

Центральноукраїнський національний технічний університет

Агротехнічний факультет

Кафедра сільськогосподарського машинобудування

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою СГМ

к.т.н., професор

_____ Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

« _____ » _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:**

«Модернізація ковшової норії з дослідженням транспортуючого
органу»

Виконав здобувач вищої освіти II курсу,
групи ГМ-24М-1

ОНП «Галузеве машинобудування»
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»

_____ Нечиталюк Віталій
Олександрович

« _____ » _____ 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

_____ Юрій МАЧОК

« _____ » _____ 2026 р.

Рецензент

доцент, д-р. техн. наук

_____ Володимир ЯЦУН

« _____ » _____ 2026 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет Агротехнічний

Кафедра Сільськогосподарського машинобудування

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

Освітньо-наукова програма «Галузеве машинобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

«___» _____ 2026 року

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

_____ Нечиталюка Віталія Олександровича

_____ (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Модернізація ковшової норії з дослідженням транспортуючого органу
2. Керівник роботи (проекту) Мачок Юрій Вікторович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
3. Строк подання роботи до захисту 05.05.2026 р.
4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи Метою роботи є підвищення ефективності роботи ковшової норії для транспортування зерна шляхом модернізації її транспортуючого органу, що дозволить мінімізувати механічне пошкодження зернівок.
5. Перелік ілюстративного матеріалу 1. Стан досліджуваного питання 2. Вибір напрямку досліджень; 3. Теоретичний аналіз об'єкта дослідження; 4. Практична реалізація результатів досліджень.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Виконання розділу «Вступ»	02.02.2026 р.	
2	Виконання розділу «Стан досліджуваного питання та вибір напрямку досліджень»	27.02.2026 р.	
3	Виконання розділу «Наукова частина»	27.03.2026 р.	
4	Виконання розділу «Практична реалізація результатів досліджень»	15.04.2026 р.	
5	Виконання розділу «Охорона праці».	22.04.2026 р.	
6	Формулювання загальних висновків. Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини. Підготовка до захисту.	05.05.2026 р.	

Дата видачі завдання
«19» січня 2026 р.

Підпис керівника

_____ (прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання
«19» січня 2026 р.

Підпис здобувача

_____ (прізвище та ініціали)

Анотація

Кваліфікаційна робота присвячена підвищенню ефективності ковшової норії НЛК-Ф-10 шляхом удосконалення її транспортуючого органу. Проведено аналіз причин травмування зерна та впливу конструктивних параметрів на якість транспортування.

Теоретично обґрунтовано механізм пошкодження зернівок і доведено ефективність використання поліуретанових ковшів.

Виконано інженерні розрахунки та запропоновано конструктивні рішення, що забезпечують зниження енерговитрат, підвищення надійності та зменшення пошкодження зерна. Розроблено заходи по безпечній експлуатації норії.

Abstract

The qualification work is devoted to improving the efficiency of the bucket elevator NLK-F-10 by upgrading its conveying element.. An analysis of the causes of grain damage and the influence of design parameters on transportation quality has been carried out.

The mechanism of grain kernel damage has been theoretically substantiated, and the effectiveness of using polyurethane buckets has been proven.

Engineering calculations have been performed, and design solutions have been proposed to reduce energy consumption, increase reliability, and minimize grain damage. Measures for the safe operation of the bucket elevator have also been developed.

1. ВСТУП

Зернова галузь України належить до пріоритетних секторів національної економіки, а її продуктивність значною мірою покращується станом технічного оснащення підприємств для переробки та збереження зернової продукції. Невід'ємною складовою транспортною системою елеваторів, зерноскладів і комбикормових виробництв є ковшові норії – обладнання, що забезпечує вертикальне переміщення зерна при помірному споживанні електроенергії.

Попит на таке обладнання зростає паралельно з нарощуванням аграрного виробництва та посиленням вимог до якості й безпеки зернопереробних процесів. Сьогодні переробні підприємства, млини та елеваторні комплекси потребують надійних засобів транспортування сипких матеріалів, і саме ковшові норії відповідають цим потребам найповніше.

Суттєвою конкурентною перевагою норій є щадний режим переміщення зерна: за умов грамотного конструктивного виконання та належного технічного обслуговування рівень механічного ураження зернівок залишається мінімальним. Це позитивно впливає як на посівні характеристики зерна, так і на його товарну цінність, скорочуючи загальні втрати у виробничому ланцюгу.

Окремою перевагою є компактність норійного транспорту: вертикальна схема переміщення матеріалу дозволяє раціонально використовувати виробничі площі та спрощує технологічне планування. Завдяки сумісності із сучасними системами автоматизації та диспетчеризації норії органічно вписуються в цифрові виробничі платформи, що забезпечує їх інвестиційну привабливість.

Разом із тим практика використання виявляє характерні недоліки: механічне пошкодження зерна в зонах завантаження й вивантаження, прискорене зношування стрічкового полотна і ківшів, а також підвищену запиленість, що створює вибухову небезпеку. Пошкоджене зерно втрачає якісні показники, що тягне за собою відчутні економічні збитки.

З огляду на викладене, вдосконалення конструкції робочих органів ковшових норій є актуальним технічним завданням, розв'язання якого

сприятиме підвищенню енергетичної ефективності обладнання та збереженню якості зернової продукції.

2. СТАН ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Аналіз останніх досліджень і публікацій

Ефективність сучасного елеватора безпосередньо залежить від надійності машин вертикального транспортування. До них відносять зернові норії. На надійність їх роботи, збереженість сільськогосподарського матеріалу визначальний вплив мають параметри тягової стрічки та ковшів. Правильний вибір матеріалу стрічки та ковшів норії – це не просто питання сервісу, а стратегічне рішення для мінімізації травмування зерна та енерговитрат.

Використання полімерних ковшів замість металевих знижує навантаження на привод і запобігає іскрінню, що є критичним для пожежної безпеки. Водночас тип каркаса стрічки визначає її подовження та стійкість до жирів, які містяться в олійних культурах. Помилка у виборі призводить до аварійних зупинок у розпал сезону, тоді як збалансована пара «ковш-стрічка» гарантує стабільну продуктивність та швидку окупність обладнання за рахунок збереження цілісності продукту. Вирішенню цього питання присвячено багато досліджень.

Так, В. С. Ловейкін та Ю. О. Ромасевич [14] приділяють увагу взаємодії конструктивних параметрів та динамічних характеристик підйомно-транспортних машин. Питання вибору матеріалу тягової стрічки та робочого органу (ковша) розглядається не лише з позицій статичної міцності, а й крізь призму мінімізації динамічних навантажень у перехідних режимах роботи. Автори обґрунтовують, що вибір матеріалу тягової стрічки (традиційні гумовотканинні, гумотросові або сучасні синтетичні стрічки) безпосередньо впливає на коефіцієнт жорсткості та дисипативні властивості системи. У роботі доведено, що: Модуль пружності матеріалу визначає частотний спектр власних коливань.

Використання високоміцних легких композитів дозволяє зменшити власну масу тягового органу, що знижує інерційні сили при пуску та гальмуванні.

При аналізі ковшових елеваторів (норій) акцент зміщується на масу та геометрію ковша. Автори пропонують перехід від важких металевих конструкцій до полімерних матеріалів. Це дасть змогу:

- зменшити енерговитрати на привод механізму;
- знизити інтенсивність зносу тягової стрічки в місцях кріплення;
- покращити умови розвантаження сипучих матеріалів за рахунок низької адгезії пластику.

Вони розглядають тягову стрічку як пружний елемент із розподіленими параметрами. Для аналізу коливань використовується рівняння хвильового типу. Основна фізико-математична залежність для натягу стрічки S у довільному перерізі виглядає наступним чином.

$$S(x, t) = EF \left(\frac{du(x, t)}{dx} \right) + \beta \left(\frac{d^2 u(x, t)}{dx \cdot dt} \right)$$

де E – модуль поздовжньої пружності матеріалу стрічки;

F – площа поперечного перерізу;

$u(x, t)$ – поздовжнє переміщення перерізу;

β – коефіцієнт внутрішнього тертя (в'язкості) матеріалу.

Саме вибір матеріалу визначає значення E та β , що впливає на амплітуду динамічних коливань при пуску. Автори підкреслюють, що використання матеріалів з високим демпфуванням (наприклад, спеціальних композитів) дозволяє швидше гасити перехідні процеси. Автори зазначають, що впровадження полімерних ковшів дозволяє реалізувати розроблений ними оптимальний режим руху норії. Це забезпечує перехід від «жорсткого» до «м'якого» пуску системи, що в поєднанні з частотним регулюванням приводу збільшує термін експлуатації тягової стрічки в 1,5–2 рази.

П.С. Тихон в своїх дослідженнях розглядає зернову норію як динамічну систему взаємодії стрічкового тягового органу зернової норії з приводним барабаном та завантаженими ковшами в умовах динамічних навантажень [26]. Увагу приділено вирішенні проблеми проковзування стрічки та її

нерівномірного зносу. Автор виокремлює кілька критичних факторів, які впливають на роботу норії.

Досліджено, як форма поверхні приводного барабана (циліндрична чи бочкоподібна) впливає на центрування стрічки під навантаженням.

Описано зусилля, що виникають у стрічці в момент, коли ковші проходять через башмак (нижню частину) норії та занурюються у зерновий шар.

Оскільки зерновий пил діє як мастило, Тихон П. С. обґрунтував необхідність використання спеціальних футерувальних матеріалів для підвищення коефіцієнта зчеплення стрічки з приводним барабаном, як варіант ефективного конструкторського рішення.

В роботі [3] проведено системний аналіз існуючих засобів механізації вертикального транспорту зерна та виявлено їхні вузькі місця (просипання вантажу, високий рівень шуму, зношування тягових органів). Тут описано математичні моделі руху зернового потоку при його зачерпуванні ковшами та розвантаженні в головці норії. Особливу увагу приділено траєкторії руху частинок, щоб уникнути їх зворотного падіння.

Запропоновано конструкції пружинно-гвинтових транспортувальних робочих органів та систем з еластичними елементами, що дозволяють адаптуватися до змінних навантажень.

В своїй роботі автори зосередились на дослідженні того, як форма кромки ковша впливає на цілісність зерна. Вони виявили, що форма передньої кромки ковша є критичним фактором, оскільки саме вона першою вступає в контакт із зерною масою у нижній частині норії. Традиційні металеві ковші з гострою або тонкою прямою кромкою працюють за принципом «ножа». При високих швидкостях руху стрічки (2,0 – 3,0 м/с) удар кромки ковша об зернівку призводить до його макротравмування – розколювання, пошкодження оболонки, що негативно впливає схожість насіння, сприяє розвитку хвороб під час зберігання.

Автори обґрунтовують, що використання заокругленої передньої кромки або з її відгином дає можливість перерозподілити енергію удару. Замість точкового контакту має місце «відштовхування» зернівки до середини ковша, що сприяє зниженню динамічного навантаження на 15 – 20%.

В публікації [4] колектив авторів наводить результати досліджень процесу розвантаження ковшів, які мають еластичну задню стінку. Вони запропонували конструктивно-технологічну схему вертикального ковшового елеватора з примусовим розвантаженням ковшів. Авторами запропоновано математичні моделі для розрахунку зусилля деформації стінки ковша виготовленого з еластичного матеріалу та потужності, яка витрачається на цю деформацію. Це дозволило їм запропонувати раціональні конструктивні і кінематичні параметри механізму розвантаження, який дає можливість підвищити продуктивність норії при транспортуванні сільськогосподарських матеріалів завдяки повному випорожненню ковшів.

В статті [5] наведено результати теоретичних досліджень динамічних процесів, які мають місце під час роботи зернових норій. Проаналізовано динаміку руху тягової стрічки за умов використання змінного кута нахилу ковшів, що є першочерговим фактором впливу на підвищення надійності та продуктивності норій. Запропоновано раціональні параметри тягової стрічки та конструктивних елементів кріплення, які мінімізують нерівномірність ходу робочого органу та передчасний знос його елементів.

Ще одна робота присвячена вивченню динамічних процесів, які виникають при роботі тягового органу зернової норії. В монографії [24] стрічка норії розглядається як пружний елемент, який працює за умов перемінних навантажень.

Автор також акцентує увагу на взаємодії ковша норії з зерновим матеріалом і проблемі його травмування. Тут зазначається, що металеві ковші, які традиційно використовують на норіях мають гостру кромку і діють на зернівку за принципом «ножа», пошкоджуючи оболонку насіння. Особливо актуально це на високих швидкостях стрічки (більше 2 м/с). В монографії

обґрунтовано необхідність переходу до застосування ковшів з раціональною геометричною формою їх передньої кромки (заокруглення, відгини) або полімерних (поліуретанових) матеріалів, що дозволить в значній мірі перерозподілити енергію удару і зменшити динамічне навантаження на насінину. Крім того, в роботі приділено значну увагу розробці інженерних заходів, які сприяли б підвищенню продуктивності зернових норій.

В. В. Погорілий у своїх дослідженнях [20] робить викладку експериментальних досліджень фізико-механічних властивостей і параметрів сучасних полімерних стрічок, які використовуються в ролі тягових органів зернових норій. Тут акцентується увага на визначенні розривного зусилля стрічок, їх відносне видовження. Особлива увага приділена дослідженню опору стрічки вириванню болтів, за допомогою яких кріпляться ковші з вивченням зон концентрації напружень навколо кріпильних отворів. Дана оцінка впливу жорсткості полімерного матеріалу стрічки на довговічність з'єднання.

Автором також обґрунтовано перспективність відходу від гумотканинних (кордтканевих) традиційних стрічок до багатошарових полімерних для досягнення високої енергоефективності та надійності (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 Порівняльна характеристик кордтканевих та полімерних стрічок норій [20]

Властивість	Матеріал тягової стрічки	
	Кордтканеві (традиційні)	Полімерні (сучасні)
1	2	3
Матеріал основи	Бавовняна або комбінована тканина з гумовим покриттям	Синтетичні сполуки (ПВХ, поліуретан тощо)
Вага	Значна	Легші на 30 – 50%
Міцність на розрив	Залежить від числа прокладок, мають схильність до видовження	Висока міцність; мінімальне відносне розтягування
Гнучкість та втомна міцність	Нижчий рівень; схильність до утворення тріщин в зонах згину на барабані	Висока еластичність; стійкість до тріщиноутворення

1	2	3
Гігієнічність та безпека	Схильні до поглинання вологи, мастил (олій) та утворення бактерій	Біологічно інертні; допускаються до контактування з харчовими продуктами
Зносостійкість	Середня	Підвищена абразивна та корозійна стійкість
Взаємодія з барабаном	Вимагають сильного натягу для протидії проковзуванню	Завдяки високому коефіцієнту тертя, вимагають меншого натягу

С. Г Пилипака та В.В. Вольський в своїх дослідженнях основну увагу приділили вивченню питання травмування зерна під впливом швидкісного режиму робочого органу норії [19]. Запропоновано систему диференціальних рівнянь, які описують траєкторію руху як окремого зерна так і шару зернового матеріалу під впливом сил гравітації та інерції. Авторами встановлено вплив параметрів ковшів та швидкості руху стрічки на характер руху зернового потоку, ступінь травмування оболонок зернівок та його мінімізацію, а також просипання останніх. Дослідники рекомендують отримані математичні моделі до використання з метою визначення оптимальних параметрів робочих органів норій для забезпечення високої продуктивності і енергоефективності.

У статті А. І. Коробка наводиться детальний аналіз двох найбільш поширених типів ковшів для ковшових зернових норій: традиційних сталевих та сучасних полімерних [9]. Автор фокусує увагу на тому, як матеріал ковша впливає на продуктивність норії її енергоефективність та збереженість цілісності зерна. Він вказує перспективність полімерних ковшів завдяки зниженню відсотка пошкодженого зерна.

Сталеві ковші при зачерпуванні зерна діють як «ніж», а свою чергу полімерні мають заокруглені, еластичні краї, що дуже важливо для крихкого насіння таких культур, наприклад, як кукурудза та соя. Крім того, сталеві ковші володіють високою механічною міцністю, але при можливій деформації, яка виникає внаслідок удару) не відновлюють початкову форму, що може

призвести до контакту з норійними трубами та виникненню аварій. Вони мають низьку корозійну стійкість.

Полімерні ковші завдяки властивості відновлювати початкову форму («ефект пам'яті») після деяких тимчасових деформацій. Завдяки меншій інерційній масі позитивно впливають на довговічність тягової стрічки, зменшуючи її знос.

Автор наголошує, що для сучасних норій найбільш доцільним є використання полімерних ковшів, а для сталевих є актуальною робота з дуже абразивними сільськогосподарськими матеріалами.

Переваги і недоліки сталевих та полімерних ковшів можна бачити в порівняльній таблиці 2.2. [9].

Таблиця 2.2 Порівняльна таблиця ковшів, виготовлених з різних матеріалів [9]

Властивість	Матеріал ковшів	
	Сталеві	Полімерні
Маса	Значна (перевантажує стрічку та механізм приводу)	Легкі (в 2,5-5,0 разів менша ніж сталеві)
Травмування зерна	Значне (через гострі кромки та жорсткість)	Мінімальне (еластичні краї мають амортизуючий ефект)
Налипання матеріалу	Схильні до налипання зерна з підвищеною вологістю та пилу	Гладка контактна поверхня протидіє налипанню
Корозійна стійкість	Низька	Висока
Пожежна безпека	Іскробезпечні	Відсутність іскор
Енергоспоживання	Високе, через значну матеріалоємність робочого органу	Нижче на 15 – 20%, завдяки меншій матеріалоємності

Дослідженням робочий органів зернових норій присвячено багато робіт закордонних дослідників. Деякі з них пропонують в якості тягового органу норії використовувати сталєво-тросові стрічки для підйому матеріалу на велику висоту.

Так, Zhang L. Та Wang J. присвятили свою роботу вирішенню проблеми довговічності і динамічної стабільності сталетросових стрічок, які застосовують у високопідйомних норіях. Вони запропонували методику теоретичного прогнозування втомного руйнування тягового органу в зазначених умовах [13]. Для опису поздовжніх та поперечних коливань тягової стрічки ними запропоновано математичну модель, яка описує його рух під впливом змінних навантажень. Тут враховуються пружні властивості гуми стрічки і жорсткість сталевих тросів. Представлено необхідні рекомендації.

Krol R. Та Gladysiewicz L. Зосередили свою увагу на енергоефективності роботи зернових норій [10]. Вони запропонували удосконалену методику вимірювання опору руху на основі динамічного аналізу взаємодії тягової стрічки зернової норії з опорними елементами (барабанами) за максимально наближених до експлуатації умов.

Цей показник є важливим для визначення енергоефективності норій, так як значна доля потужності приводу витрачається на подолання опору деформованих гумотросових або гумотканевих стрічок при взаємодії з ведучими і веденими барабанами.

Таким чином, наведений літературний аналіз дає змогу обрати спрямування досліджень метою яких є удосконалення конструкції об'єкту розробки – норії НЛК-Ф-10.

2.2. Опис об'єкту розробки

2.2.1. Призначення норії НЛК-Ф-10

Норія НЛК-Ф-10 (рис. 2.1) – це спеціалізоване обладнання, розроблене для делікатного вертикального переміщення зернових, зернобобових та олійних культур. Вона є ключовим ланкою в технологічних лініях малих та середніх агрогосподарств, де пріоритетом є збереження цілісності насіння при помірних обсягах переробки.



Рис. 2.1. Норія НЛК-Ф-10

2.2.2. Будова та процес роботи норії

Основні вузли конструкції. Головка норії (верхня частина) (рис. 2.2) – містить приводний барабан та вивантажувальний патрубок. Тут розташований привод (електродвигун з редуктором та ланцюговою передачею), який приводить у рух тягову стрічку.

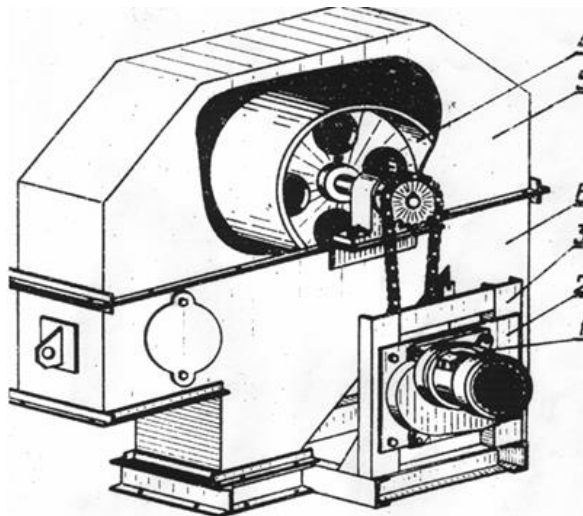


Рис. 2.2 Головка норії: 1–привод; 2–піддвигунна плита; 3–рама; 4–барабан ведучий; 5–кришка; 6–корпус.

Черевик норії (нижня частина) (рис. 2.3) – оснащений завантажувальним бункером (приймальним лотком). Всередині знаходиться натяжний барабан із гвинтовим механізмом для регулювання натягу стрічки.

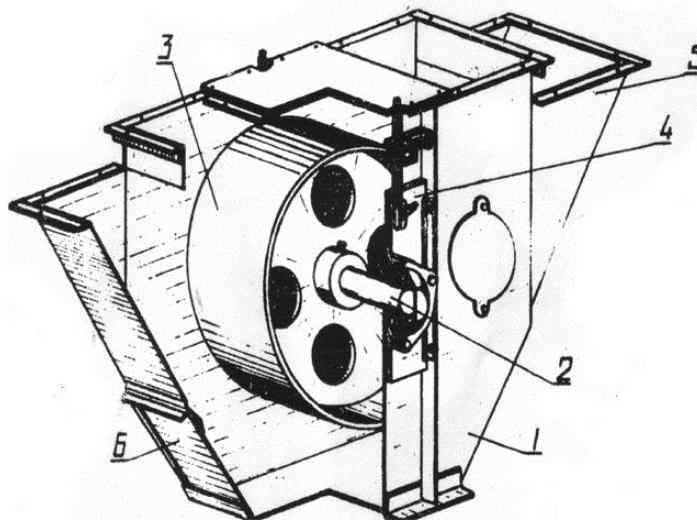


Рис. 2.3 Черевик норії: 1-кожух; 2-вал ведений; 3-барабан ведений; 4- пристрій натяжний; 5- бункер приймальний; 6-засувки.

Норійні труби (секції) – з'єднують головку та башмак. Виконують роль захисного кожуха, всередині якого рухається стрічка.

Тяговий орган та ковші (рис. 2.4) – гумовотканинна стрічка, замкнута в кільце. Ковші закріплені на стрічці за допомогою спеціальних болтів (норійних метизів). Саме вони захоплюють продукт внизу і висипають його вгору.

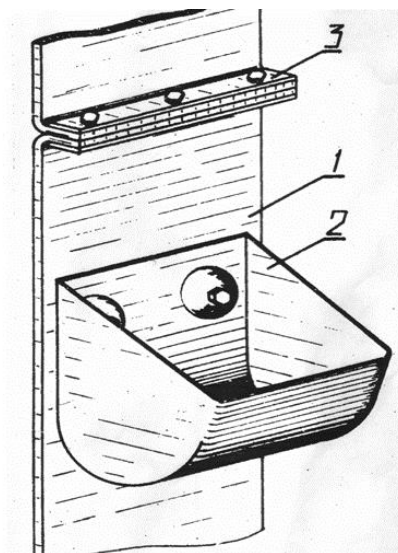


Рис. 2.4 Робочий орган норії: 1-стрічка; 2-ковш; 3-накладки

Процес роботи. Зерно подається в черевик, де підхоплюється ковшами. Під дією тягового зусилля стрічки ковші піднімаються вгору. При проходженні

через верхній барабан під дією відцентрової сили продукт викидається в патрубок головки норії.

2.2.3. Агротехнічні вимоги до зернових норій

На основі аналізу сучасних досліджень та динамічних моделей, агротехнічні вимоги до зернових норій повинні базуватися на принципі «максимальна продуктивність при мінімальному травмуванні». Нижче наведено перелік ключових вимог, сформульованих з урахуванням фізико-механічних властивостей зерна та динаміки норії:

- для збереження цілісності зерна робоча кромка ковша повинна мати заокруглену форму або полімерне покриття, або ківш виготовлений з полімеру для амортизації удару. При швидкостях стрічки $v > 2,5$ м/с використання гострих сталевих крайок ковшів заборонено через ефект «ножа»;
- конструкція та налаштування головки норії має гарантувати виліт зерна за параболічною траєкторією без ударів об внутрішні стінки кожуха та без зворотного сипання в черевик;
- тягова стрічка повинна мати високий коефіцієнт демпфування (перевага надається багатошаровим полімерним стрічкам) для швидкого гасіння коливань під час пуску. Обов'язкове впровадження «м'якого» пуску (через частотні перетворювачі), що дозволяє знизити пікові динамічні навантаження на стрічку в 1,5–2,0 рази;
- приводний барабан повинен мати футерування для запобігання проковзуванню стрічки в умовах запиленості;
- матеріали ковшів та стрічки не повинні створювати іскру при випадковому контакті з норійними трубами;
- для олійних культур (соняшник, ріпак) стрічка має бути жаростійкою, щоб уникнути набухання та розшарування каркаса;
- ковші повинні мати низьку адгезію до вологого зерна та пилу.

2.2.4. Висновки та рекомендації

Таким чином, на основі проведеного аналізу можна зробити наступні висновки та рекомендації.

Для забезпечення максимальної ефективності модернізованої норії (рис. 2.5) рекомендовано обирати полімерну тягову стрічку (ПВХ або поліуретан) у поєднанні з полімерними ковшами.

Використання зазначеної конструкції дозволить значно підвищити їх техніко-експлуатаційні показники:

- енергоефективність – полімерна стрічка легша на 15–20% а ковші – у 2,5–5,0 разів порівняно зі сталевими, що знижує витрати енергії та знос приводу;

- цілісність зерна – еластична кромка полімерного ковша амортизує удар, запобігаючи пошкодженню чи розколюванню насіння при швидкостях $v \geq 2,5$ м/с;

- надійність – високий коефіцієнт демпфування полімерів швидше гасить коливання при пуску, подовжуючи ресурс стрічки у 1,5–2,0 рази;

- безпека – відсутність іскріння та стійкість до жирів олійних культур мінімізують ризики аварій.

3. НАУКОВА ЧАСТИНА

3.1. Мета та задачі досліджень

Мета дослідження полягає у підвищенні ефективності роботи ковшової норії для транспортування зерна шляхом модернізації її транспортуючого органу, що дозволить мінімізувати механічне пошкодження зернівок.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні завдання:

1. Проаналізувати існуючі конструкції ковшових норій та виявити основні фактори, що впливають на травмування зерна.
2. Обґрунтувати оптимальні геометричні параметри та матеріал ковшів для покращення їх наповнення та спорожнення, зменшення рівня травмування зерна.
3. Розробити конструктивні рішення щодо модернізації тягового органу.

Об'єкт дослідження – процес вертикального транспортування зернових культур ковшовою норією.

Предмет дослідження – закономірності взаємодії елементів транспортуючого органу (ковшів та стрічки) з зерною масою, а також конструктивні параметри, що визначають збереженість сільськогосподарського матеріалу.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в удосконаленні математичної моделі взаємодії ковша з зерновим шаром, що дозволяє точніше прогнозувати відсоток травмування зерна залежно від його вологості, швидкості руху стрічки та параметрів ковша.

3.2. Аналіз конструкцій зернових норій

Для швидкого вертикального переміщення зерна на елеваторах, в кормоцехах використовують спеціалізовані норії. Ефективність роботи такої системи залежить від правильного поєднання параметрів продуктивності та висоти підйому з відповідним типом тягового органу (стрічки) та вантажних елементів (ковшів).

У виробництві, залежно від поставлених задач використовують різні конструкції зернових норій. Розглянемо деякі з них, подібні за призначенням та характеристиками з машиною НЛК-Ф-10.

До прикладу, широкого використання набула норія НЗ-10 (рис. 3.1), яка належить до широкої гами норій сімейства НЗ різної продуктивності.



Рис. 3.1. Норія зернова НЗ-10

Зернова норія НЗ-10 (продуктивність 10 тонн на годину, потужність двигуна – 2,2кВт, максимальна висота підйому – до 20м) – це звичайний ковшовий елеватор вертикального типу і є бюджетним варіантом. Вона призначена для дбайливого, але швидкого підйому зерна на значну висоту, яка залежить від числа встановлених норійних труб. Норія має класичну будову для машин такого типу. Слід зазначити, що робочим органом є тягова багат шарова гумовотканинна стрічка з прикріпленими до неї болтовими з'єднаннями металевими ковшами. Попри свою популярність через низьку ціну та простоту, вона має низку конструктивних та експлуатаційних недоліків, які варто враховувати перед придбанням. Головною проблемою даної норії є

пошкодження зерна. Тут є декілька причин. По-перше, через невеликі габарити головки та черевика норії, зерно часто вдаряється об стінки при вивантаженні і пошкоджується. По-друге, при неправильному налаштуванні швидкості стрічки частина зерна не потрапляє у випускний патрубок, а падає назад у шахту, де знову підхоплюється ковшами. Це призводить до подрібнення зерна та появи «січки». Через вузькі норійні труби та невеликі ковші можливе забивання. Крім того, багатошарова гумовотканинна тягова стрічка має низьку довговічність, має місце явище «буксування» на ведучому барабані.

Компанія AgroHelix (Україна) позиціонує свої норії як більш сучасну та надійну альтернативу старим радянським проєктам. Модель НКЗ-10 (рис. 3.2) (продуктивність 10 тонн на годину, потужність двигуна – 2,2кВт, гранична висота підйому – до 25 м) від цього виробника має свої конструктивні особливості, спрямовані на усунення типових недоліків бюджетних елеваторів.



Рис. 3.2. Норія ковшова зернова НКЗ-10.

AgroHelix часто використовує футерування (внутрішню обшивку) зносостійкими матеріалами або поліуретаном, щоб зменшити травмування зерна при ударі об стінки.

В якості тягового органу застосовано гумовотканинну стрічку загального призначення БКНЛ-65. Така стрічка, відповідно, володіє тими ж недоліками, що і стрічка вищезгаданої норії. Стосовно ковшів, то виробник може

встановити сталеві (цілнотягнуті) або полімерні. Полімерні ковші легші, не іскрять і менше травмують зерно.

Норія зернова Н1-10 (рис. 3.3) виробництва Черкаси Елеватор Маш, ТМ BRONTO оснащена мотор-редуктором (зазвичай іноземного виробництва, наприклад, Motovario), що виключає потребу в пасових чи ланцюгових передачах (продуктивність 10 т/год, максимальна висота підйому – до 30м).



Рис. 3.3. Норія зернова Н1-10

Потужність двигуна коливається в межах 1,5 – 2,0 кВт залежно від висоти підйому. Внутрішня поверхня головки має футерування (зносостійке покриття) у місцях удару зерна, що зменшує шум та травмування сільськогосподарського матеріалу. Тяговий робочий орган – антистатична гумотканинна стрічка з закріпленими ковшами (металевими або полімерними).

Хоча продукція «Бронто» вважається надійною у своєму сегменті, споживачі та інженери виділяють кілька слабких місць. Головне – це травмування зерна. Не зважаючи на футерування контактних поверхонь через високу швидкість стрічки (для забезпечення відцентрового викиду) зерно може

битися об стінки головки, якщо не відрегульовано заслінку. Вона є чутливою до вологості. При роботі з вологим або маслянистим сільськогосподарським матеріалом (наприклад, соя після екструдера) він може налипати до дна ковшів, що знижує реальну продуктивність нижче заявлених 10 т/год.

Норія Н-10 виробництва «Будмонтаж Колос» (м. Бориспіль) – це елеваторне обладнання, яке виготовляється за класичною схемою і також розглядається надійне, низько вартісне рішення для малих і середніх фермерських господарств. Виробником в основу покладено простоту конструкції та можливості швидкого виконання монтажу.



Рис. 3.4. Норія зернова Н-10

Конструкція є модульною, що дозволяє збирати норію різної висоти (зазвичай від 3 до 25 метрів) з уніфікованих секцій. Виготовляється з листової сталі товщиною 2–3мм що дозволяє забезпечити жорсткість конструкції та тривалу протидію корозії. Приводна станція, залежно від комплектації оснащена контрприводом або мотор-редуктором. Встановлена потужність –

1,1 – 2,2 кВт, швидкість стрічки – 1,8 м/с. Для запобігання проковзування тягової стрічки ведучий барабан у більшості випадків футерують гумою.

В якості тягового органу використовується гумотканинна стрічка БКНЛ–65 або її аналог. Ковші можуть бути металевими (штампованими) або полімерними.

Норії притаманні наступні недоліки. У бюджетних версіях стінки труб можуть бути тонкими. При інтенсивній експлуатації абразивні культури (наприклад, кукурудза) швидко «протирають» коліна та місця вивантаження.

Якщо обрана норія фарбована (не оцинкована) то через 2 – 3 сезони на відкритому повітрі з'являються сліди корозії, особливо на зварних швах. В базових моделях геометрична форма вивантажувального носка не завжди якісно виконана, тому, при високій швидкості зерно ударяється об задню стінку головки, що збільшує відсоток битого матеріалу. За умови використання сталених ковшів, при зачерпуванні зерна має місце його часткове пошкодження.

Норія НКЗ-10 (рис. 3.5) продуктивністю 10 т/год, яку виготовляє ФОП Тарасевич – це обладнання фермерського класу. Вона розроблена як максимально просте, ремонтпридатне та бюджетне рішення для невеликих господарств, ЗАВів та ліній очищення зерна. В основу конструкції норії покладена стандартна схема.

Як правило норія комплектується черв'ячним мотор-редуктором, що спрощує умови обслуговування приводної станції.

Вивантажувальна головка має похилу форму для забезпечення гравітаційного вивантаження зерна.

В якості тягового органу використана гумотканинна стрічка шириною 125 – 150 мм. Ковші ФОП Тарасевич часто пропонує металеві цільнотягнуті, рідше – полімерні.

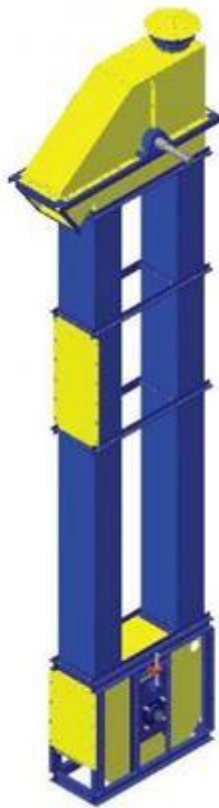


Рис. 3.5. Норія зернова НКЗ-10 (ФОП Тарасевич)

Для здешевлення товару ФОП Тарасевич часто використовує метал товщиною 1,5 – 2,0 мм на норійних трубах, що робить конструкцію менш стійкою при великій висоті (понад 15 метрів), що вимагає встановлення додаткових розтяжок.

Якість підшипників у базовій комплектації часто стоять дешеві підшипникові вузли, які при роботі в запиленому приміщенні вимагають частого змащування та заміни.

Фарбування зазвичай проводиться звичайними ПФ-емалями. Якщо норія стоїть на вулиці без накриття, то через 1 – 2 сезони з'являється іржа на стиках та болтах.

На базових моделях НКЗ-10 зазвичай немає поліуретанових накладок у головці, що призводить до пошкодження зерна, стінок головки норії, підвищення рівня шуму.

Зернові норії (ковшові елеватори) від «Заводу Мороза» - це популярне обладнання для фермерських господарств завдяки їхній відносній доступності

та простоті. Модель НКЗ-10 (рис. 3.6), продуктивністю 10 т/год зазвичай використовується на невеликих зерноочисних агрегатах або для завантаження бункерів.

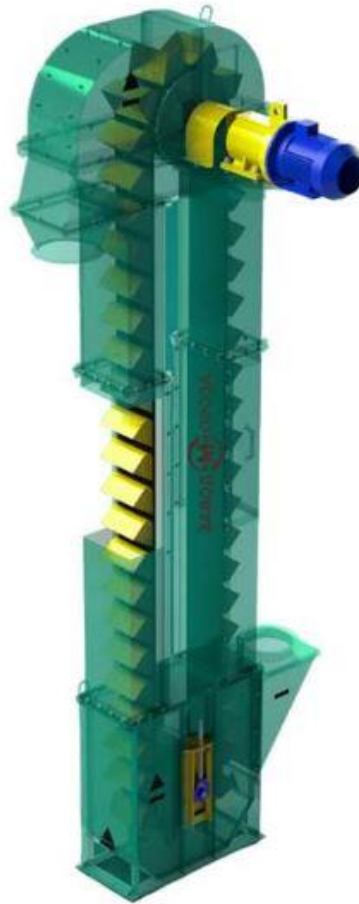


Рис. 3.6. Норія зернова НКЗ-10 (Заводу Мороза)

Загальна будова норії подібна розглянутим вище машинам з невеликими відмінностями та особливостями. Привод робочого органу здійснюється мотор-редуктором. Як і деяких інших виробників внутрішню поверхню головки норії зазвичай футерують гумою або встановлюють потовщений метал, щоб зерно не розбивало корпус при викиді. Норія має деякі недоліки.

На даній норії радіус головки не завжди ідеально розрахований під швидкість стрічки, через що має місце травмування зерна.

При неправильному налаштуванні швидкості частина зерна не вилітає в розвантажувальне вікно, а б'ється об кришку головки або падає назад у шахту, що веде до подрібнення зерна та зайвого пилу.

З запропонованого огляду бачимо, що розглянуті норії різних виробників мають приблизно однакову будову та технічні характеристики. Тяговий орган, це, як правило, гумотканинна стрічка зі стальними ковшами. Як опція, виробники можуть встановити полімерні ковші.

Подібну будову і недоліки має норія НЛК-Ф-10. Дослідженню методів їх усунення, обґрунтуванню параметрів тягового органу та ковшів будуть направлені подальші розробки.

3.2. Теоретичне обґрунтування механізму пошкодження зернівок при захопленні металевим та полімерними ковшами

Поняття «пошкодження зерна» охоплює різноманітні форми механічних дефектів: від субмікроскопічних тріщин у покривних тканинах та ендоспермі, виявлення яких можливе лише в процесі проростання, до видимих неозброєним оком сколів, фрагментації та відривання зародка, що реєструються стандартизованими лабораторними методами. Встановлено, що навіть 5–8% прихованих пошкоджень сільськогосподарського матеріалу призводить до зниження схожості на 15–25%, а у продовольчому зерні мікродефекти суттєво прискорюють окислення ліпідів та активізацію мікробіологічних процесів [4,9,11,19,25].

Ківш норії є першою ланкою силового контакту між твердою поверхнею та зерною масою. Властивості матеріалу ковша визначають характер цієї взаємодії: сталевий ківш характеризується підвищеною жорсткістю та значною питомою масою, натомість полімерний (поліамід, поліпропілен, поліуретан) має знижений модуль пружності та здатен поглинати частину імпульсу удару.

Для проведення подальшого аналізу приймаються значення механічних характеристик основних зернових культур, наведені в таблиці (табл. 3.1)

Таблиця 3.1 Механічні характеристики основних польових культур стандартній кондиційній вологості (12% – 14%).

Культура	Довжина×Ширина, мм	Маса зернівки, m_z , мг	Модуль Юнга, E_z , ГПа	Коефіцієнт Пуассона, ν	Межа міцності, σ_m , МПа	Критична деформація, $\epsilon_{кр}$, %
Пшениця (тверда)	6,5×3,2	40–55	0,6–1,2	0,28–0,32	15–25	1,8–2,5
Пшениця (м'яка)	5,8×3,0	35–45	0,3–0,7	0,30–0,42	10–18	2,0–3,5
Ячмінь	8,5×3,5	40–50	0,4–0,8		8–15	2,5–4,0
Жито	6,0×2,5	25–35	0,2–0,5	0,32–0,44	7–12	2,2–3,8
Кукурудза	9,0×8,0	200–350	0,1–0,4	0,38–0,45	15–12	4,0–8,0
Соняшник	10×5,5	50–90	0,05–0,15	0,22–0,35	1,5–4,5	5,0–12,0
Соя	6,0×8,5	120–220	0,08–0,25	0,40–0,48	3,5–8,0	6,0–15,0

Зруйнування зернівки відбувається за двома провідними механізмами: крихке розтріскування ендосперму при динамічному стисненні та відшарування зовнішніх покривів при дотичному ударі. Умова руйнування у рамках механіки деформованого твердого тіла має вигляд [7]

$$\sigma_{max} \geq \sigma_m, \text{ або } K_I \geq K_{Ic} \quad (3.1)$$

де σ_{max} – найбільше нормальне напруження у тілі зернівки;

σ_m – межа міцності при стисненні або розтягу залежно від виду навантаження;

K_I – коефіцієнт інтенсивності напружень при розкритті тріщини;

K_{Ic} – в'язкість руйнування зернівки ($0,2\text{--}0,8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ для зернівок злакових культур).

У черевіку норії ківш огинає нижній барабан і занурюється у зернову масу. Розглянемо кінематику ковша відносно нерухомого насипу. Нехай швидкість тягового органу дорівнює v , м/с радіус огинання барабана R . Кутовий діапазон захоплення насипу ковшем від початку до завершення контакту становить θ_z (зазвичай $30^\circ\text{--}60^\circ$).

Проекція швидкості лобової стінки ковша на нормаль до насипу при вході

$$v_b = v \cdot \cos\beta \quad (3.2)$$

де β – кут між вектором швидкості тягового органу та нормаллю до лобової стінки. За вертикального входу $\beta = 0$ і $v_b \approx v$.

Нормальна до поверхні ковша складова швидкості визначається як

$$v_n = v \cdot \sin(\alpha + \varphi) \quad (3.3)$$

де α – кут нахилу лобової стінки до вертикалі;

φ – кут повороту ковша від початкового положення.

Саме v_n зумовлює інтенсивність ударної дії на зернівки при захопленні.

Процес захоплення зерна ковшем включає чотири послідовні фази, кожна з яких пов'язана із певним механізмом пошкодження [7]:

– фаза I – початковий удар: передня кромка ковша входить у зернову масу і завдає прямих ударів по зернівках верхнього шару. Це найбільш інтенсивна форма ударного впливу;

– фаза II – просування крізь насип: ківш клиноподібно рухається крізь зернову масу, стискаючи зернівки між лобовою стінкою та сусідніми зернами;

– фаза III – заповнення ковша: зернова маса переміщується по днищу ковша, зернівки ковзають по поверхні стінок – відбувається контактна втома та стирання покривних тканин;

– фаза IV – відрив від насипу: ківш виходить із зернової маси, зернівки у ньому прискорюються та зіштовхуються між собою під час руху вгору.

Розглянемо центральний удар одиничної зернівки масою m_z , що рухається зі швидкістю v_n , об стінку ковша масою M (приймаємо, що маса ковша $M \gg m_z$). Для опису контактної деформації за схемою «сфера – плоска поверхня» застосовується модель Герца.

Радіус контактного відбитку за Герцом

$$a = \frac{3}{4} \left(\frac{F \cdot R_e}{E_e} \right)^{1/3} \quad (3.4)$$

де F – нормальна контактна сила;

R_e – зведений радіус кривини (радіус зернівки R_z для контакту сфера-площина);

E_e – зведений модуль пружності контактної пари

$$\frac{1}{E_e} = \frac{(1-\nu_z^2)}{E_z} + \frac{(1-\nu_k^2)}{E_k} \quad (3.5)$$

де E_z, ν_z – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона зернівки;

E_k, ν_k – аналогічні характеристики матеріалу ковша.

Максимальний тиск у центрі контактного відбитку (тиск Герца)

$$P_0 = \frac{(3F)}{2\pi a^2} = \frac{(6 \cdot F \cdot E_e^2)^{1/3}}{(\pi^3 \cdot R_e^2)^{1/3} \cdot E_e^{2/3}} \quad (3.6)$$

Найбільше напруження розтягу виникає на периферії контактного відбитку на глибині $\approx 0,5a$ і для ізотропного матеріалу дорівнює

$$\sigma_{rmax} = P_0 \frac{1-2\nu_3}{3} \quad (3.7)$$

При $\nu_3 \approx 0,3$ отримуємо $\sigma_{rmax} = 0,133 \cdot P_0$. Саме ці радіальні напруження розтягу є первинною причиною виникнення та поширення радіальних тріщин в ендоспермі зернівки.

При ударі зернівки об стінку ковша кінетична енергія частково акумулюється як пружна деформація E_{π} частково витрачається на пластичну деформацію і руйнування матеріалу E_p , а решта повертається у вигляді відбитої енергії $E_{відб}$

$$E_k = E_{\pi} + E_p + E_{відб} \quad (3.8)$$

Кінетична енергія зернівки безпосередньо перед зіткненням

$$E_k = \frac{m_3 \cdot v_n^2}{2} \quad (3.9)$$

Коефіцієнт відновлення швидкості при ударі $e = \frac{v_{відб}}{v_n}$. Для пари «зернівка–сталь» $e \approx 0,6 - 0,8$, для «зернівка–полімер» – $e \approx 0,3 - 0,6$. Частка кінетичної енергії, що розсіюється

$$E_{дис} = E_k(1 - e^2) = \frac{m_3 \cdot v_n^2 \cdot (1 - e^2)}{2} \quad (3.10)$$

Пошкодження зернівки починається тоді, коли розсіяна енергія перевищує питому енергію руйнування, помножену на деформований об'єм. Порогова швидкість удару, при якій ініціюються перші мікротріщини

$$v_{кр} = \sqrt{\frac{2 \cdot W_p}{m_3(1 - e^2)}} \quad (3.11)$$

де W_p – гранична енергія руйнування зернівки, Дж.

Одним із визначальних чинників схильності зерна до пошкодження є його вологість. Зі збільшенням вологості W (%) модуль пружності зернівки знижується за приблизно лінійним законом (у діапазоні 10 – 20%) [7,24,25].

$$E_3(W) = E_{3,\text{сух}} \cdot (1 - k_W(W - W_0)) \quad (3.12)$$

де $E_{3,\text{сух}}$ – модуль Юнга сухого зерна;

$k_W \approx 0,03 - 0,06\%^{-1}$ – коефіцієнт вологісної чутливості;

$W_0 = 10 - 12\%$ – базова вологість.

Водночас зростає пластичність і знижується крихкість, тому порогова швидкість травмування $v_{\text{кр}}$ збільшується зі зростанням вологості – волога зернівка витримує більш інтенсивні удари без руйнування (рис. 3.9). Визначимо вплив вологості на механічні властивості зерна на прикладі твердої пшениці (табл. 3.2) [7,24,25].

Таблиця 3.2 – Вплив вологості на механічні властивості та усереднену порогову швидкість удару (пшениця тверда) ковшів різних матеріалів.

Вологість, W, %	E_3 , ГПа	W_p , порогова енергія руйнування, мДж	σ_m стиснення, МПа	$v_{\text{кр}}$ (сталь), м/с	$v_{\text{кр}}$ (полімер), м/с
10	3,5–4,5	15–25	25–35	4,5–5,5	6,5–7,5
12	2,8–3,5	25–40	18–25	5,0–6,0	7,0–8,0
14	1,8–2,5	45–65	12–16	5,5–6,5	7,5–9,0
16	0,9–1,4	70–95	7–10	6,2–7,5	8,5–10,5
18	0,4–0,7	100–140	4–6	7,0–8,5	9,5–12,0

Для порівняльного аналізу властивостей матеріалів, що можуть використовуватись для виготовлення ковшів норій, складено таблицю (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Фізико-механічні властивості матеріалів ковшів норії

Характеристика	Сталь 3	Поліамід PA-6	Поліпропілен PP	Поліуретан PU
Модуль Юнга, E_k , ГПа	200	2,5–3,5	1,0–1,5	0,01–0,05
Коефіцієнт Пуассона, ν_k	0,30	0,39	0,43	0,48
Межа міцності σ_m , МПа	380	75–85	30–40	20–40
Твердість, НВ	130	120 (HRC)	70 (Shore)	60–80 (Shore)
Коефіцієнт відновлення, e	0,65–0,80	0,45–0,60	0,40–0,55	0,25–0,40
Коефіцієнт тертя, μ (зернівка)	0,30–0,40	0,20–0,30	0,20–0,28	0,35–0,50
Питома маса, кг/м ³	7850	1130	900	1100–1250

Ключовим параметром, що визначає ступінь ударного навантаження, є зведений модуль пружності E_e контактної пари «зернівка–ківш» (формула 3.5). Розрахункові значення E_e для різних поєднань пар контактування (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Зведений модуль пружності для різних контактних пар

Пара контакту	E_z , ГПа	E_k , ГПа	ν_z	ν_k	E_e , ГПа	Відношення E_e (сталь)/ E_e
Зернівка – Сталь	3,0	210	0,30	0,30	2,93	1,00 (базове)
Зернівка – Поліамід РА-6	3,0	3,2	0,30	0,39	1,23	0,42
Зернівка – Поліпропілен РР	3,0	1,3	0,30	0,43	0,90	0,31
Зернівка – Поліуретан PU	3,0	0,03	0,30	0,48	0,028	0,01

Аналіз таблиці 3.4 свідчить, що перехід від сталевого ковша до ковша з поліаміду РА-6 зменшує E_e більш ніж удвічі, з поліпропілену – більш ніж утричі, а поліуретану – майже у 100 разів. Це безпосередньо позначається на максимальному тиску Герца і, відповідно, на ймовірності механічного пошкодження зернівки.

Підставляючи відповідні значення e у формулу (3.11), отримаємо порогові швидкості початку пошкодження для твердої пшениці при вологості 14% (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Порогові швидкості пошкодження зернівки пшениці твердої ($W = 10\%$) для різних матеріалів ковша.

Матеріал ковша	E_e , ГПа	Коефіцієнт відновлення - e	$1 - e^2$	$v_{кр}$, м/с	Приріст $v_{кр}$ до сталі, %
Сталь (базове)	2,93	0,72	0,48	5,8	–
Нержавіюча сталь	2,93	0,70	0,51	5,6	+0%
Поліамід РА-6	1,23	0,55	0,70	6,8	+17%
Поліпропілен РР	0,90	0,50	0,75	7,0	+21%
Поліуретан PU	0,028	0,33	0,89	7,6	+31%

Аналогічно отримаємо порогові швидкості пошкодження зернівки для інших значень вологості в напрямку зростання до $W = 18\%$, матеріалу з якого виготовлено ковші норії та побудуємо відповідні графічні залежності (рис. 3.7).

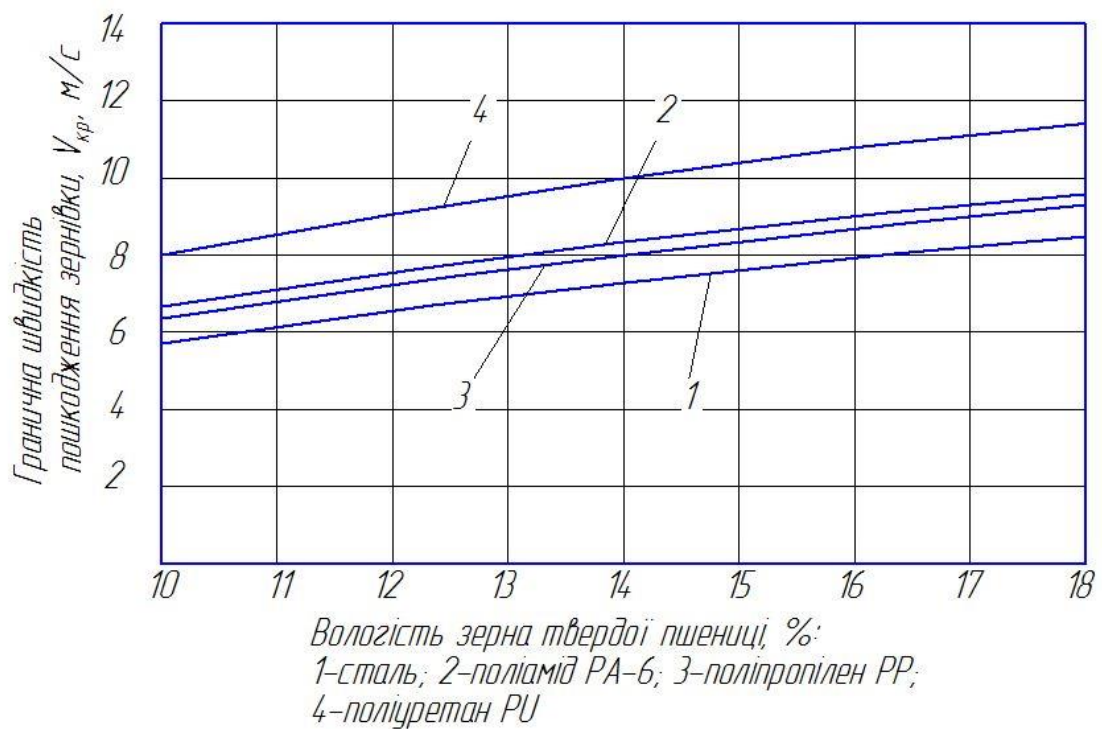


Рис. 3.7 Залежність порогової швидкості пошкодження зернівки від її вологості та матеріалу ковша

Бачимо, що ківш виготовлений з поліуретану має майже на 30% вищу $V_{кр}$ в порівнянні зі сталевим за будь-якої вологості зерна. Слід зазначити, що зона вологості 10 – 12% є найбільш небезпечною так як ківш контактує з сухою крихкою зернівкою.

Розглянемо вплив на порогову швидкість пошкодження зернівок основних польових культур ковшів виготовлених з різних матеріалів (рис. 3.8): сталі, як найбільш поширеного матеріалу, і поліуретану PU, як найбільш ефективний матеріал (див. рис. 3.7)

Бачимо, що для всіх польових культур гранична швидкість пошкодження їх зернівок при контакті з ковшами виготовленими з поліуретану PU значно вища ніж для сталевих ковшів.

Кукурудза має найвищу граничну швидкість, соняшник – найнижчу.

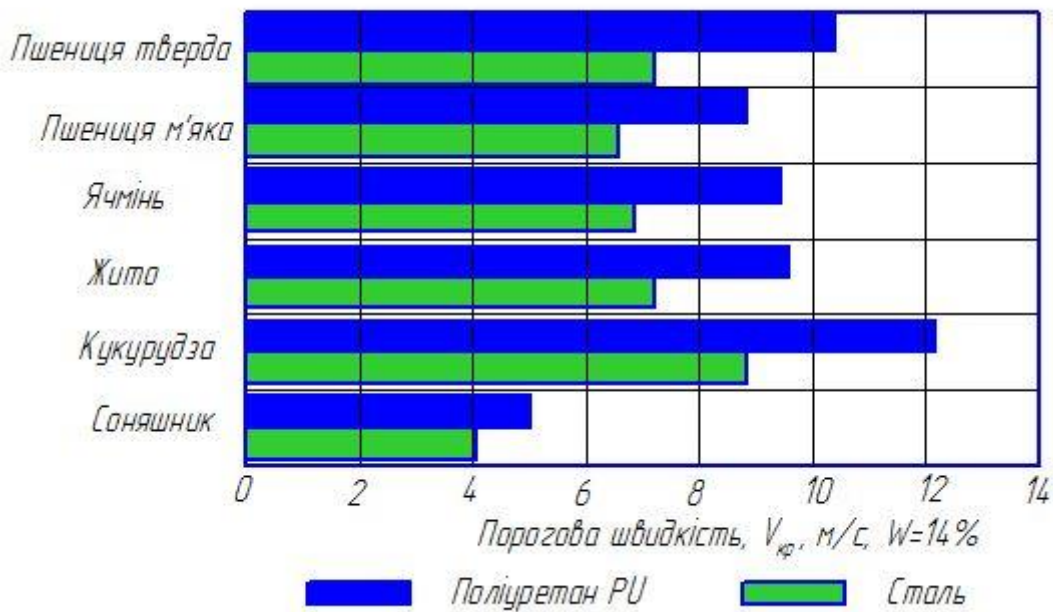


Рис. 3.8. Залежність значення порогової швидкості пошкодження зернівок основних польових культур від матеріалу ковшів при їх оптимальній вологості

Розглянемо вплив геометричних параметрів ковша на інтенсивність пошкодження зернової маси.

Кут нахилу лобової стінки ковша α визначає нормальну складову швидкості зіткнення $v_n = v \cdot \sin \alpha$ при горизонтальному вході ковша в насип. Зменшення кута α відповідає гострішому входу і нижчому значенню нормальної складової

$$v_n = v \cdot \sin \alpha \quad (3.13)$$

При $\alpha = 30^\circ$ – $v_n = 0,5v$; при $\alpha = 60^\circ$ – $v_n = 0,866v$. Таким чином, зменшення кута положення лобової стінки з 60° до 30° вдвічі знижує ударне навантаження на зернівку. Проте надмірне загострення ускладнює процес захоплення і зменшує продуктивність, тому оптимальним приймемо діапазон $\alpha = 40-45^\circ$.

Радіус округлення кромки ковша r_k також суттєво впливає на рівень пошкодження: гостра кромка ($r_k \rightarrow 0$) концентрує навантаження на першу зустрічну зернівку, що може спричинити перерізання покривних тканин. Для

сталевих ковшів рекомендується $r_k \geq 5$ мм (полімерні ковші набувають природного округлення в результаті технологічного процесу лиття).

Висновки по розділу. Проведений аналіз конструкцій зернових норій показав, що основним недоліком більшості розглянутих машин є пошкодження зерна внаслідок ударного контакту з металевими ковшами та неоптимальних властивостей транспортуючого органу. Літературний огляд вказав на доцільність використання синтетичних тягових стрічок. Теоретичне обґрунтування підтвердило, що застосування поліуретанових ковшів підвищує порогову швидкість пошкодження зернівок на 30% порівняно зі сталевими. Оптимальний кут нахилу лобової стінки ковша $\alpha = 40-45^\circ$ забезпечує зниження ударного навантаження при збереженні продуктивності. Встановлено, що найбільш критичним діапазоном вологості є 10 – 12%, коли зернівки є найбільш крихкими.

4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

В попередньому розділі було приділено увагу дослідженню ефективності використання полімерних матеріалів для виготовлення та використання в якості тягової стрічки та ковшів зернової норії. Виконаємо інженерні розрахунки, які дадуть відповідь на технічну спроможність даної конструкції.

4.1. Визначення параметрів ковшів та кроку

Геометричні характеристики ковша норії з відцентровим типом розвантаження визначають такі параметри: виліт та ширину, висоту передньої та задньої стінок, довжину передньої частини, а також радіус заокруглення дна. На ефективність наповнення ковша (коефіцієнт ψ) безпосередньо впливають фізичні властивості сільськогосподарського матеріалу (сипкість) та висота, на яку він піднімається.

Визначаємо об'єм ковша

$$V_k = \frac{Q \cdot t}{3,6 \cdot \psi \cdot \rho \cdot v} \quad (4.1)$$

де $Q = 10$ т/год – продуктивність норії;

$t = 0,40$ м – крок ковшів;

$v = 1,8$ м/с – швидкість стрічки норії;

$\rho = 0,75$ т/м³ – середня щільність зерна (для пшениці);

$\psi = 0,75$ – коефіцієнт заповнення (для пшениці).

Тут, рекомендоване значення кроку ковшів $t = 200 - 300$ мм [2,4,5].

Тоді

$$V_k = \frac{10 \cdot 0,40}{3,6 \cdot 0,75 \cdot 0,75 \cdot 1,8} = 1,23 \text{ л}$$

Призначаємо об'єм ковша $V_k = 1,25$ л при його ширині 160 мм. Таке збільшення об'єму пояснюється тим, що є культури (соняшник, ячмінь, ріпак тощо), які мають значно меншу насипну щільність, а продуктивність норії потрібно забезпечити.

Оптимальний виліт ковша

$$h \approx (0,8 - 0,9) B_k \quad (4.2)$$

де $B_k = 160$ мм – ширина ковша.

Тоді

$$h \approx 0,85 \cdot 160 = 136 \text{ мм}$$

Радіус дна ковша r_k [Гевко]

$$r_k = 0,294 \cdot h = 0,294 \cdot 136 = 40 \text{ мм}$$

Висота передньої стінки [Гевко]

$$l \approx 0,75 \cdot h = 0,75 \cdot 136 = 102 \text{ мм}$$

Висота задньої стінки [Гевко]

$$H = (1,1 - 1,3)h \quad (4.3)$$

$$H = 1,1 \cdot 136 = 149 \text{ мм}$$

Кут нахилу передньої стінки ковша $\alpha = 42^\circ$.

Модель спроектованого ковша можна бачити на рис. 4.1.

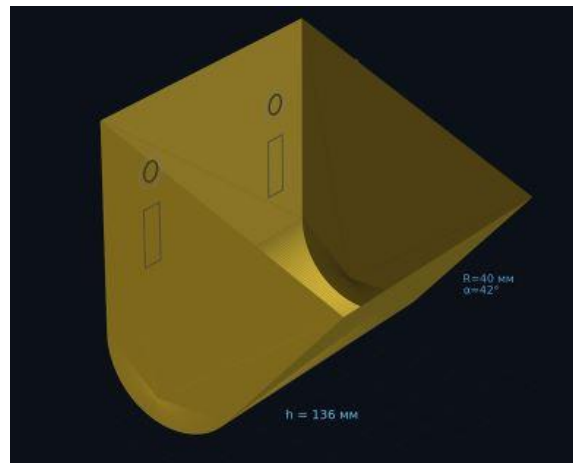


Рис. 4.1. Модель спроектованого ковша норії.

Згідно рекомендацій запропонованих в третьому розділі матеріалом ковша призначаємо поліуретан PU Shore A 85-90. Використання даного матеріалу забезпечить зниження матеріалоемності ковша в 4–5 разів, зменшення пошкодження зерна на 10 – 15%, усунення корозійних процесів, підвищення абразивної зносостійкості 5–8 разів.

Визначимо діаметр ведучого барабану. Найпоширенішим методом розрахунку приводного барабана є використання в якості вихідних даних товщину та структуру стрічки. Попередньо призначаємо стрічку синтетичну

типу БКНЛ-65. Щоб стрічка служила довго, діаметр барабана D_6 має відповідати кількості волоконних прокладок i

$$D_6 = k \cdot i \quad (4.4)$$

де $k \approx 125-150$ – коефіцієнт, значення якого залежить від типу тканини стрічки;

$i = 4$ – кількість прокладок.

Тоді

$$D_6 = 125 \cdot 4 = 500 \text{ мм}$$

Призначаємо $D_6 = 500 \text{ мм}$

Обираємо параметри норійної стрічки. Її ширина повинна бути на 15–150 мм більшою ширини ковша [2,3,4,5]. Тому, для нашого варіанту прийнятною буде її ширина – 175 мм.

Визначимо її довжину з урахування того, що висота підйому - $H_{\text{п}} = 11 \text{ м}$

$$L_c = 2H_{\text{п}} + 2\pi r \quad (4.5)$$

де $r = 0,25 \text{ м}$ – радіус барабана

$$L_c = 2 \cdot 11 + 2 \cdot 3,14 \cdot 0,25 = 23,6 \text{ м}$$

Число ковшів

$$K = \frac{L_c}{t} \quad (4.6)$$

$$K = \frac{23,6}{0,40} = 59 \text{ ковшів}$$

Тяговий розрахунок. У даному розрахунку визначимо натяг S_{max} у точці набігання на ведучий (привідний) барабан. Саме в ній на стрічку діє найбільше навантаження оскільки тут вона утримує вагу висхідної гілки норії з зерном і долає сили опору, які створюються в черевіку.

$$S_{\text{max}} = S_{\text{min}} + (g_{\text{в}} + g_{\text{стр}} + g_{\text{к}}) \cdot g \cdot H + W_{\text{зач}} \quad (4.7)$$

де $g_{\text{в}}$ – маса вантажу, кг/м;

$$g_{\text{в}} = \frac{Q}{3,6 \cdot v} = \frac{10}{3,6 \cdot 1,8} = 1,54 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$$

$g_{\text{стр}}$ – маса одного погонного метра стрічки, кг/м

$$g_{\text{стр}} = B \cdot \delta \cdot \rho_{\text{стр}} \quad (4.8)$$

де $\delta = 4$ – кількість прокладок;

$B = 0,175$ м – ширина стрічки;

$\rho_{\text{стр}} = 1,15$ кг/м² – маса однієї прокладки стрічки БКНЛ-65 на м².

$$g_{\text{стр}} = 0,175 \cdot 4 \cdot 1,15 = 0,8 \text{ кг/м}^2$$

$g_{\text{к}} = \frac{m_{\text{к}}}{a}$ – лінійна маса ковшів, кг,

$m_{\text{к}} \approx 0,48$ кг – приблизна маса ковша об'ємом 1,25 л з поліуретану.

$$g_{\text{к}} = \frac{0,48}{0,4} = 1,2 \text{ кг}$$

Визначимо значення опору зачерпуванню в черевіку норії

$$W_{\text{зач}} \approx 1,5 \cdot g_{\text{в}} \cdot g = 1,5 \cdot 1,54 \cdot 9,8 = 22,6 \text{ Н}$$

S_{min} – натяг у точці збігання з ведучого барабана. Цей натяг забезпечується натяжним пристроєм норії. Цей показник коливається в межах

$S_{\text{min}} = 500\text{--}700$ Н. Призначаємо $S_{\text{min}} = 600$ Н.

Тоді

$$S_{\text{max}} = 700 + (1,54 + 0,8 + 1,2) \cdot 9,81 \cdot 11 + 22,6 = 1104,6 \text{ Н}$$

Перевірка міцності стрічки БКНЛ-65.

Згідно з технічною характеристикою розривне зусилля зазначеної стрічки складає $R_{\text{розр}} = 65$ Н/мм – на одну прокладку.

Загальне розрахункове розривне зусилля стрічки визначиться

$$P_{\text{розр}} = B \cdot \delta \cdot R_{\text{розр}} \quad (4.9)$$

$$P_{\text{розр}} = 175 \cdot 4 \cdot 65 = 45500 \text{ Н}$$

Визначимо розрахунковий коефіцієнт запасу міцності стрічки

$$k_{\text{зм}} = \frac{P_{\text{розр}}}{S_{\text{max}}} = \frac{45500}{1104,6} \approx 41$$

Бачимо, що при нормативному значенні коефіцієнту запасу міцності близько 10 міцність стрічки значно вища, що гарантує довготривалий термін її експлуатації при множинних її згинах.

Визначення розрахункового колового зусилля. Його розрахуємо через різницю натягів

$$F_t = S_{max} - S_{min} = 1104,6 - 700 = 404,6 \text{ Н}$$

Розрахунок потужності двигуна

$$N_{дв} = \frac{F_t \cdot v}{1000} = \frac{404,6 \cdot 1,8}{1000} = 0,73 \text{ кВт}$$

З урахуванням ККД механізму приводу ($\eta = 0,85$ редуктора) та коефіцієнту запасу на пуск ($k_3 = 1,3$) отримаємо фактичне значення потужності двигуна

$$N_{дв}^{\phi} = \frac{N_{дв}}{\eta} k_3 = \frac{0,73}{0,85} 1,3 = 1,12 \text{ кВт}$$

Призначаємо для приводу потужність двигуна мотор редуктора 2,2 кВт, що надасть норії універсальності в плані її переналаштування за потреби на продуктивність 20 т/год.

Висновок по розділу. Наведений розрахунок підтвердив технічну спроможність конструкції. Матеріалом для виготовлення ковша призначено поліуретан *PU Shore A 85–90*. Використання даного матеріалу забезпечить зниження матеріалоємності ковша в 4–5 разів в порівнянні з металевими, зменшення пошкодження зерна на 10 – 15%, усунення корозійних процесів, підвищення абразивної зносостійкості 5–8 разів. Застосування синтетичної стрічки БКНЛ-65 підтверджено високим запасом міцності ($k_{зм} = 41$) та дозволяє використовувати електропривод потужністю 2,2 кВт, що гарантує надійну роботу норії при підйомі зерна на 11 м.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

Зернова норія є важливим механізмом, який забезпечує вертикальне переміщення сільськогосподарського матеріалу на елеваторах, в кормоцехах та переробних підприємствах. Через значну конструктивну складність, норія є джерелом підвищеної небезпеки. Усі виробничі фактори розділяють на небезпечні, які здатні спричинити травму, та шкідливі, які можуть викликати захворювання [8].

Тяговий орган (стрічка) норії рухається зі швидкістю 1,5–4,5 м/с. Небезпека виникає через незахищені рухомі елементи – приводний і натяжний (ведений) барабани, відкриті передачі – створюють ризик защемлення та захоплення частин тіла. Ковші при русі можуть завдати тяжкої механічної травми. За даними Держпраці України, травми від рухомих частин транспортуючого обладнання становлять до 18% нещасних випадків на підприємствах пов'язаних з зерновим бізнесом [6].

Зерновий пил утворює з повітрям вибухонебезпечну масу із нижньою концентраційною межею займання 20 – 50 г/м³. Замкнений простір норійної труби є зоною постійного накопичення пилу. Такі об'єкти відносяться до категорії «Б» за вибухопожежонебезпекою [17]. Значна кількість катастрофічних аварій на елеваторах зумовлена саме займанням пилоповітряної суміші всередині норії [28].

Буксування або провисання стрічки спричиняє її тертя об кожух і барабани. Локальна температура при цьому може перевищувати 200⁰С, що є достатнім для займання пилу та стрічки. Перегрів підшипникових вузлів приводу є однією з найпоширеніших причин пожеж на норійних установках [27].

Привод норії здійснюється електродвигуном. Присутність пилу та вологи підвищує ймовірність ураження електричним струмом. [28].

Рівень шуму в зоні приводної головки норії становить 85 – 105 дБА, що перевищує допустиме значення 80 дБА. Тривалий вплив шуму понад норму

призводить до негативного впливу на слуховий апарат оператора та розладів його нервової системи.

Технічне обслуговування норій може виконуватися на значній висоті. Несправні або відсутні огорожі площадок і сходів є причиною нещасних випадків.

Висока концентрація зернового пилу у повітрі робочої зони не повинна перевищувати 4 мг/м^3 [17]. Тривалий вплив пилу призводить до розвитку захворювань, пов'язаних з розладами дихальної системи.

В роботі пропонуються заходи щодо недопущення або усунення небезпечних факторів

Усі рухомі частини норії повинні бути огорожені захисними кожухами відповідно. Норія потрібно обладнати датчиком контролю швидкості стрічки (антибоксувальним реле), датчиком підпору зерна в черевіку, датчиками температури підшипників, пристроєм гальмування стрічки при зупинці, а також системою аварійної зупинки. Норійна труба повинна мати вибухорозрядні клапани (вікна), що скидають тиск при вибуху пилу назовні безпечним чином.

На норійних установках обов'язково необхідно встановити автоматичну систему пожежогасіння (спринклерну або аерозольну) та систему аспірації (місцевого відсмоктування пилу). Ефективна аспірація забезпечує концентрацію пилу нижче нижньої межі займання. Регулярне прибирання пилових відкладень є обов'язковою умовою протипожежної безпеки.

До обслуговування норій допускаються особи не молодші 18 років, які пройшли медичний огляд, навчання з охорони праці та перевірку відповідних знань. Роботи всередині норійної труби та у важкодоступних місцях виконуються як роботи підвищеної небезпеки – за нарядом-допуском з обов'язковим відключенням електроприводу і встановленням замків-блокувань. Оператор та інший персонал, що обслуговує норії, потрібно забезпечити протипиловими, протишумовими навушниками або берушами, захисними окулярами, спецодягом з антистатичних матеріалів, а також страхувальними системами при роботі на висоті

Планово-попереджувальне технічне обслуговування норій необхідно проводити згідно вимог заводу-виробника та за затвердженим графіком планово-попереджувальних робіт. Перед кожною зміною потрібно перевірити натяг стрічки, стан ковшів, температуру підшипників і справність захисних огорожень. Щорічно необхідно забезпечити проведення повної технічної діагностики з оцінкою залишкового ресурсу вузлів.

Висновки по розділу. Зернова норія є складним і потенційно небезпечним об'єктом, на якому одночасно діє цілий комплекс небезпечних та шкідливих виробничих факторів. Ефективна профілактика нещасних випадків і аварій забезпечується лише комплексним підходом, поєднанням технічних засобів захисту, суворим дотриманням вимог нормативних документів, систематичним навчанням персоналу та постійним технічним контролем. Виконання зазначених заходів є необхідною умовою збереження життя і здоров'я працівників.

6. ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі проведено дослідження, спрямоване на підвищення ефективності роботи ковшової норії НЛК-Ф-10 шляхом модернізації її транспортуючого органу з метою мінімізації механічного пошкодження зернівок під час вертикального транспортування.

Аналіз сучасного стану питання та огляд наукових публікацій вітчизняних і закордонних дослідників засвідчили, що основним недоліком переважної більшості ковшових норій є механічне травмування зерна, яке виникає внаслідок ударного контакту зернівок із жорсткими металевими ковшами. Навіть 5–8% прихованих пошкоджень сільськогосподарського матеріалу призводить до зниження схожості на 15–25% та суттєво погіршує товарну якість зерна. Огляд конструкцій норій різних виробників підтвердив, що дана проблема є типовою для всього класу подібних машин і потребує системного конструктивного вирішення.

Теоретичні дослідження базувалися на аналізі контактної взаємодії зернівки з поверхнею ковша із застосуванням моделі Герца та механіки деформованого твердого тіла. Встановлено, що перехід від сталевих ковшів до поліуретанових знижує зведений модуль пружності контактної пари майже у 100 разів, що безпосередньо зменшує максимальний тиск у зоні контакту. Розраховано порогові швидкості пошкодження зернівок, для поліуретанових ковшів цей показник на 30% вищий порівняно зі сталевими для всіх досліджуваних польових культур. Визначено оптимальний кут нахилу лобової стінки ковша $\alpha = 40-45^{\circ}$, який забезпечує зниження ударного навантаження при збереженні продуктивності норії. Встановлено, що найбільш критичним з точки зору травмування є діапазон вологості зерна 10–12%, за якого зернівки є найбільш крихкими.

За результатами інженерних розрахунків обґрунтовано конструктивні параметри модернізованого транспортуючого органу норії НЛК-Ф-10 продуктивністю 10 т/год. Об'єм ковша визначено рівним 1,25 літра при ширині 160 мм, кут нахилу лобової стінки $\alpha = 42^{\circ}$. Матеріалом для виготовлення

ковша призначено поліуретан PU Shore A 85–90, що забезпечує зниження матеріалоемності у 4–5 разів порівняно з металевими аналогами, підвищення абразивної зносостійкості у 5–8 разів та усунення корозійних процесів. Для тягового органу обрано синтетичну стрічку БКНЛ-65 шириною 175 мм, розрахунковий коефіцієнт запасу міцності якої склав $k_z = 41$, що суттєво перевищує нормативне значення і гарантує тривалий ресурс експлуатації.

У розділі охорони праці визначено комплекс небезпечних і шкідливих виробничих факторів, характерних для експлуатації зернових норій та запропоновано заходи щодо їх усунення.

Практична значущість роботи полягає у розробці технічно обґрунтованих рішень щодо модернізації норії, реалізація яких дозволить підвищити збереженість зернової продукції, знизити енергоспоживання та збільшити ресурс роботи транспортуючого органу.

Список використаної літератури

1. Гайдамака В. В. Вплив геометричних параметрів привідного барабана на довговічність тягової стрічки зернової норії // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь, 2011. – Вип. 11, т. 2. – С. 45–52.
2. Гевко Б. М. Транспортуючі машини : підручник. – Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. – 232 с.
3. Гевко Р. Б., Вітровий А. О., Пік А. І. Підвищення технічного рівня елеваторних конвеєрів : монографія. – Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2012. – 188 с.
4. Гевко Р. Б., Клендій М. Б. Обґрунтування конструктивно-кінематичних параметрів ковшів із еластичною задньою стінкою // Наукові нотатки. – 2014. – Вип. 45. – С. 98–103.
5. Гевко Р. Б., Ляшук О. Л., Рогатинський Р. М. Обґрунтування конструктивних параметрів гнучких тягових органів вертикальних конвеєрів // Вісник машинобудування та транспорту. – 2022. – № 1 (15). – С. 22–30.
6. Демченко В. В., Козловський В. Г. Безпека праці на зернопереробних підприємствах. – Київ : Урожай, 2019. – 248 с.
7. Дідур В. А., Кононенко А. Ф., Панченко С. В. та ін. Наукові основи мінімізації травмування насіння при збиранні та зберіганні : монографія. – Запоріжжя : ЗДІА, 2012. – 340 с.
8. ДСТУ 2293:2014. Охорона праці. Терміни та визначення основних понять. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015.
9. Коробко А. І. Порівняльна характеристика експлуатаційних властивостей сталевих та полімерних ковшів для зернових норій // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. – Вінниця, 2018. – Вип. 10. – С. 45–52.
10. Krol R., Gladysiewicz L. Testing of indentation rolling resistance of grain elevator belts // Measurement. – 2024. – Vol. 210. – P. 112–540.

11. Кухтов В. Г. Зниження травмування насіння зернових культур робочими органами норій // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків, 2015. – Вип. 165. – С. 122–128.
12. Куценко П. С., Степанов О. В. Підйомно-транспортні машини : підручник для студ. вищ. навч. закл. – Київ : Вища школа, 1993. – 384 с.
13. Zhang L., Wang J. Dynamic modeling and fatigue life prediction of steel cord conveyor belts in high-lift elevators // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2022. – Vol. 36, No. 8. – P. 3945–3957.
14. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О. Динамічний аналіз та оптимізація механізмів підйомно-транспортних машин : монографія. – Київ : ЦП «Компринт», 2017. – 312 с.
15. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів : підручник / Л. М. Тіщенко, М. С. Вольвач, С. І. Корінь [та ін.] ; за ред. Л. М. Тіщенка. – Харків : ХНТУСГ, 2011. – 240 с.
16. Müller S. et al. Energy efficiency of traction elements in vertical grain transport systems: a comparative study of belts vs. chains // Biosystems Engineering. – 2023. – Vol. 221. – P. 112–125.
17. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. – Київ : МВС України, 2014.
18. Ольшанський В. П., Тіщенко Л. М., Ольшанський С. В. Розрахунок ударного навантаження при контакті зернини з плоскою поверхнею // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Харків, 2014. – Вип. 154. – С. 3–9.
19. Пилипака С. Г., Вольський В. В. Рух зернового матеріалу при взаємодії з тяговим органом ковшового елеватора // Механізація та електрифікація сільського господарства. – 2023. – Вип. 16. – С. 88–95.
20. Погорілий В. В. Експериментальні дослідження фізико-механічних властивостей сучасних полімерних стрічок для елеваторів // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для

сільського господарства України. – Дослідницьке, 2015. – Вип. 19 (1). – С. 134–140.

21. Rogatii R., Kalinichenko O. Investigation of the stress-strain state of the elevator belt in the zones of bucket attachment // Journal of Food Process Engineering. – Hoboken, 2021. – Vol. 14, No. 2. – P. 45–53.

22. Стрічки конвеєрні гумотканинні. Технічні умови : ДСТУ 2262-93 (ГОСТ 20-85). – [Чинний від 1995-01-01]. – Київ : Держспоживстандарт України, 1994. – 45 с. – (Державний стандарт України).

23. Стрічки конвеєрні. Стрічки конвеєрні з текстильним каркасом та гумовим або пластмасовим покриттям для загального призначення. Технічні умови : ДСТУ EN ISO 14890:2019 (EN ISO 14890:2013, IDT; ISO 14890:2013, IDT). – [Чинний від 2020-01-01]. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 28 с. – (Національний стандарт України).

24. Тіщенко Л. М. Теорія і розрахунок зерноочисних машин та елеваторів : монографія. – Харків : Міськдрук, 2011. – 480 с.

25. Тіщенко Л. М., Ольшанський В. П., Котенко О. В. Математична модель ударної взаємодії зернини з кромкою ковша норії // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. – Київ, 2019. – Вип. 210. – С. 14–22.

26. Тихон П. С. Обґрунтування параметрів і режимів роботи стрічкового тягового органу зернової норії : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11 / Тихон Павло Степанович ; Терноп. держ. техн. ун-т ім. І. Пулюя. – Тернопіль, 2006. – 164 с.

27. Тяговий орган ковшового елеватора : пат. 106246 Україна : МПК В65G 17/00 / Гевко Р. Б., Вітровий А. О., Пік А. І. ; заявник і власник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – № u201509833 ; заявл. 12.10.2015 ; опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8.

28. Шаповал Є. М. Аналіз причин вибухів пилоповітряних сумішей на елеваторах України // Зернові продукти і комбікорми. – 2021. – № 3. – С. 42–47.

ЗМІСТ

	стор.
1. Вступ	5
2. Стан досліджуваного питання та вибір напрямку досліджень	7
3. Наукова частина	19
4. Практична реалізація результатів досліджень	36
5. Охорона праці	41
6. Загальні висновки	44
Список використаної літератури	46