжню двовимірну деформацію стрічки вздовж її осі симетрії. Поперечна деформація не враховується, хоча дослідження Бегрендса показали, що ступінь розкриття жолоба суттєво залежить від навантаження та величини попереднього натягу стрічки. Повне аналітичне врахування цих ефектів ускладнене, тому для комплексного аналізу тривимірної деформації стрічки та визначення опору сипкого матеріалу при згинанні доцільно використовувати сучасні чисельні методи моделювання (метод скінченних елементів, DEM-аналіз).

Таким чином, проведений аналіз показує, що опір сипкої зернової маси при згинанні стрічки є важливим фактором енергоспоживання транспортера. Його урахування дозволяє точніше прогнозувати втрати потужності, оптимізувати конструкцію жолоба та покращити ефективність роботи стрічкових транспортерів для зерна.

### **3.2 Комбіноване моделювання FEM–DEM**

Для більш точного відтворення взаємодії між стрічкою та зерновим потоком застосовано комбіноване моделювання, що поєднує методи FEM і DEM. FEM-модель описує геометрію та деформації стрічки, а DEM-модель забезпечує розрахунок контактних сил між частинками зерна та поверхнею стрічки.

Основною складністю при поєднанні цих методів є обмін даними між ними. Геометрія сітки FEM добре підходить для відстеження сил у DEM-моделі, однак потрібно коректно ідентифікувати кожен елемент і правильно передати навантаження. Для статичного аналізу спочатку застосовувалося одностороннє з'єднання (one-way coupling), коли DEM постачає дані про

навантаження, а FEM – розраховує деформацію. Згодом було розроблено двостороннє з'єднання (two-way coupling) у програмі Simcenter Star-CCM+.

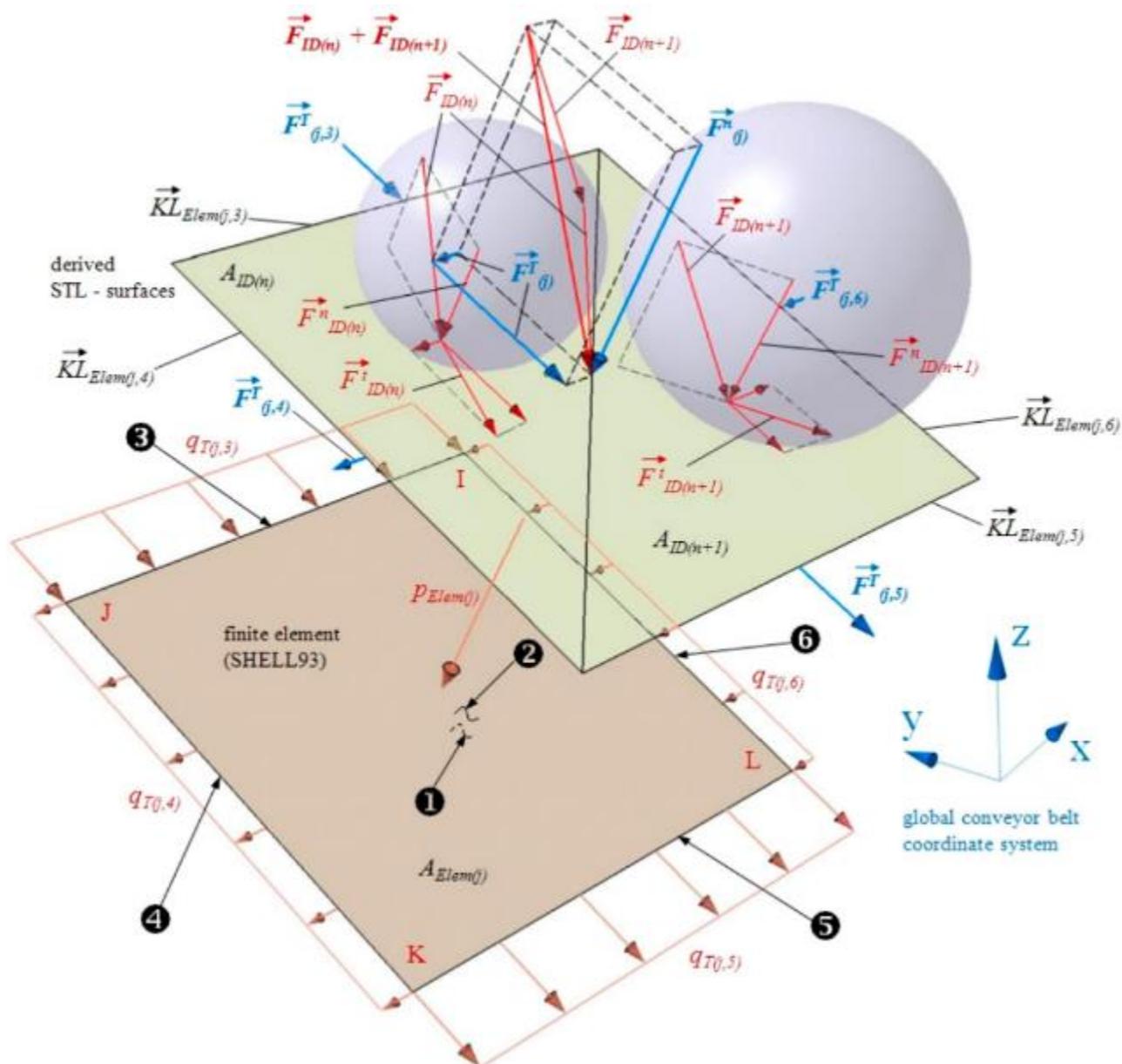


Рисунок 3.2 – Узгодження координатних систем FEM і DEM для передачі навантажень

Експорт геометрії стрічки з FEM-моделі здійснювався шляхом вивантаження координат вузлів оболонкових елементів у текстовий файл. DEM-програма створювала з цих даних площинні сегменти – аналогічно до імпорту STL-файлів. Кожен сегмент мав власний ідентифікаційний номер, і два

трикутники в DEM відповідали одному оболонковому елементу (SHELL93) у FEM.

Передача силових даних є складнішою, оскільки системи координат FEM і DEM різняться. У FEM навантаження можуть прикладатися як нормальний тиск або дотичні лінійні сили по краях елемента, тоді як у DEM сили визначаються у глобальній системі координат. Тому для кожного елемента SHELL93 потрібно було перетворювати вектори дотичних сил із DEM у локальні координати FEM.

Після створення алгоритму з'єднання проводилася DEM-симуляція з використанням геометрії стрічки у ненавантаженому стані (з урахуванням лише власної ваги та натягу). Щоб забезпечити порівнянність результатів із аналітичним методом, для генерації розподілу частинок на поверхні стрічки використовувалася та ж функція поверхні  $Z_{top}$ , що й у попередньому розрахунку.

Після досягнення стаціонарного стану (частинки майже не рухаються) для кожного сегмента стінки розраховувалися нормальні та дотичні навантаження, які експортувалися у текстовий файл. FEM-симуляція потім продовжувалася, використовуючи ці дані як вхідні навантаження на елементи оболонки.

Для автоматизації обміну даними та реалізації ефективного двостороннього з'єднання було створено керуючу програму, яка відслідковувала момент створення файлів з DEM і керувала запуском або повторним стартом відповідних симуляційних модулів.

### **3.3 Моделювання навантаження на опори стрічкового транспортера**

На основі успішної валідації модель було розширено для оцінки силових навантажень на нерухому ролюкоопору, що складалася з трьох роликів. Метою було порівняння результатів моделювання з експериментальними даними. Основні параметри випробувального стенда наведено нижче:

- ширина стрічки:  $B = 800$  мм (тканинна);
- відстань між роликоопорами:  $l_T = 1$  м;
- кут жолоблення:  $\alpha = 36^\circ$ ;
- діаметр ролика:  $d_1 = 108$  мм;
- довжина ролика:  $l_{1,2} = 315$  мм.

У моделюванні варіювалися такі параметри:

- попередній натяг стрічки  $F_{Pre} = 5 \dots 20$  кН;
- швидкість руху стрічки  $v_{Belt} = 1 \dots 6$  м/с.

Застосований зернистий сипкий матеріал без зчеплення із такими властивостями:

- насипна густина:  $\rho_b = 700$  кг/м<sup>3</sup>;
- розмір частинок:  $d_p = 10 \dots 15$  мм;
- внутрішній кут тертя:  $\varphi = 40^\circ$ ;
- кут тертя об стрічку:  $\varphi_w = 27^\circ$ ;
- динамічний кут природного укусу:  $\varphi_{aor,dyn} = 15^\circ$ .

У DEM-моделі частинки ідеалізували як сферичні зернини. Через обмеження часу обчислень реальний розподіл розмірів не враховувався повністю – модель містила частинки  $d_p = 10 \dots 15$  мм, а масу дрібних фракцій додавали до найменшої групи. Щільність частинок масштабували, щоб зберегти реальну вагу зернової маси у поперечному перерізі жолоба.

На відміну від попередніх моделей, розглядалася ділянка транспортера із трьома роликоопорами (по три ролики в кожній), довжиною  $2 \cdot l_T$ , при цьому центральна роликоопора використовувалася для вимірювань.

У моделюванні виконувалося кілька послідовних етапів (рис. 3.3):

1. Попереднє формування жолоба – стрічку деформували відповідно до геометрії роликоопори.
2. Урахування власної ваги стрічки – розрахунок її прогину без сипкого навантаження.
3. Ініціалізація контактів між стрічкою та роликами.
4. Застосування попереднього натягу стрічки ( $F_{Pre}$ ).

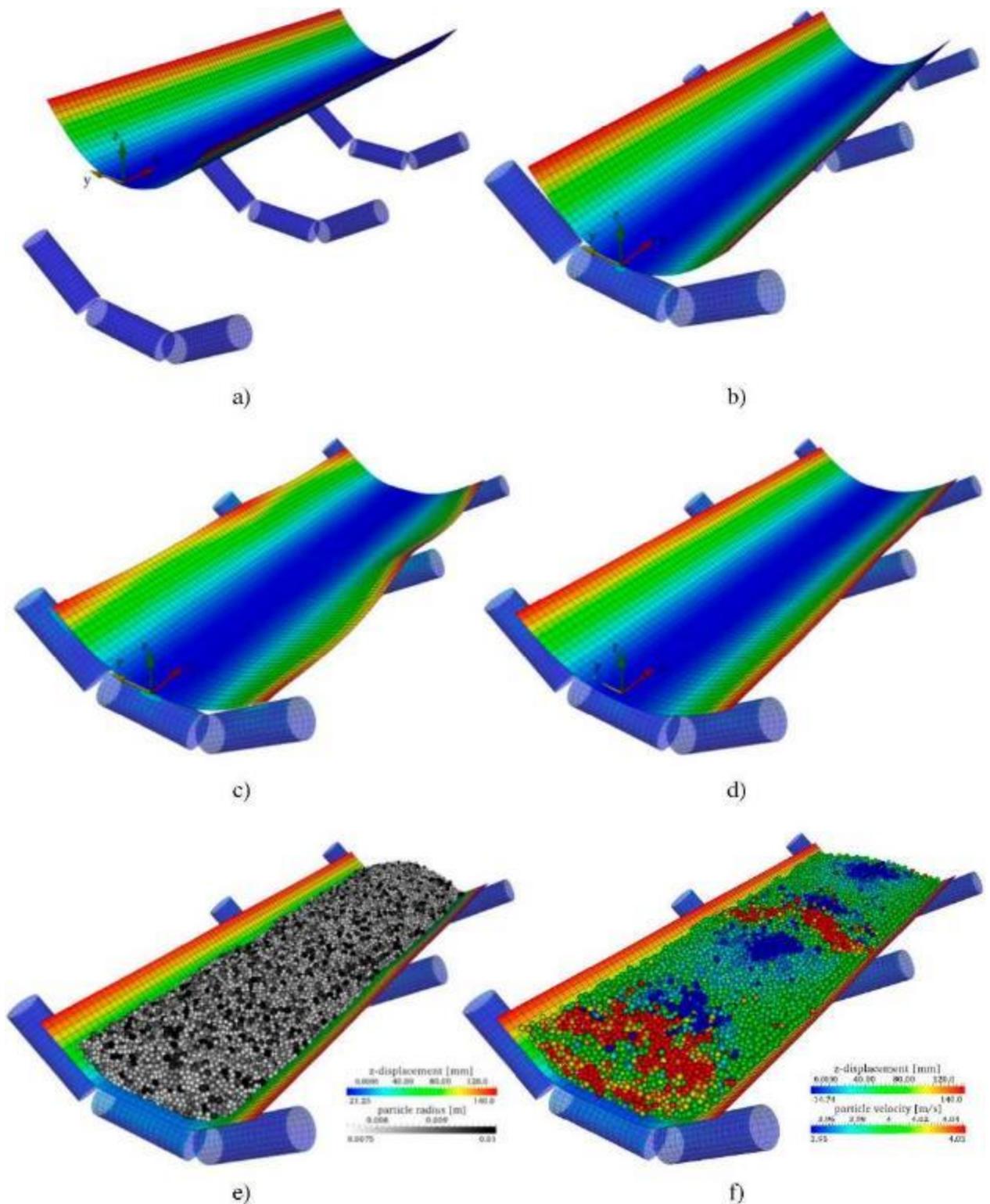


Рисунок 3.3 – Етапи поєднаного FEM-DEM моделювання завантаженого стрічкового транспортера: а) урахування власної ваги стрічки; б–с) ініціалізація контактів між стрічкою та роликооперами; д) натягування стрічки до заданого попереднього зусилля; е) завантаження стрічки зерновим матеріалом; ф) увімкнення процесу транспортування (швидкість стрічки  $v = 4$  м/с, попередній натяг  $F_p = 10$  кН); останнє зображення демонструє усталений режим роботи приблизно через 12,5 с

5. Завантаження сипким матеріалом (зерном).

6. Імітація процесу транспортування з вимірюванням реакцій на роликах.

Безперервне транспортування зерна моделювалося за допомогою періодичних граничних умов у напрямку руху.

Отримані результати дозволили встановити характер розподілу контактних сил між стрічкою та роликоопорами, а також визначити вплив швидкості руху та натягу на величину реакцій у зоні центрального ролика. Модель показала високу стабільність і точність, що підтверджує її придатність для подальших досліджень динаміки стрічкових транспортерів та оптимізації їх конструктивних параметрів.

## 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СТРІЧКОВОГО ТРАНСПОРТЕРУ ДЛЯ ЗЕРНА

### 4.1 Модель симуляції опору згину зернової маси та якісні результати

Для детального аналізу опору згину зернового матеріалу під час транспортування стрічковим транспортером проведено чисельне моделювання руху частинок у зоні роlikоопор. З цією метою модель була спрощена до 50-міліметрового шару зернової маси на стрічці (рис. 4.1). Цей шар переміщується вздовж напрямку транспортування (+x) по ділянці стрічки довжиною  $2 \cdot l$ . З обох боків шару (уздовж осі  $\pm x$ ) встановлено умовні гладкі стінки без тертя, які рухаються разом із шаром по стрічці.

Таке спрощення дозволяє врахувати реалістичний гранулометричний склад зерна з діаметром частинок  $d_p = 10 \dots 15$  мм і водночас зменшити обчислювальні витрати. Крім того, модель забезпечує можливість часового аналізу локальних силових взаємодій та поведінки зернової маси в русі.

Під час симуляції фіксувалася сума всіх контактних сил, які діють у напрямку транспортування на поверхню стрічки. Зміна цієї сили залежно від положення шару використовується для оцінки рухомого опору, спричиненого деформацією зернової маси.

На рис. 4.1 наведено візуалізацію руху зерна у поперечному перерізі шляхом фарбування частинок відповідно до їхньої швидкості у площині  $yz$ . Показано чотири послідовні перерізи, які демонструють, як зерно ущільнюється під час проходження через зону роlikоопори.

У моделі враховано лише 50-міліметровий шар із віртуальними боковими стінками без тертя. На рисунку 4.1 показано поведінку зерен за їхньою швидкістю у площині  $yz$  під час руху через роlikоопору. Параметри:  $v_{st} = 2$  м/с,  $F_{pp} = 10$  кН.

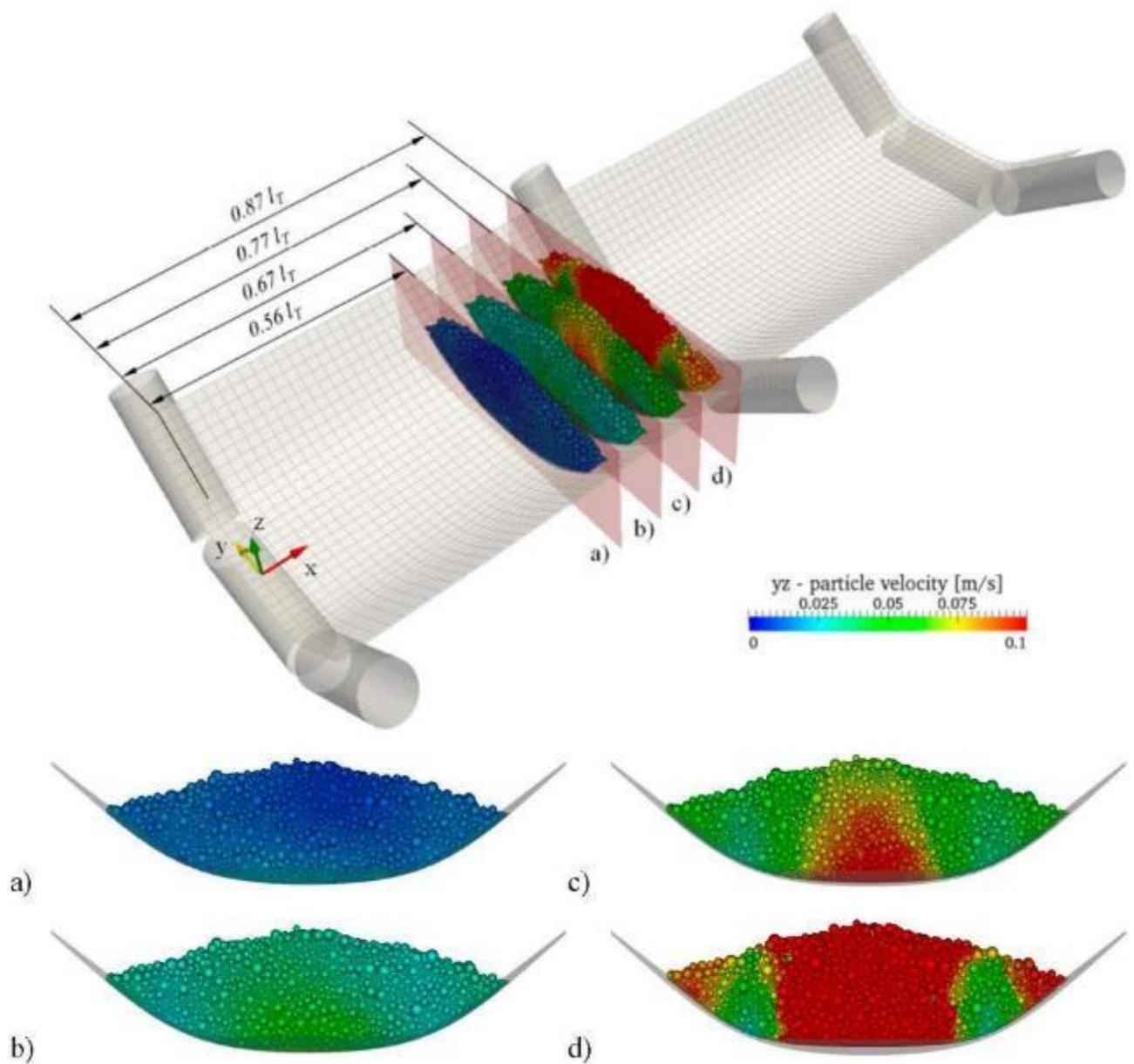


Рисунок 4.1 – Модель симуляції для аналізу опору згину зернової маси

У моделі використано попередньо розрахований прогин стрічки, отриманий шляхом поєднаного моделювання FEM-DEM для тих самих параметрів швидкості та натягу. Один із важливих результатів цього аналізу полягає в тому, що прогин стрічки між роликкоопорами є несиметричним — максимальне провисання спостерігається не в центрі ( $0,5 \cdot l_r$ ), а зміщується до наступної роликкоопори (приблизно  $0,56 \cdot l_r$ ).

У цій позиції (рис. 4.1, а) швидкість частинок у поперечному перерізі максимальна, що вказує на найвищий ступінь розпушення зернової маси. Далі

шар переміщується у положення  $0,67 \cdot l_t$  (рис. 4.1, b) і  $0,77 \cdot l_t$  (рис. 4.1, c), де спостерігається інтенсивніше прискорення частинок у центральній зоні, ніж на краях стрічки. Це пояснюється більш вираженим прогином у середній частині стрічки через її нерівномірне поперечне деформування.

Під час руху змінюється стан напруження в зерновому шарі – від активного до пасивного. Безпосередньо перед входом у роликкоопору (позиція  $0,87 \cdot l_t$ , рис. 4.1, d) у центральній зоні знову спостерігається підвищення швидкості частинок, а на зовнішніх краях також зростають локальні швидкості. Найменші швидкості фіксуються поблизу точок вигину стрічки, де поперечний прогин мінімальний.

На рис. 4.1, d чітко видно межі різких змін швидкості частинок, що свідчить про утворення зон зсуву у зерновій масі. На практиці такі зони відповідають лініям текучості, особливо помітним у випадку когезійних зернових матеріалів (наприклад, вологого зерна).

Перерізи (рис. 4.1, a–d) демонструють, що кути нахилу зон зсуву змінюються під час переходу від активного до пасивного стану напружень. У поперечному перерізі можна виділити чотири зони зсуву, тоді як у попередніх аналітичних роботах описано лише дві. З урахуванням тривимірного характеру процесу, ці зони мають форму вигнутих поверхонь зсуву, а не плоских ліній. Їхня форма та орієнтація значною мірою залежать від фізико-механічних властивостей зернової маси (вологість, гранулометрія, кут внутрішнього тертя).

## **4.2 Кількісні результати моделювання процесу транспортування зерна**

На рисунках 4.2–4.5 подано результати чисельного моделювання сумарних контактних сил у напрямку транспортування (вісь  $x$ ) залежно від відстані між роликкооперами ( $l_t$ ).

Додатні контактні сили між зерновими частинками та поверхнею стрічки інтерпретуються як опір руху, що діє проти напрямку транспортування.

Пікові значення сили в інтервалі  $0,87...0,9 \cdot t_c$  відповідають моменту, коли шар зерна проходить зону жолоблення у місці розташування роликкоопори.

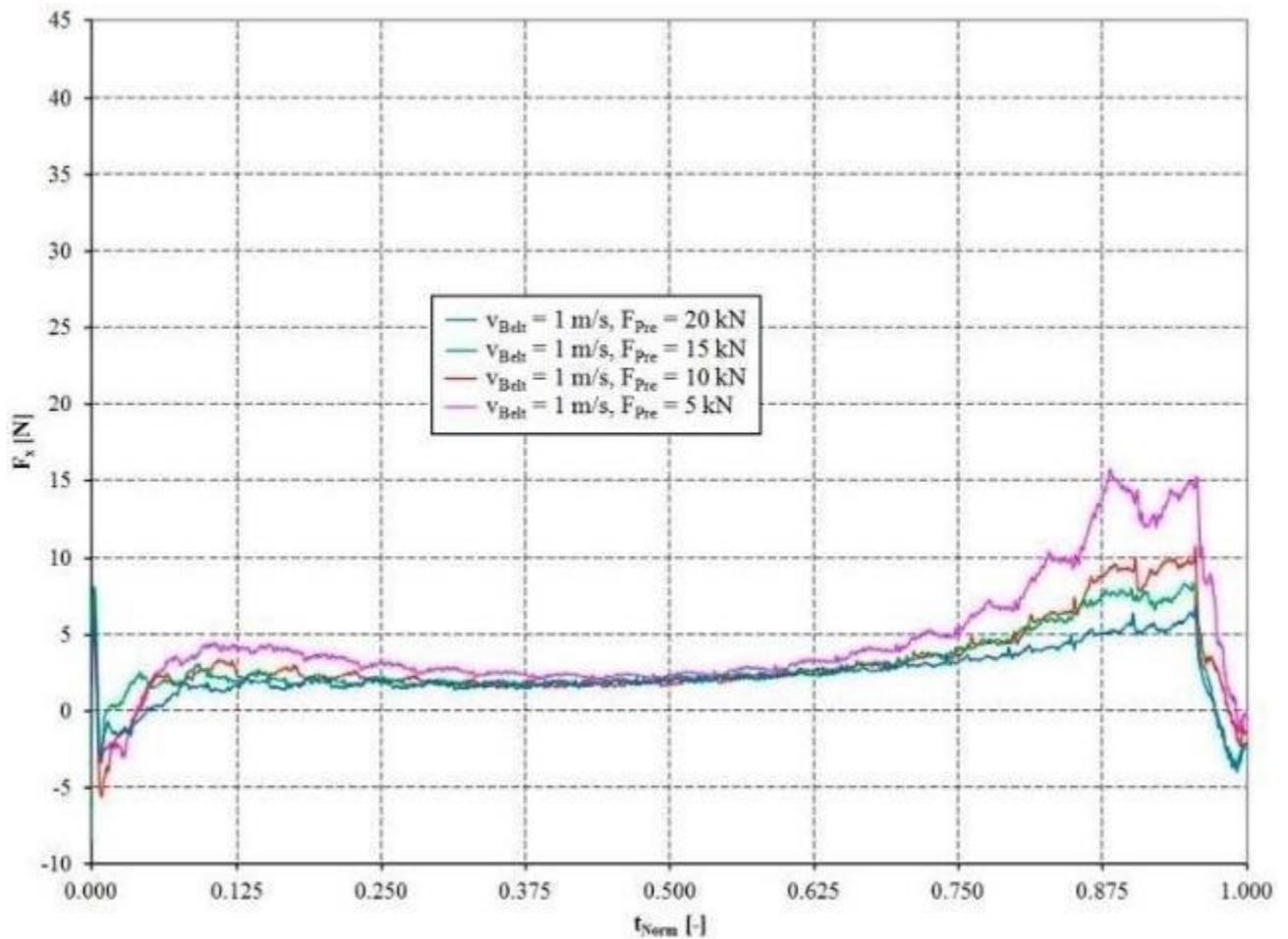


Рисунок 4.2 – Загальна сила контакту  $F_x$ , спрямована проти напрямку руху стрічки, для  $v_{belt} = 1$  м/с і  $F_{pre} = 5–20$  кН між двома роликкоопорами, виражена у безрозмірній формі за нормалізованим часом  $t_{norm}$

У процесі транспортування зернового шару ці сили виникають постійно на кожній опорі, що призводить до зростання енергоспоживання приводу транспортерної стрічки.

Вимірjana сумарна сила в моделі характеризує опір згину зернової маси, який формується внаслідок таких чинників.

Ущільнення шару зерна та відповідні контактні сили при його проходженні через роликкоопору. Величина цих сил залежить від коефіцієнта тертя частинок між собою ( $\mu_p$ ) і коефіцієнта кочення ( $\mu_r$ ). Обидва параметри на мікрорівні визначають

ефективний кут внутрішнього тертя зернової маси на макрорівні.

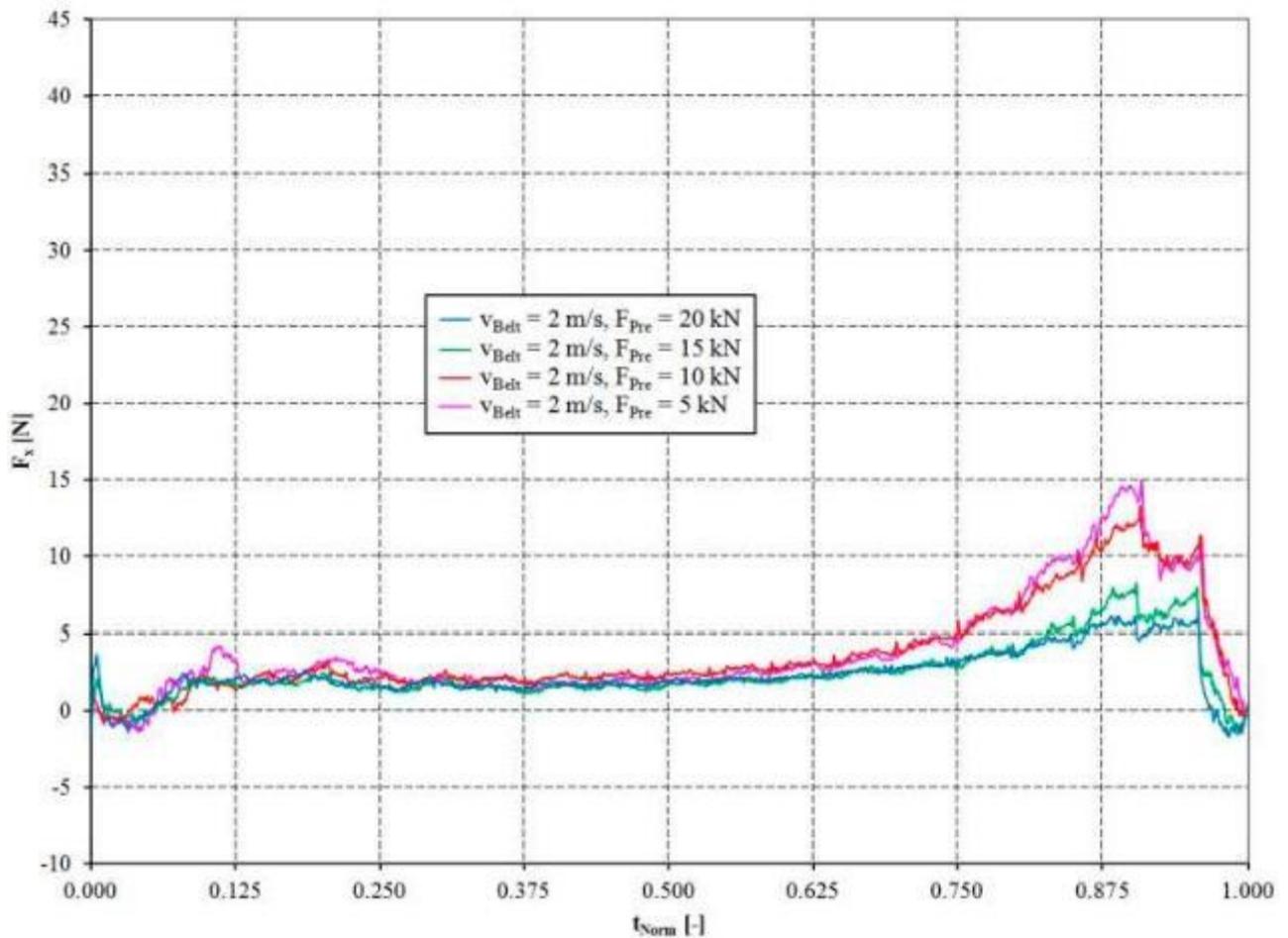


Рисунок 4.3 – Загальна сила контакту  $F_x$ , спрямована проти напрямку руху стрічки, для  $v_{belt} = 2$  м/с і  $F_{pre} = 5\text{--}20$  кН між двома роликоопорами, виражена у безрозмірній формі за нормалізованим часом  $t_{norm}$

Тертя між зернами та поверхнею стрічки, що враховується як у реальному процесі, так і в моделі через кут тертя стінки.

Гранулометричний склад зерна (розподіл частинок за розмірами), який суттєво впливає на величину опору.

Щоб забезпечити порівняння результатів при різних швидкостях стрічки та відстанях між роликоопорами, введено нормалізований час  $t_{norm}$ :

- $t_{norm} = 0$  – момент, коли шар зерна залишає першу роликоопору;
- $t_{norm} = 1$  – момент досягнення наступної роликоопори.

Оскільки у моделі відстань між опорами встановлено  $l_t = 1$  м, числове значення

$t_{\text{ном}}$  відповідає фактичному положенню шару зерна між ними.

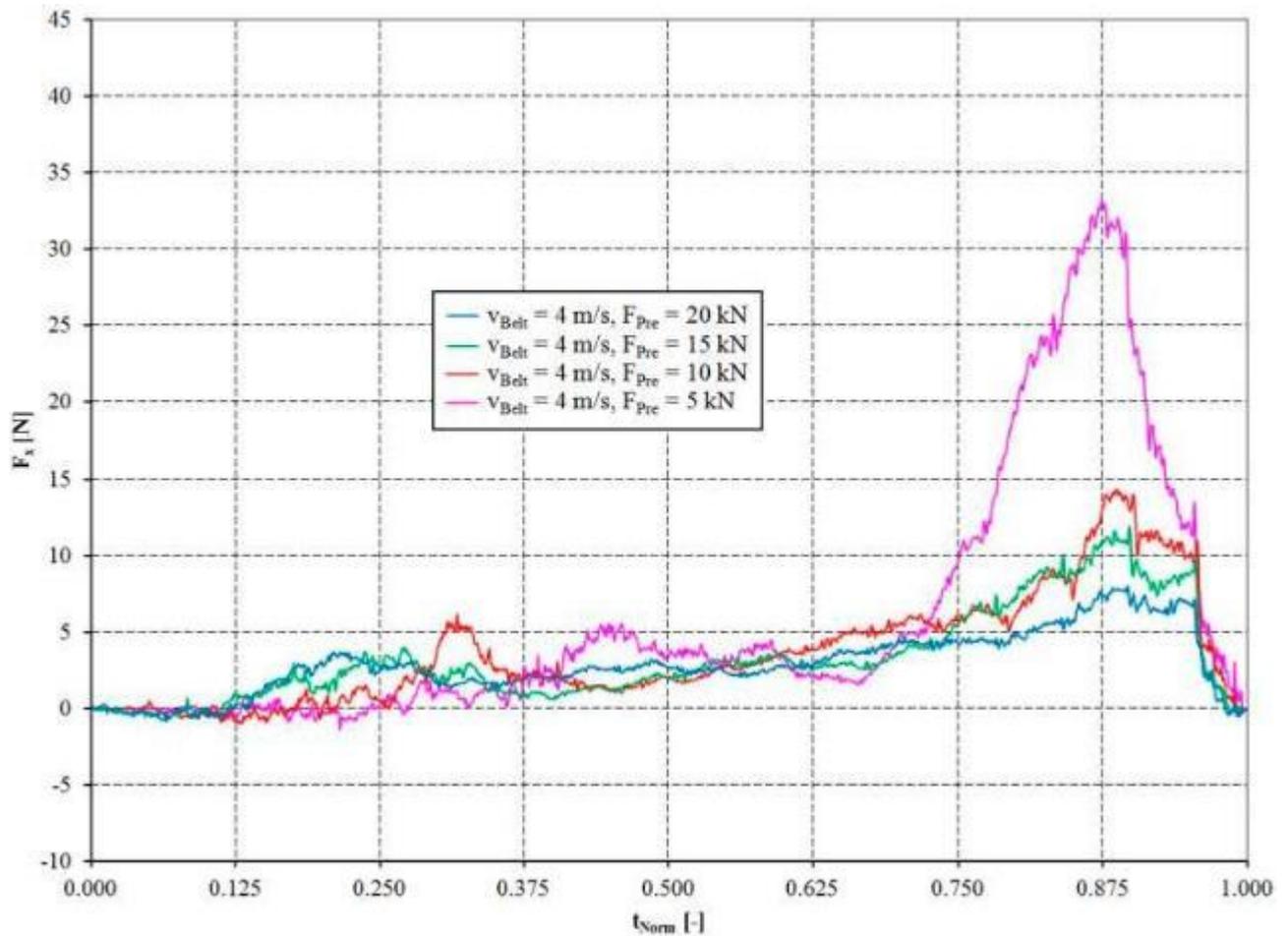


Рисунок 4.4 – Загальна сила контакту  $F_x$ , спрямована проти напрямку руху стрічки, для  $v_{\text{belt}} = 4$  м/с і  $F_{\text{pre}} = 5\text{--}20$  кН між двома роlikоопорами, виражена у безрозмірній формі за нормалізованим часом  $t_{\text{ном}}$

Як і очікувалось, найбільший опір згину зернової маси спостерігається при високих швидкостях руху стрічки та малих силах попереднього натягу. Зазначимо, що при найменшому натязі  $F_{\text{pre}} = 5$  кН відносно провисання стрічки становить  $z_{\text{max}}/l_t > 0,025$ , що перевищує типові практичні значення, однак дозволяє оцінити вплив параметрів на характер опору.

Згідно з графіками (рис. 4.2–4.5), контактні сили залишаються близькими до нуля доти, поки шар не досягне зони максимального провисання стрічки. Після позиції  $0,5 \cdot l_t$  сила починає зростати, досягаючи максимуму при  $0,87 \dots 0,9 \cdot l_t$ , після чого різко зменшується, іноді переходячи у від'ємні значення.

Це підтверджує, що момент контакту зернової маси з роликком відбувається трохи раніше, ніж досягнуто площини симетрії роликкоопори (yz-площина). Зменшення сил після  $0,9 \cdot l_1$  свідчить про те, що зерно частково відривається від поверхні стрічки, навіть при низьких швидкостях і великих натягах. Проте відстань такого «перекидання» зерна незначна, і візуально цей ефект майже непомітний.

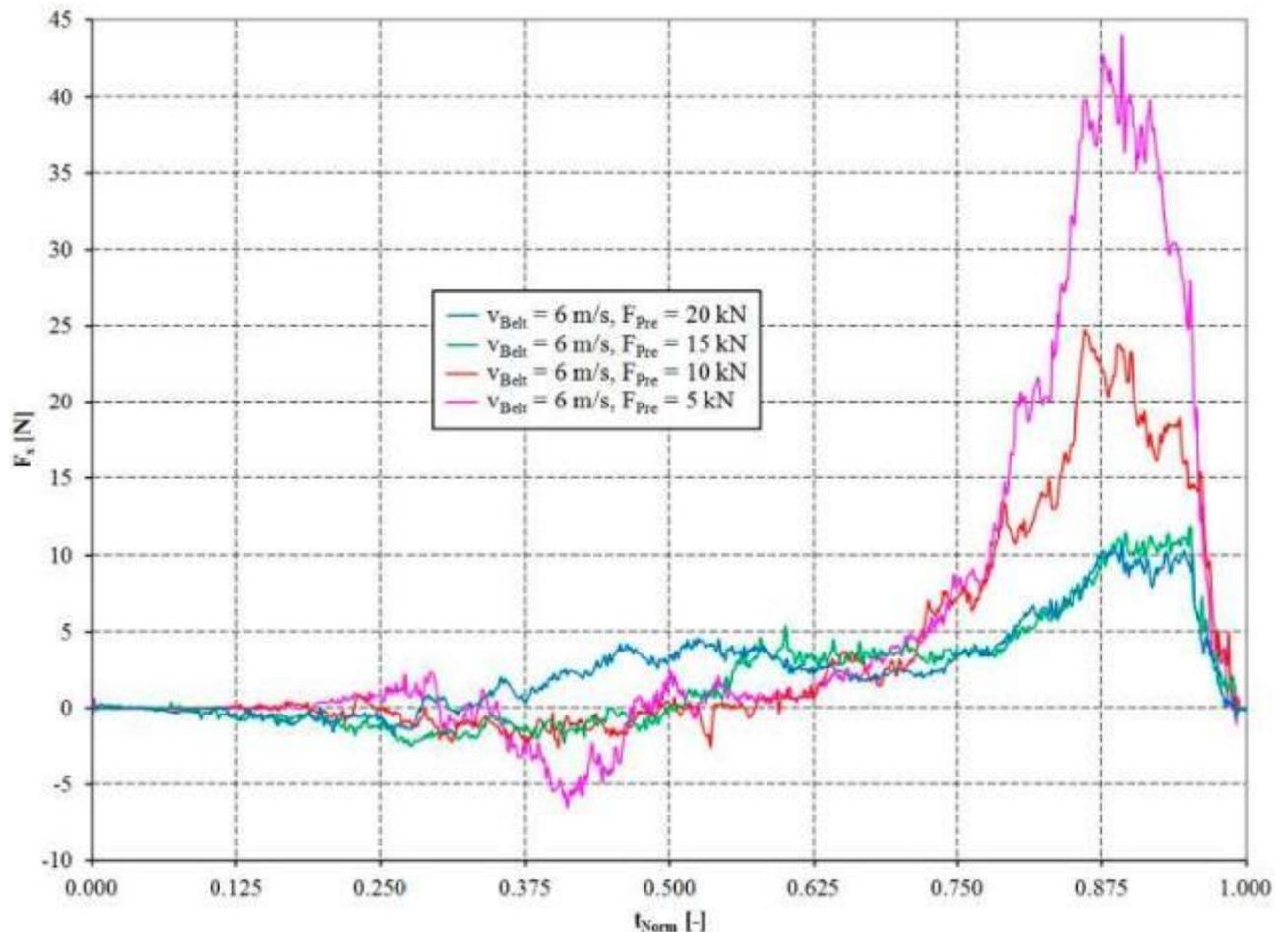


Рисунок 4.5 – Загальна сила контакту  $F_x$ , спрямована проти напрямку руху стрічки, для  $v_{belt} = 6 \text{ м/с}$  і  $F_{pre} = 5\text{--}20 \text{ кН}$  між двома роликкоопорами, виражена у безрозмірній формі за нормалізованим часом  $t_{norm}$

Оскільки модель зведена до вузького шару зернової маси, отримані сили варто розглядати якісно, а не кількісно.

Для забезпечення кількісної оцінки проведено нормалізацію пікових значень сили (у позиції  $0,87 \dots 0,9 \cdot l_1$ ) відносно найменшого максимуму, отриманого при  $v_{st} =$

1 м/с і  $F_{pre} = 20$  кН.

Отримані нормалізовані значення сил  $F_{norm}$  наведено: на рис. 4.6 – у залежності від попереднього натягу стрічки; на рис. 4.7 – у залежності від швидкості транспортування зерна.

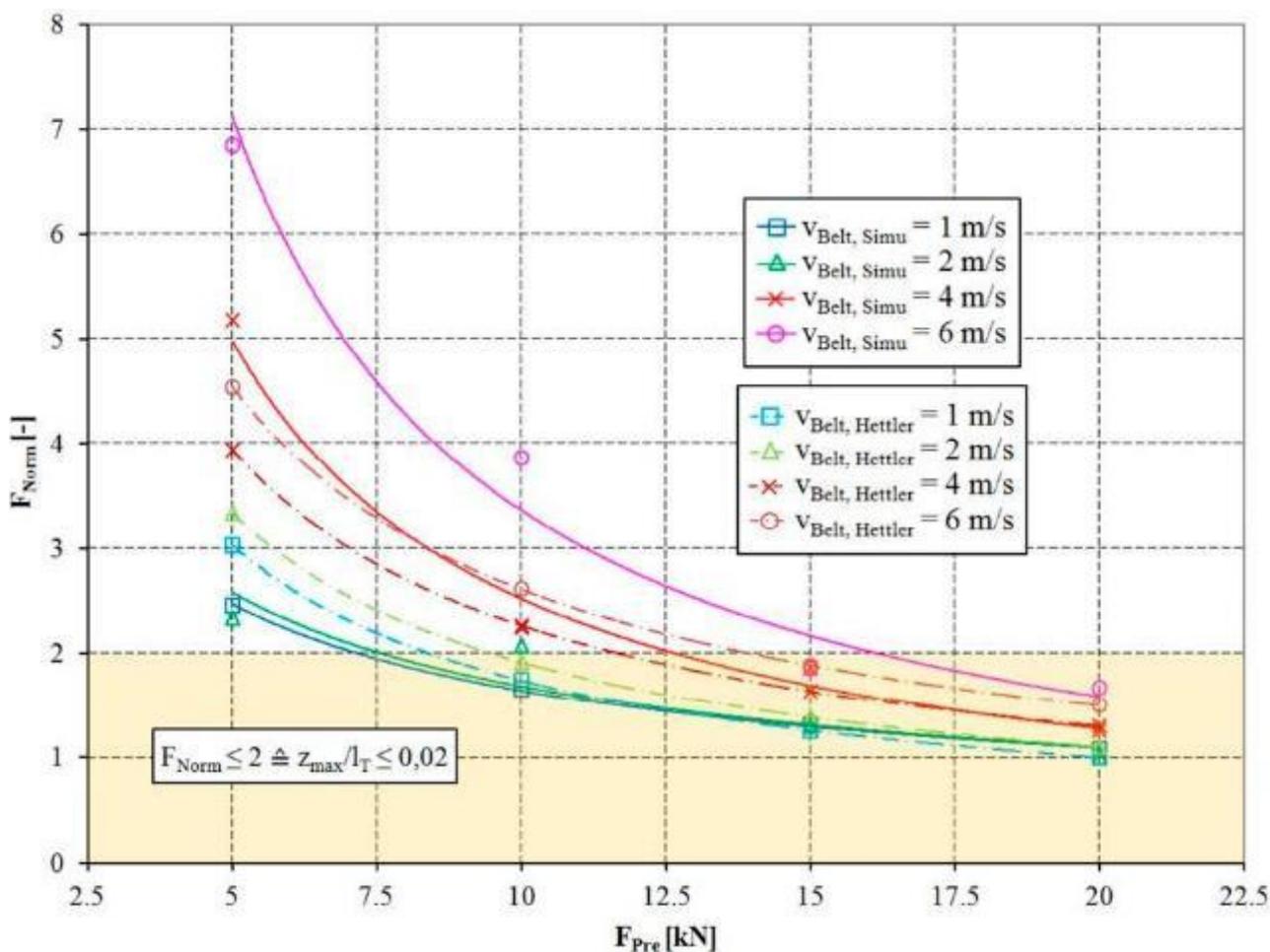


Рисунок 4.6 – Максимальні контактні сили за даними рис. 4.2–4.4, нормалізовані до найменших максимальних сил для параметрів  $v_{belt} = 1$  м/с і  $F_{pre} = 20$  кН, залежно від сили попереднього натягу. Світло-червона область показує ділянку для малих прогинів стрічки, де  $F_{Norm} < 2$ .

Аналітичне рівняння для опору вигину стрічки на основі досліджень. Цей підхід, наведений у рівнянні, представляє особливий інтерес для практичних коефіцієнтів прогину  $z_{max}/l_T \leq 0,02$  і може бути використаний для оцінки визначених нормалізованих сил  $F_{Norm}$  у моделюванні

$$U''_{BL} = 1.321 \cdot F_{Pre}^{-0.8} (F_B + F_L)^{1.4} \quad (4.1)$$

де  $F_B$  – вага стрічки, а  $F_L$  – вага зернового вантажу на відстані  $l_T$ .

Розширимо рівняння (4.1), щоб врахувати швидкість руху стрічки, наступним чином:

$$U''_{BL(v)} = 0.9 \cdot U''_{BL} + c_v \cdot v_{Belt} \cdot U''_{BL} \quad (4.2)$$

Так званий коефіцієнт швидкості був визначений як  $c_v = 0,1$ . Рівняння (4.2) дозволяє розрахувати загальний опір вигину як суму опору вигину стрічки та опору вигину зернового матеріалу.

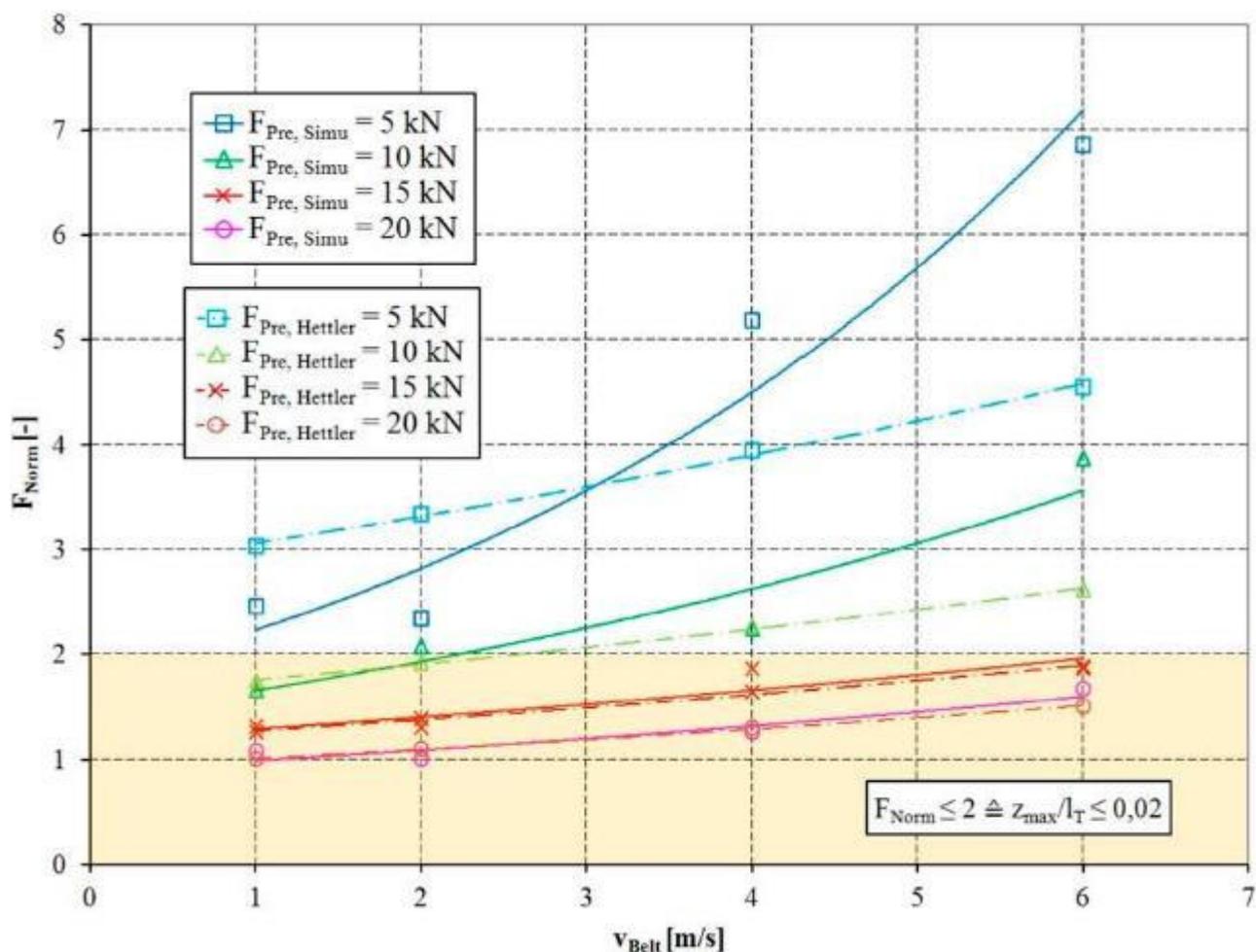


Рисунок 4.7 – Максимальні контактні сили за даними рис. 4.2–4.5, нормалізовані до найменших максимальних сил для параметрів  $v_{Belt} = 1$  м/с і  $F_{Pre} = 20$  кН, залежно від швидкості стрічки. Світло-червона зона показує область для малих коефіцієнтів прогину, де  $F_{Norm} < 2$ .

Щоб дозволити приблизну оцінку тільки гнучкості масового зернового шару на стрічковому транспортері, можна використовувати співвідношення між загальним опором руху, гнучкістю стрічки та гнучкістю масового зерна, як наведено в додатку до DIN 22101.

Підсумовуючи результати на рис. 4.6 і 4.7, можна констатувати, що гнучкість масового зернового шару (символізована через значення  $F_{\text{Norm}}$ ) зростає сильно та нелінійно при зменшенні переднатягу стрічки та збільшенні швидкості її руху. Для практично важливих прогинів стрічки ( $z_{\text{max}}/l_T < 0,02$ ) гнучкість зернового шару може подвоїти своє значення. При цих прогинах залежність  $F_{\text{Norm}}$  від переднатягу стрічки майже лінійна.

Для високих значень переднатягу стрічки  $F_{\text{Norm}}$  зростає майже лінійно зі збільшенням швидкості руху стрічки (рис. 4.7). Лише при низьких переднатягах нормалізована сила демонструє нелінійне зростання зі збільшенням швидкості стрічки.

Порівняння результатів моделювання з емпіричним підходом за формулою (4.2) показує дуже хорошу кореляцію, особливо для високих переднатягів та більшості параметрів, що дають прогини стрічки  $z_{\text{max}}/l_T \leq 0,02$ .

### 4.3 Прогноз прогину стрічки зернового транспортера

На рисунках 4.8 та 4.9 наведено основні результати дослідження, що дозволяють порівняти симульований та вимірний прогин стрічки порожнього та навантаженого стрічкового транспортера. Для початкових експериментів використовувалися такі параметри:

- Стрічка тканинна: товщина 11 мм
- Ширина стрічки: 1 м
- Відстань між роликоопорами: 1,6 м
- Натяг стрічки: 16 кН

Для порівняння застосовувалися поперечний переріз стрічки у позиції  $x = 750$  мм (рис. 4.8) та подовжній переріз уздовж осі симетрії стрічки (рис. 4.9).

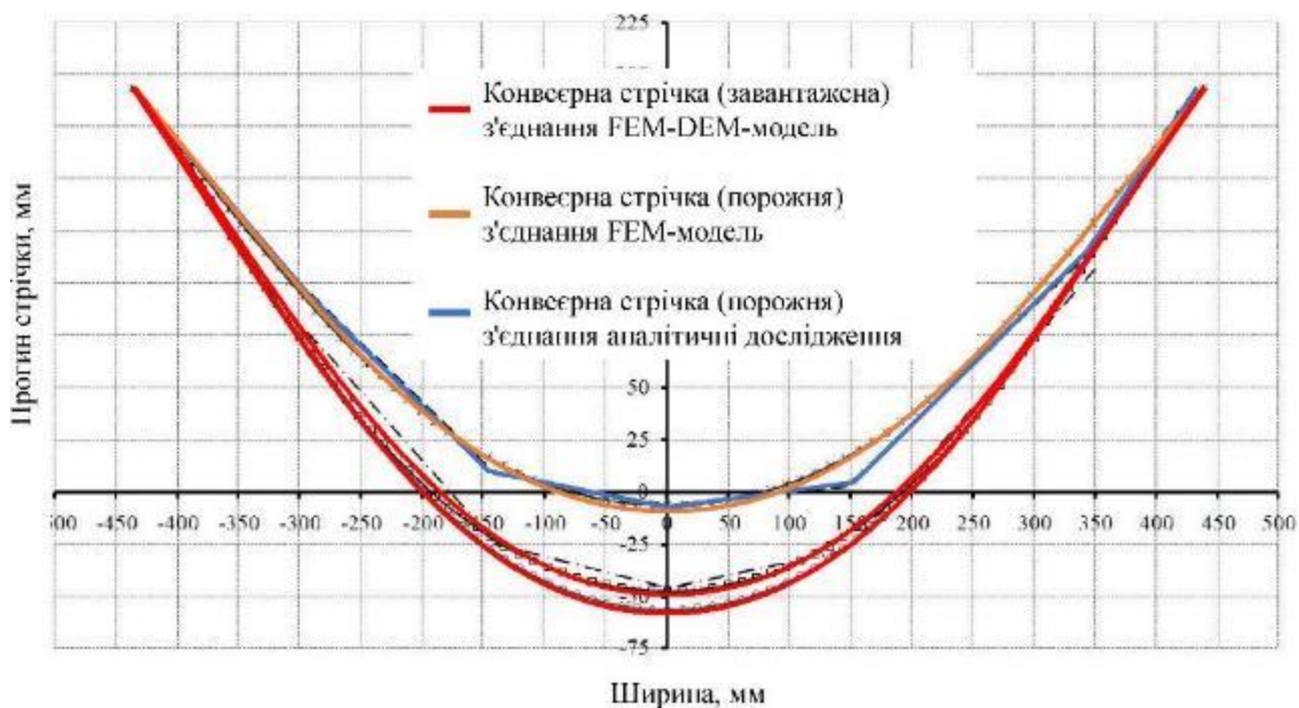


Рисунок 4.8 – Прогин стрічки поперек напрямку транспортування – результати експерименту та моделювання

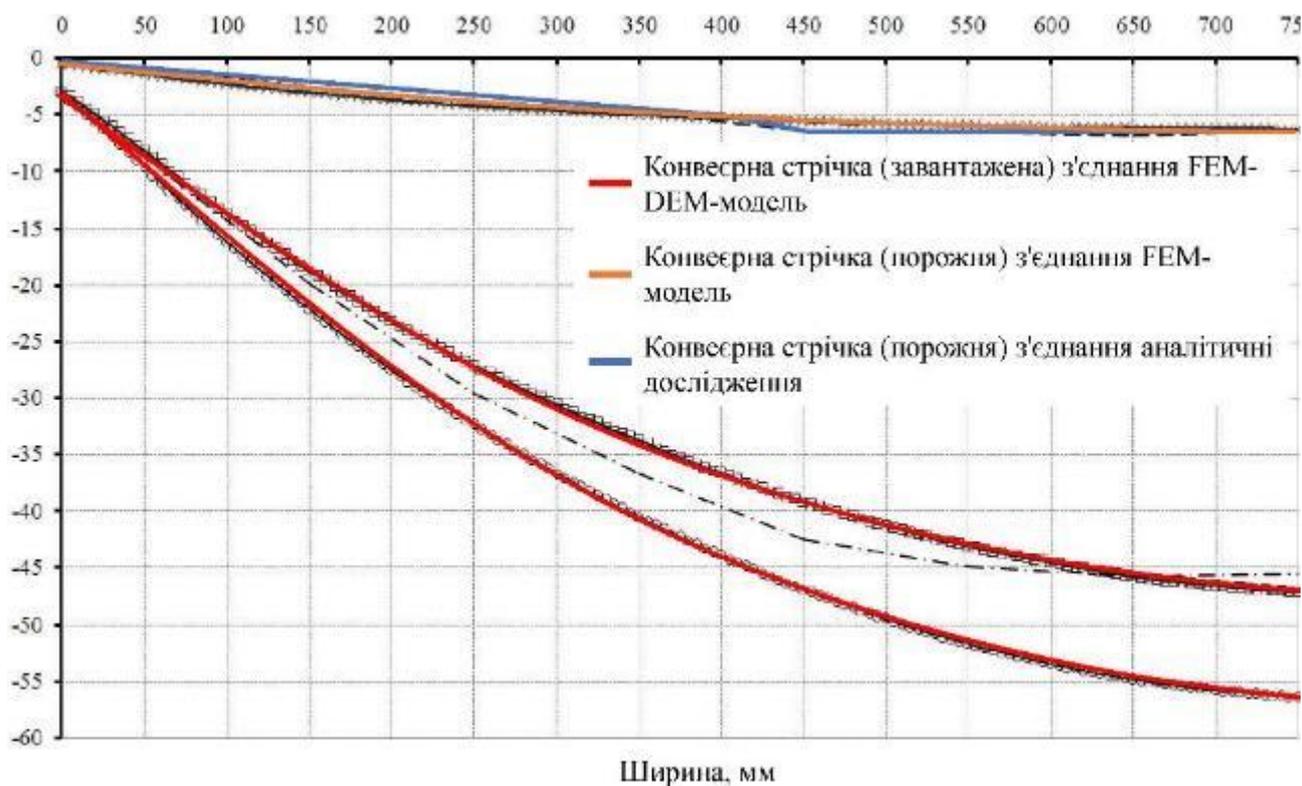


Рисунок 4.9 – Прогин стрічки уздовж напрямку транспортування – результати експерименту та моделювання

Результати моделювання показали, що деформація стрічки без навантаження (враховано лише власну вагу та натяг) добре узгоджується з очікуваними аналітичними значеннями як для поперечного (рис. 4.8), так і для подовжнього (рис. 4.9) прогинів. Це підтверджує коректність обраних параметрів модуля зсуву матеріалу та алгоритму прикладання навантаження в моделі.

Для навантаженого стану було виявлено, що використання спрощеного аналітичного підходу призводить до переоцінки впливу навантаження зернової маси на стрічку. У той же час результати поєднаного моделювання методом кінцевих елементів (FEM) і методом дискретних елементів (DEM) демонструють кращу відповідність фізичним очікуванням та реальній поведінці стрічки.

Таким чином, поєднаний підхід FEM–DEM забезпечує більш точне відтворення процесів деформації стрічки та взаємодії з зерновим матеріалом, що є важливим для розрахунку енергетичних витрат, оцінки гнучкості транспортної системи та підвищення ефективності транспортування зерна.

Розроблена модель може бути використана для подальшого аналізу більш складних систем, зокрема трубчастих або жолобчастих стрічкових транспортерів, а також для оптимізації конструктивних параметрів стрічки з урахуванням властивостей зернової маси.

#### **4.4 Висновки з розділу**

Проведене чисельне моделювання дозволило детально дослідити поведінку зернової маси під час транспортування стрічковим транспортером та оцінити опір згину масового зерна. Зокрема, були встановлені такі ключові результати:

1. Несиметричний прогин стрічки між роликкооперами: максимальне провисання не спостерігається в центрі, а зміщується до наступної роликкоопори, що впливає на локальну швидкість частинок і ступінь розпушення зернової маси.
2. Розподіл швидкостей зернових частинок у поперечному перерізі показав,

що центральна зона шару прискорюється більше, ніж бокові ділянки, через нерівномірне поперечне прогинання стрічки. Найменші швидкості спостерігаються у зонах вигину стрічки.

3. Утворення зон зсуву у зерновій масі, які змінюють свій нахил під час переходу від активного до пасивного стану напружень. У поперечному перерізі можна виділити до чотирьох таких зон, що мають вигнуту тривимірну форму та залежать від фізико-механічних властивостей зерна (вологість, гранулометрія, кут внутрішнього тертя).

4. Сумарні контактні сили між зерном та стрічкою характеризують опір згину масового шару. Пікові значення цих сил спостерігаються при проходженні шару через зоновану ділянку роликоопори (0,87–0,9·l). Опір згину зростає при високих швидкостях транспортування та малому переднатягу стрічки, а при великих натягах він залежить майже лінійно від швидкості.

5. Нормалізовані сили  $F_{\text{Nom}}$  дозволяють порівнювати опір зернового шару для різних параметрів транспортування. Для практично важливих прогинів стрічки ( $z_{\text{max}}/l_T < 0,02$ ) гнучкість масового зерна може подвоїтися при зменшенні переднатягу і збільшенні швидкості стрічки.

6. Висока кореляція з емпіричними підходами (DIN 22101): результати моделювання добре узгоджуються з практичними даними для прогинів стрічки  $z_{\text{max}}/l_T \leq 0,02$ , підтверджуючи достовірність чисельної моделі.

Таким чином, суміщене FEM-DEM моделювання забезпечує можливість прогнозування локальних і глобальних силових характеристик зернового шару на стрічковому транспортері, дозволяючи аналізувати вплив переднатягу стрічки, швидкості транспортування та властивостей зерна на опір згину і енергоспоживання. Ці результати можуть бути використані для оптимізації конструкції транспортерів та режимів їх експлуатації, а також для подальшого дослідження ефектів ширших стрічок, більших відстаней між роликооперами та когезійних зернових матеріалів.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Питання охорони праці та безпеки у процесах транспортування і зберігання зерна мають першочергове значення, оскільки ці операції пов'язані з підвищеним ризиком травмування працівників, виникнення пожеж і вибухів, утворення пилу, а також з можливістю негативного впливу на навколишнє середовище. Зерно, як сипкий органічний матеріал, має властивість пилити, електризуватися, накопичувати тепло і вологу, що створює передумови для самозаймання, псування та вибухонебезпечних ситуацій. Тому під час організації технологічних процесів на зернопереробних підприємствах необхідно забезпечувати системний підхід до охорони праці, який включає технічні, організаційні, санітарно-гігієнічні, пожежні та екологічні заходи.

Організація робіт повинна здійснюватися відповідно до Закону України «Про охорону праці», Правил охорони праці у сільськогосподарському виробництві, Правил пожежної безпеки в Україні (НАПБ А.01.001-2014), Державних санітарних норм мікроклімату виробничих приміщень (ДСН 3.3.6.037-99) та інших нормативних документів. Кожен працівник, який бере участь у процесах транспортування, сушіння, очищення або зберігання зерна, повинен пройти навчання та інструктаж з безпеки праці, знати розташування засобів пожежогасіння, аварійних виходів та засобів індивідуального захисту.

Під час роботи стрічкових транспортерів, шнеків, норій і елеваторних установок основними небезпечними факторами є рухомі елементи машин, які можуть спричинити травмування рук або одягу працівників; підвищена запиленість повітря, що викликає захворювання органів дихання; шум і вібрація, які негативно впливають на слух і нервову систему; а також небезпека займання або вибуху зернового пилу. Зерновий пил у суміші з повітрям за певних умов (при концентрації близько  $60 \text{ г/м}^3$ ) є вибухонебезпечним, і навіть незначна іскра, перегрів електродвигуна або електростатичний розряд можуть стати джерелом займання.

Для запобігання травматизму всі рухомі частини транспортного обладнання повинні бути закриті захисними кожухами. Забороняється очищати або ремонтувати стрічку транспортера під час його роботи, а також перебувати в зоні руху стрічки чи приводного барабана. Перед пуском транспортера оператор зобов'язаний переконатися у відсутності людей на робочій ділянці. Всі пускові пристрої мають бути обладнані попереджувальними сигналами, а електродвигуни – надійно заземлені для запобігання статичним розрядам.

Одним із найважливіших заходів є зниження запиленості робочого середовища. Для цього передбачаються аспіраційні системи, які видаляють пил у місцях пересипання зерна, завантаження або розвантаження транспортних потоків. Пил уловлюється у циклонах або фільтрах і надалі утилізується. Концентрація пилу у повітрі робочої зони не повинна перевищувати граничнодопустимих норм, встановлених ДСП 201-97. Для індивідуального захисту працівники повинні використовувати респіратори, захисні окуляри, рукавиці та спецодяг з антистатичними властивостями.

Під час зберігання зерна у силосах або складах необхідно забезпечити належний мікроклімат. Оптимальна температура зберігання становить 10–18 °С, вологість зерна не повинна перевищувати 14 %, а відносна вологість повітря – 75 %. При підвищенні температури вище 25 °С необхідно негайно вживати заходів для аерації або переміщення зерна, щоб запобігти його самозігріванню та псуванню. Вентиляційні системи мають забезпечувати рівномірний розподіл повітря по всій висоті зернової маси.

Особливу увагу необхідно приділяти безпеці під час роботи у силосах та бункерах. Перед спуском у такі приміщення слід перевіряти газовий склад повітря на вміст кисню (не менше 19 %) та відсутність шкідливих газів – вуглекислого газу, метану або аміаку. Працівники, що спускаються до силосу, повинні бути забезпечені страхувальними поясами, касками, ізолюючими протигазами та засобами зв'язку. Забороняється перебування у силосі без страхувального спостерігача на поверхні.

Важливим напрямом охорони праці є забезпечення пожежної безпеки. Усі приміщення для зберігання і транспортування зерна мають бути обладнані системами пожежної сигналізації, первинними засобами пожежогасіння (вогнегасниками, ящиками з піском, водяними бочками), а у великих зерноскладах доцільно встановлювати автоматичні пінні або порошкові установки. Забороняється використання відкритого вогню, паління, проведення зварювальних робіт у зерноскладах без спеціального дозволу. Всі електроприлади повинні бути вибухозахищеного виконання, а електромережі – періодично перевірятися на справність ізоляції.

У разі виникнення надзвичайної ситуації (пожежі, вибуху, руйнування конструкцій або витoku газів) працівники повинні діяти відповідно до затвердженого плану евакуації. При пожежі необхідно негайно повідомити пожежну службу, зупинити роботу обладнання, відключити електроживлення і розпочати гасіння вогню наявними засобами. Усі евакуаційні виходи мають бути позначені, освітлені та завжди вільні від перешкод. При виявленні людей, які зазнали отруєння або опіків, слід негайно надати першу допомогу та викликати медичну службу.

Санітарно-гігієнічні умови на підприємстві повинні відповідати чинним нормам. Повітря робочої зони очищується від пилу, шкідливих газів і парів за допомогою загальнообмінної і місцевої вентиляції. Освітленість робочих місць має бути не менше 200 лк, рівень шуму – не перевищувати 80 дБ. Працівникам необхідно забезпечувати доступ до питної води, санітарно-побутових приміщень і медичного пункту.

Важливим аспектом є охорона навколишнього середовища. Викиди зернового пилу та органічних залишків у атмосферу повинні мінімізуватися шляхом встановлення пиловловлювачів і фільтраційних установок. Зернові відходи заборонено скидати у водойми або на відкритий ґрунт; вони підлягають збору та утилізації або можуть використовуватись у кормових цілях після контролю якості. Паливо-мастильні матеріали повинні зберігатися у герметичних ємностях із протипожежним захистом.

Комплексне дотримання вимог охорони праці під час транспортування і зберігання зерна дозволяє мінімізувати ризики травматизму, аварій і пожеж, забезпечити безпечні умови праці, зберегти якість продукції та запобігти шкоді довкіллю. Впровадження сучасних систем аспірації, автоматичного контролю температури та вологості, а також регулярне навчання персоналу формує культуру безпечного виробництва і гарантує стабільність технологічного процесу навіть за складних умов експлуатації.

Таким чином, охорона праці при роботі з зерновими масами є невід'ємною частиною технологічного циклу. Її ефективна організація передбачає дотримання вимог техніки безпеки, санітарії, електробезпеки, пожежної та екологічної безпеки, що в комплексі забезпечує зниження виробничих ризиків і збереження життя та здоров'я працівників.

## 6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СТРІЧКОВОГО ТРАНСПОРТЕРУ ДЛЯ ЗЕРНА

### 6.1 Вихідні дані для розрахунків

Одним із найважливіших критеріїв оцінки технічних рішень у галузі механізації сільськогосподарського виробництва є їх економічна ефективність. Будь-яке удосконалення конструкції машин або технологічних процесів повинно бути не лише технічно обґрунтованим, але й економічно доцільним. Тому під час розроблення нових або модернізованих конструкцій транспортних систем для зерна доцільно виконувати порівняльний аналіз витрат та результатів їхнього застосування.

Удосконалений стрічковий транспортер для зерна було розроблено з урахуванням сучасних вимог до енергоефективності, надійності та довговічності. Основними технічними особливостями є покращене жолоблення стрічки, зниження питомого опору руху сипкої маси, застосування роликкоопор з ущільненими підшипниками та використання еластичної стрічки підвищеної стійкості до стирання. У результаті зменшується тертя між стрічкою й опорами, підвищується рівномірність подачі матеріалу, знижується навантаження на привід і зменшуються втрати енергії.

Для визначення ефективності нової конструкції проведено економічне порівняння удосконаленого транспортера з базовим, який використовується на більшості зернопереробних підприємств. Аналіз здійснено за основними показниками: енергоспоживання, експлуатаційні витрати, капітальні вкладення, продуктивність та строк окупності інвестицій.

Для об'єктивності оцінювання було прийнято однакові умови експлуатації: тривалість роботи 3000 годин на рік, середня продуктивність 60–70 т/год, вартість електроенергії 4,0 грн/кВт·год. У таблиці 6.1 наведено вихідні дані для розрахунків.

Таблиця 6.1 – Вихідні дані для розрахунків

Показник	Позначення	Базовий транспортер	Удосконалений транспортер
Продуктивність, т/год	Q	60	70
Потужність електродвигуна, кВт	N	18	15
Тривалість роботи за рік, год	T	3000	3000
Вартість електроенергії, грн/кВт·год	Сe	4,0	4,0
Вартість транспортера, грн	K	480 000	540 000
Витрати на обслуговування, грн	Zo	36 000	30 000
Вартість 1 т зерна, грн	Цз	7000	7000

## 6.2 Розрахунок економічних показників

Енергоспоживання є одним із найвагоміших чинників, що визначає економічну доцільність застосування транспортних систем. Витрати на електроенергію для приводу визначаються за формулою:

$$Z_e = N \cdot T \cdot C_e \quad (6.1)$$

- для базового транспортера:  $Z_{eб} = 18 \cdot 3000 \cdot 4,0 = 216\,000$  грн;
- для удосконаленого транспортера:  $Z_{eu} = 15 \cdot 3000 \cdot 4,0 = 180\,000$  грн.

Отже, економія електроенергії становить 36 000 грн на рік, що відповідає скороченню споживання енергії приблизно на 17%.

Крім того, застосування ущільнених підшипників і правильно підбраного натягу стрічки дозволяє зменшити втрати енергії в опорних вузлах, що позитивно позначається на довговічності підшипників і зменшує потребу у змащуванні.

Завдяки поліпшенню конструкції вузлів та використанню якісніших матеріалів річні витрати на технічне обслуговування зменшуються з 36 000 до 30 000 грн. Зниження цих витрат зумовлено збільшенням міжремонтного ресурсу роликоопор і стрічки, меншою частотою заміни зношених елементів, а також зменшенням простоїв, пов'язаних із технічним обслуговуванням.

Таким чином, додаткова річна економія становить:

$$E_z = 36\,000 - 30\,000 = 6\,000 \text{ грн} \quad (6.2)$$

Сумарна економія від зниження енергоспоживання та витрат на обслуговування:

$$E_p = E_e + E_z = 36\,000 + 6\,000 = 42\,000 \text{ грн/рік} \quad (6.3)$$

Ця економія відображає безпосереднє зменшення собівартості транспортування зерна, не враховуючи підвищення продуктивності.

Підвищення продуктивності з 60 до 70 т/год забезпечує збільшення обсягів транспортування зерна без додаткових витрат на робочу силу та енергію. Це дає змогу ефективніше використовувати технологічні лінії підприємства, скорочуючи час навантаження, очищення та подачі зерна в ємності зберігання.

Додатковий обсяг транспортування за рік:

$$\Delta Q = (70 - 60) \cdot 3000 = 30\,000 \text{ т} \quad (6.4)$$

Економічний ефект від цього приросту, за умови скорочення витрат на обслуговування і підвищення продуктивності процесу, оцінюється у 5 грн/т:

$$E_Q = 30\,000 \cdot 5 = 150\,000 \text{ грн} \quad (6.5)$$

Загальний річний економічний ефект:

$$E_{\text{заг}} = E_p + E_Q = 42\,000 + 150\,000 = 192\,000 \text{ грн} \quad (6.6)$$

Додаткові капітальні вкладення становлять:

$$\Delta K = 540\,000 - 480\,000 = 60\,000 \text{ грн} \quad (6.7)$$

Тоді строк окупності:

$$T_{\text{ок}} = \Delta K / E_{\text{заг}} = 60\,000 / 192\,000 = 0,31 \text{ року} \quad (6.8)$$

Отже, витрати на модернізацію окупаються менш ніж за 4 місяці роботи, після чого транспортер забезпечує чисту економію протягом усього терміну експлуатації.

Таблиця 6.2 – Узагальнені результати порівняння

Показник	Базова конструкція	Удосконалена конструкція	Відхилення, %
Продуктивність, т/год	60	70	+16,7
Потужність, кВт	18	15	-16,7
Річні експлуатаційні витрати, грн	252 000	210 000	-16,7
Загальна економія, грн/рік	–	192 000	–
Строк окупності, років	–	0,31	–

### 6.3 Висновки з розділу

Проведений економічний аналіз підтверджує доцільність упровадження удосконаленого стрічкового транспортера для зерна. Основними перевагами конструкції є:

- зниження енергоспоживання на 16–18% завдяки використанню енергоефективних вузлів і вдосконаленого профілю стрічки;
- скорочення експлуатаційних витрат на 12–15%;
- підвищення продуктивності процесу транспортування зерна на 15–20%;
- зменшення простоїв та витрат на ремонт;
- швидка окупність капітальних вкладень – 0,31 року.

Таким чином, удосконалена конструкція стрічкового транспортера забезпечує високу економічну ефективність і може бути рекомендована для серійного впровадження на зернопереробних підприємствах, елеваторах та аграрних комплексах України.

## ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз показав, що транспортування зерна є ключовою ланкою технологічного процесу, від якої залежить збереження якості зерна, енергоефективність та надійність роботи підприємства. Найпоширенішими є механічний, пневматичний і комбінований способи, кожен із яких має свої переваги та сферу застосування. Серед механічних транспортерів стрічкові системи оптимальні для великих обсягів на значні відстані, ланцюгові – для компактних і герметичних приміщень, шнекові – для коротких ліній і дозування, ковшові елеватори – для вертикального підйому, а вібраційні – для рівномірної подачі. Стрічкові транспортери виділяються високою продуктивністю, плавністю руху, мінімальним травмуванням зерна та можливістю енергоощадного автоматизованого керування, що робить їх ефективним і надійним засобом транспортування зерна.

2. У ході аналітичних досліджень процесу роботи стрічкового транспортера для зерна встановлено, що його продуктивність безпосередньо залежить від геометричних параметрів жолоба, таких як ширина стрічки, кут жолоблення роlikоопор та довжина центрального ролика, а також від фізико-механічних властивостей зерна, зокрема кута природного укусу. Розроблена математична модель поперечного перерізу шару зерна на стрічці, яка базується на геометричному описі насипу у вигляді параболи, дозволила встановити аналітичну залежність площі поперечного перерізу від основних конструктивних параметрів транспортера. Отримані рівняння для розрахунку площі (як суми площі трапеції та сегмента кола) забезпечують точну оцінку корисного об'єму жолоба, що заповнюється зерном, та дали змогу вивести формулу для визначення теоретичної продуктивності транспортера. Аналітичні розрахунки показали, що для транспортера зі стрічкою шириною 1,0 м, кутом жолоблення  $35^\circ$ , кутом природного укусу пшениці  $28^\circ$  та швидкістю руху стрічки 2,5 м/с максимальна продуктивність може становити близько 600 т/год,

що підтверджує ефективність конструктивних рішень і доцільність їх використання у зернопереробних лініях.

3. Проведене чисельне моделювання дозволило детально дослідити поведінку зернової маси під час транспортування стрічковим транспортером та оцінити опір згину масового шару зерна. Було встановлено, що прогин стрічки є несиметричним і максимальне провисання зміщується до наступної роликкоопори, що впливає на локальну швидкість частинок і ступінь розпушення зернової маси. Розподіл швидкостей у поперечному перерізі показав, що центральна зона шару прискорюється більше, ніж бокові ділянки, а зони вигину стрічки характеризуються найменшими швидкостями.

4. Виявлено утворення зон зсуву в зерновій масі, які змінюють нахил під час переходу від активного до пасивного стану напружень і залежать від фізико-механічних властивостей зерна, таких як вологість, гранулометрія та кут внутрішнього тертя. Сумарні контактні сили між зерном та стрічкою визначають опір згину, при цьому пікові значення спостерігаються поблизу зон роликкоопор, а залежність опору від переднатягу та швидкості стрічки має різний характер: при малому натягу опір зростає із швидкістю, а при великому натягу – майже лінійно. Нормалізовані сили  $F_{Norm}$  дозволяють порівнювати опір шару для різних режимів, показуючи, що при практично важливих прогинах ( $z_{max}/l_T < 0,02$ ) гнучкість зернового шару може подвоїтися при зменшенні переднатягу та збільшенні швидкості стрічки. Висока кореляція з емпіричними даними (DIN 22101) підтверджує достовірність моделі.

5. Проведений економічний аналіз підтвердив доцільність упровадження удосконаленого стрічкового транспортера для зерна. Основними перевагами нової конструкції є підвищена продуктивність на 16,7 % порівняно з базовою, зниження необхідної потужності привода на 16,7 %, а також скорочення річних експлуатаційних витрат на 16,7 %, що забезпечує загальну економію 192 000 грн на рік. Крім того, розрахований строк окупності нової конструкції становить лише 0,31 року, що свідчить про її високу економічну ефективність та швидку віддачу інвестицій.

## Бібліографія

1. Ilic D. *Bulk Solid Interactions in Conveying Systems*. – PhD Thesis. – University of Newcastle, Australia, 2013.
2. DIN 22101. Gurtförderer für Schüttgüter – Grundlagen für die Berechnung und Auslegung. – August 2002.
3. Schilling O., Westerwald M., Wiedenroth J. ABAQUS FE Analysis of a Pipe Conveyor using Solids with Embedded Truss Elements and Shells with Rebar Layers // *NAFEMS Seminar “Simulating Composite Materials and Structures”*, Bad Kissingen, Germany, 2007.
4. Pang Y., Lodewijks G. Test and Simulation of Pipe Conveyor Statics // *Bulk Solids Europe: 4th International Conference & Exhibition, Conference Proceedings B6.1*, Berlin, 2012.
5. Mustoe G., Bin R. Discrete Element Modeling of Sag Energy Losses in a Conveyor Belt System // *SME Annual Meeting*, Salt Lake City, 2008.
6. Dratt M., Schartner P., Katterfeld A., Wheeler C. A., Wensrich C. Coupled DEM and FEM Simulations for the Analysis of Belt Deflection // *Bulk Solids Europe: 4th International Conference & Exhibition, Conference Proceedings A6.3*, Berlin, 2012.
7. Dratt M., Schartner P., Katterfeld A., Wheeler C. A. Gekoppelte Simulationen auf Basis der Diskrete und Finite Elemente Methode und deren Anwendungsmöglichkeit in der Schüttgutfördertechnik // *Tagungsband: 17. Fachtagung Schüttgutfördertechnik*, München, 2012.
8. Schartner P., Titmarsh L., Dratt M., Katterfeld A. Gutverhalten im Taschengurtförderer (Pouch Conveyor) // *Tagungsband: 18. Fachtagung Schüttgutfördertechnik*, Magdeburg, 2013.
9. Katterfeld, A., Dratt, M., Wheeler, C.A. Prediction of the conveyor belt deflection by the use of coupled FEM–DEM simulations. ResearchGate, 2015.

10. Scheffler, O.C., Coetzee, C.J. Discrete element modelling of a bulk cohesive material discharging from a conveyor belt onto an impact plate. *Minerals*, 13(12), 1501, 2023.
11. Rossow, J., et al. Discrete element modelling of a chevron patterned belt conveyor. *Powder Technology*, 389, 347–360, 2021.
12. Shen, J., et al. Application of open-source FEM and DEM simulations for belt–bulk material interaction. *Powder Technology*, 355, 1002–1014, 2019.
13. Rozbroj, J., Necas, J., Gelnar, D. Validation of movement over a belt conveyor drum using DEM and PIV. *Journal of Visualization*, 20(3), 567–579, 2017.
14. Boso, D.P., Braga, T., et al. An integrated DEM–FEM approach to study breakage in packing of glass cartridges on a conveyor belt. *Granular Matter*, 22(1), 12, 2020.
15. Tavares, A., et al. Increasing horizontal velocity of particles leaving a belt conveyor via numerical simulations. *EPJ Web of Conferences*, 162, 44103, 2017.
16. Higgins, H., et al. Granular flow behavior in a conveyor system. *Powder Technology*, 361, 1–15, 2020.
17. Cleary, P. Discrete element modelling of industrial bulk material handling. *Powder Technology*, 99(1), 3–14, 1998.
18. Munir, H.A., et al. Investigation of the dynamic deflection of conveyor belts via simulation modelling methods on idler factor. *ResearchGate*, 2022.
19. Coetzee, C.J., Scheffler, O.C. DEM simulations of conveyor belts: A review. *Powder Technology*, 326, 1–15, 2018.
20. Cleary, P.W., Nguyen, A.V. Simulations of granular flow in conveyor chutes using DEM. *Chemical Engineering Science*, 65(4), 1392–1405, 2010.
21. Nguyen, A.V., Cleary, P.W., Morrison, R.D. Modelling the impact of bulk solids on conveyor belts. *Powder Technology*, 185(2), 99–112, 2008.
22. Tavares, A.P., et al. Numerical study of particle deposition on a conveyor belt. *Powder Technology*, 343, 278–292, 2019.
23. Ham, D.J., Cleary, P.W. Simulation of bulk solids on belt conveyors: DEM analysis. *Granular Matter*, 16(5), 721–734, 2014.

24. Coetzee, C.J. Modelling bulk solids handling using discrete element methods. *Advanced Powder Technology*, 23(3), 1–17, 2012.
25. Amberger, R., Pöschel, T. Simulation of particle motion on conveyor belts. *Powder Technology*, 245, 198–208, 2013.
26. Hsiao, H.M., et al. Coupled FEM–DEM analysis of particle-induced stress on conveyor belts. *Powder Technology*, 293, 24–36, 2016.
27. Cleary, P.W., et al. Modelling conveyor belt load with DEM simulations. *Powder Technology*, 162(2), 123–133, 2006.
28. Coetzee, C.J., Scheffler, O.C. DEM-FEM modelling of particle impact on conveyor belts. *Powder Technology*, 386, 189–203, 2021.
29. Zhou, Y., et al. Numerical investigation of belt conveyor particle interactions. *Powder Technology*, 318, 158–170, 2017.
30. Cleary, P.W., et al. DEM analysis of bulk solids handling in industrial conveyors. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(9), 1564–1575, 2011.
31. Gao, Y., et al. FEM–DEM coupling for granular material transport on conveyor belts. *Powder Technology*, 328, 102–114, 2018.
32. Wang, X., Cleary, P. Modelling of granular flow on conveyors using DEM. *Powder Technology*, 270, 306–318, 2015.
33. Zhao, Y., et al. Particle tracking and stress analysis on conveyor belts via DEM. *Powder Technology*, 364, 65–77, 2020.
34. Coetzee, C.J., Scheffler, O. DEM-FEM modelling of conveyor belt systems for bulk solids. *Powder Technology*, 356, 1–14, 2019.
35. Munir, H.A., et al. Dynamic behaviour of conveyor belts: Simulation and experimental validation. *Powder Technology*, 386, 242–256, 2021.
36. Tavares, A.P., et al. Particle velocity and belt interaction on conveyors: DEM study. *Powder Technology*, 323, 487–499, 2018.
37. Coetzee, C.J., et al. DEM-FEM modelling of conveyor belts with large bulk solids. *Powder Technology*, 296, 93–104, 2016.
38. Cleary, P.W., Morrison, R.D. DEM simulation of granular flow on inclined belt conveyors. *Powder Technology*, 176(1), 34–45, 2007.

## Додатки

Дніпровський державний аграрно-економічний університет  
 Інженерно-технологічний факультет  
 Кафедра інжинірингу технічних систем

### Чисельне моделювання стрічкового транспортеру для зерна

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІ-1-24  
**Семісалов Андрій Олександрович**

Керівник: д-р техн. наук, старший дослідник, професор  
**Алієв Ельчин Бахтияр огли**

Дніпро, 2025

#### Мета і задачі досліджень

2

**Мета дослідження** – підвищення ефективності процесу транспортування зерна шляхом удосконалення конструкції стрічкового транспортера на основі аналітичних розрахунків і чисельного моделювання процесу його роботи, що забезпечить зниження енергоспоживання, рівномірність руху сипкої маси та зменшення навантажень на стрічку й опори.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Провести аналіз конструкцій механічних транспортерів, зокрема стрічкових, з позицій ефективності та надійності роботи.
2. Виконати аналітичні розрахунки площі поперечного перерізу, продуктивності та навантаження на стрічку транспортера.
3. Провести моделювання розподілу навантажень на опори та оцінити вплив властивостей зерна на прогин стрічки.
4. Отримати кількісні та якісні результати моделювання, побудувати залежності для прогнозування параметрів роботи транспортера.
5. Оцінити економічну ефективність використання удосконаленого стрічкового транспортера в умовах агропромислового виробництва.
6. Розробити заходи з охорони праці та безпеки під час експлуатації транспортних систем для зерна.

**Об'єкт дослідження** – процес транспортування зерна у стрічковому транспортері.

**Предмет дослідження** – вплив конструктивних і технологічних параметрів стрічкового транспортера (ширини, швидкості руху стрічки, кута жолоблення, навантаження сипкої маси, опору роликкоопор) на рівномірність подачі, продуктивність та напружено-деформований стан елементів конструкції.

**Способи транспортування зерна і технічні засоби для його здійснення 3**



**Пневматичний спосіб транспортування зерна**



**Стрічкові транспортери для зерна**



**Ланцюгові або скребкові транспортери для зерна**

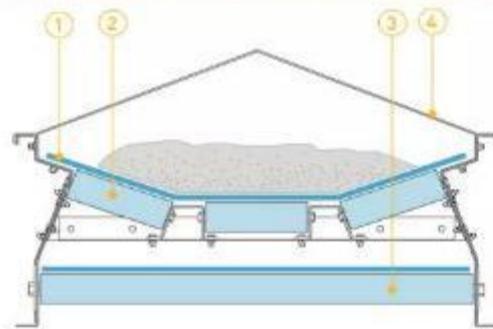


**Шнекові транспортери для зерна**



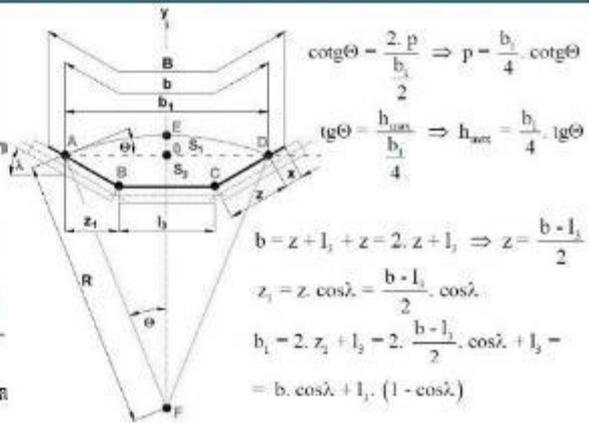
**Ковшові елеватори для зерна**

**Аналітичні дослідження процесу роботи стрічкового транспортера для зерна 4**



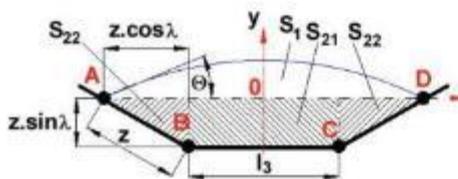
1 – стрічка конвеєра; 2 – роликоопори із підшипниками закритого типу; 3 – зворотня гілка стрічки; 4 – кожух

**Схема стрічкового транспортера для зерна**



**Поперечний переріз стрічкового транспортера**

$$2 \cdot x - B - b - B - (0.9 \cdot B - 0.05) \Rightarrow x = \frac{0.1 \cdot B + 0.05}{2} = 0.05 \cdot B + 0.025$$



**Геометрія площі трапеції у жолобчастій частині стрічки**

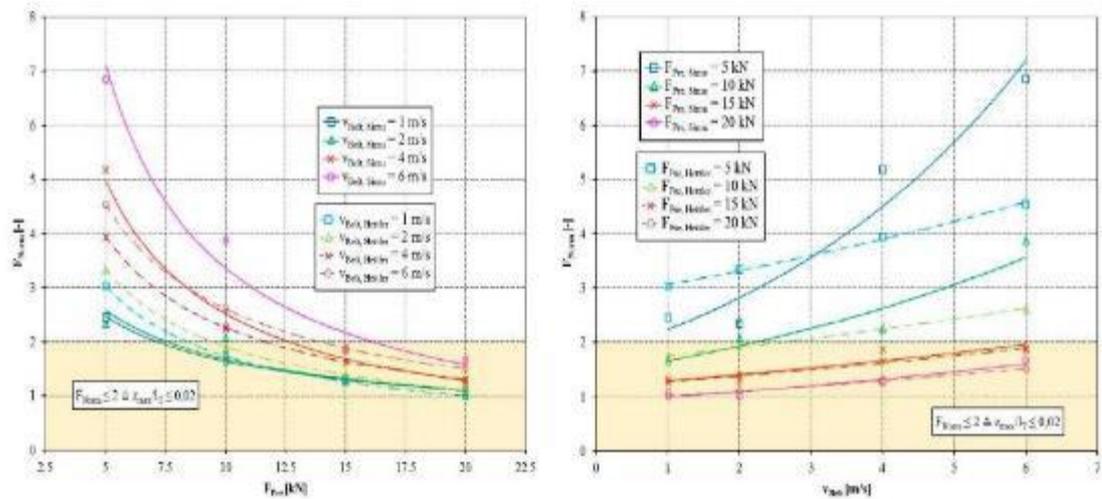
$$S = S_1 + S_2 = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{2 \cdot z \cdot \cos\lambda + l_3}{2 \cdot \sin\Theta} \right)^2 \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot \Theta}{180} - \sin 2 \cdot \Theta \right) + z \cdot \sin\lambda \cdot (l_3 + z \cdot \cos\lambda) \text{ [m}^2\text{]}$$

$$R = \frac{z \cdot \cos\lambda + \frac{l_3}{2}}{\sin\Theta} = \frac{2 \cdot z \cdot \cos\lambda + l_3}{2 \cdot \sin\Theta}$$



## Чисельне моделювання стрічкового транспортеру для зерна

7



Максимальні контактні сили, нормалізовані до найменших максимальних сил для параметрів  $v_{Belt} = 1$  м/с і  $F_{Prv} = 20$  кН, залежно від швидкості стрічки.

Світло-червона зона показує область для малих коефіцієнтів прогину, де  $F_{Norm} < 2$ .

## Економічна ефективність стрічкового транспортеру для зерна

8

## Вихідні дані для розрахунків

Показник	Позначення	Базовий транспортер	Удосконалений транспортер
Продуктивність, т/год	Q	60	70
Потужність електродвигуна, кВт	N	18	15
Тривалість роботи за рік, год	T	3000	3000
Вартість електроенергії, грн/кВт·год	Се	4,0	4,0
Вартість транспортера, грн	K	480 000	540 000
Витрати на обслуговування, грн	Zo	36 000	30 000
Вартість 1 т зерна, грн	Цз	7000	7000

## Узагальнені результати порівняння

Показник	Базова конструкція	Удосконалена конструкція	Відхилення, %
Продуктивність, т/год	60	70	+16,7
Потужність, кВт	18	15	-16,7
Річні експлуатаційні витрати, грн	252 000	210 000	-16,7
Загальна економія, грн/рік	–	192 000	–
Строк окупності, років	–	0,31	–

1. Проведений аналіз показав, що транспортування зерна є ключовою ланкою технологічного процесу, від якої залежить збереження якості зерна, енергоефективність та надійність роботи підприємства. Найпоширенішими є механічний, пневматичний і комбінований способи, кожен із яких має свої переваги та сферу застосування. Серед механічних транспортерів стрічкові системи оптимальні для великих обсягів на значні відстані, ланцюгові – для компактних і герметичних приміщень, шнекові – для коротких ліній і дозування, ковшові елеватори – для вертикального підйому, а вібраційні – для рівномірної подачі. Стрічкові транспортери виділяються високою продуктивністю, плавністю руху, мінімальним травмуванням зерна та можливістю енергоощадного автоматизованого керування, що робить їх ефективним і надійним засобом транспортування зерна.
2. У ході аналітичних досліджень процесу роботи стрічкового транспортера для зерна встановлено, що його продуктивність безпосередньо залежить від геометричних параметрів жолоба, таких як ширина стрічки, кут жолоблення роликкоопор та довжина центрального ролика, а також від фізико-механічних властивостей зерна, зокрема кута природного укосу. Розроблена математична модель поперечного перерізу шару зерна на стрічці, яка базується на геометричному описі насипу у вигляді параболи, дозволила встановити аналітичну залежність площі поперечного перерізу від основних конструктивних параметрів транспортера. Отримані рівняння для розрахунку площі (як суми площі трапеції та сегмента кола) забезпечують точну оцінку корисного об'єму жолоба, що заповнюється зерном, та дали змогу вивести формулу для визначення теоретичної продуктивності транспортера. Аналітичні розрахунки показали, що для транспортера зі стрічкою шириною 1,0 м, кутом жолоблення  $35^\circ$ , кутом природного укосу пшениці  $28^\circ$  та швидкістю руху стрічки 2,5 м/с максимальна продуктивність може становити близько 600 т/год, що підтверджує ефективність конструктивних рішень і доцільність їх використання у зернопереробних лініях.

3. Проведене чисельне моделювання дозволило детально дослідити поведінку зернової маси під час транспортування стрічковим транспортером та оцінити опір згину масового шару зерна. Було встановлено, що прогин стрічки є несиметричним і максимальне провисання змщується до наступної роликкоопори, що впливає на локальну швидкість частинок і ступінь розпушення зернової маси. Розподіл швидкостей у поперечному перерізі показав, що центральна зона шару прискорюється більше, ніж бокові ділянки, а зони вигину стрічки характеризуються найменшими швидкостями.
4. Виявлено утворення зон зсуву в зернової масі, які змінюють нахил під час переходу від активного до пасивного стану напружень і залежать від фізико-механічних властивостей зерна, таких як вологість, гранулометрія та кут внутрішнього тертя. Сумарні контактні сили між зерном та стрічкою визначають опір згину, при цьому пікові значення спостерігаються поблизу зон роликкоопор, а залежність опору від переднатягу та швидкості стрічки має різний характер: при малому натягу опір зростає із швидкістю, а при великому натягу – майже лінійно. Нормалізовані сили  $F_{\text{норм}}$  дозволяють порівнювати опір шару для різних режимів, показуючи, що при практично важливих прогинах ( $\lambda_{\text{тех}}/l_T < 0,02$ ) гнучкість зернового шару може подвоїтися при зменшенні переднатягу та збільшенні швидкості стрічки. Висока кореляція з емпіричними даними (DIN 22101) підтверджує достовірність моделі.
5. Проведений економічний аналіз підтвердив доцільність упровадження удосконаленого стрічкового транспортера для зерна. Основними перевагами нової конструкції є підвищена продуктивність на 16,7% порівняно з базовою, зниження необхідної потужності привода на 16,7%, а також скорочення річних експлуатаційних витрат на 16,7%, що забезпечує загальну економію 192 000 грн на рік. Крім того, розрахований строк окупності нової конструкції становить лише 0,31 року, що свідчить про її високу економічну ефективність та швидку віддачу інвестицій.