Додаток В

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСТИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет Конструювання та дизайну

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
Конструювання машин і обладнання
(назва кафедри)
_____ Вячеслав ЛОВЕЙКІН
(підпис) (ПІБ)
"___" _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ШНЕКОВОГО КОНВЕЄРА ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ КОРМІВ

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування
(код і назва)

Гарант освітньої програми
д.т.н., професор _____ Володимир БУЛГАКОВ
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи
д.т.н., професор _____ Вячеслав ЛОВЕЙКІН
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

_к.т.н._____ _____ Анастасія ЛЯШКО
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Виконав _____ Скобель Ілля Юрійович
(підпис) (ПІБ студента)

КИЇВ – 2026

Додаток Д

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСТИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет Конструювання та дизайну

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Конструювання машин і обладнання
д.т.н., професор _____ **Вячеслав ЛОВЕЙКІН**
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)
"____" _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Скобеля Іллі Юрійовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування
(код і назва)

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проекту бакалавра) **РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ШНЕКОВОГО КОНВЕЄРА ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ КОРМІВ**

затверджена наказом ректора НУБіП України від "15" квітня 2026 р. №1044 «С»

Термін подання завершеної роботи (проекту) на кафедру 2026 червня 04
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проекту бакалавра)
Технологічна схема застосування шекового конвеєра для транспортування кормів

Перелік питань, які потрібно розробити:
1. Провести аналіз існуючих конструкцій шнекових конвеєрів
2. Розглянути перспективи створення нової конструкції шнекового конвеєра
3. Виконати розрахунок шнекового конвеєра
4. Розглянути питання охорони праці при роботі з шнековим конвеєром
5. Виконати розрахунок економічної ефективності

Перелік графічних документів (за потреби)
1. Загальний вигляд
2. Креслення вузла

Дата видачі завдання "16"квітня 2026 р.

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

_____ Вячеслав ЛОВЕЙКІН.
(підпис) (прізвище та ініціали)

_____ Анастасія ЛЯШКО
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____ Ілля СКОБЕЛЬ
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

ЗМІСТ

ЗМІСТ 3
РЕФЕРАТ 5
ВСТУП 7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ КОНСТРУКЦІЙ ШНЕКОВИХ КОНВЕЄРІВ 9
1.1.Призначення та область застосування шнекових конвеєрів 9
1.2.Класифікація шнекових конвеєрів 11
1.3.Загальна будова шнекового конвеєра 14
1.4.Конструкції шнеків 15
1.5.Конструкції підшипникових вузлів 17
1.6.Конструкції приводів шнекових конвеєрів 18
1.7.Огляд конструкцій шнекових конвеєрів виробників 19
1.8.Перспективні технологічні розробки 21
1.9.Патентний пошук конструкцій шнекових конвеєрів 22
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ШНЕКОВОГО КОНВЕЄРА 24
2.1.Вихідні дані для проєктування 24
2.2.Обґрунтування конструкції шнекового конвеєра 26
2.3.Розрахунок основних параметрів шнека 29
2.4.Розрахунок частоти обертання та перевірка умов нормального транспортування 32
2.5.Визначення фактичної продуктивності конвеєра 33
2.6.Силовий розрахунок конвеєра 34
2.7.Розрахунок валів і перевірка на міцність 37
2.8.Розрахунок підшипникових вузлів 43

2.9.Розрахунок енергоспоживання та ефективності роботи конвеєра 46
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ 49
3.1.Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів 49
3.2.Технічні та організаційні заходи безпеки 50
3.3.Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях 51
3.4.Пожежна безпека 51
РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ 53
4.1.Вихідні дані для розрахунку 53
4.2.Розрахунок капітальних інвестицій 54
4.3.Розрахунок експлуатаційних витрат 54
4.4.Техніко-економічні показники ефективності проєкту 56
4.5.Обґрунтування вигоди проєкту 58
ВИСНОВКИ 59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 61
ДОДАТКИ 66

РЕФЕРАТ

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з пояснювальної записки на **64 аркушах** тексту, містить **4 розділи**, висновки, список використаних джерел із **33 найменувань** і додатки.

У **першому розділі** проведено комплексний аналіз сучасного стану та перспектив розвитку конструкцій шнекових конвеєрів у тваринництві. Розглянуто класифікацію гвинтових конвеєрів за напрямком транспортування (горизонтальні, похилі, вертикальні), функціональним призначенням та конструкцією гвинта. Проведено огляд обладнання провідних світових виробників (SCC, KWS) та патентний пошук інноваційних рішень, спрямованих на зниження травмування зерна та забезпечення самоочищення робочих органів.

У **другому розділі** розроблено конструкцію шнекового конвеєра для транспортування гранульованого комбікорму продуктивністю **15 т/год**. Виконано геометричний та кінематичний розрахунок шнека, за результатами якого прийнято стандартний діаметр **315 мм**, крок гвинта **250 мм** та частоту обертання **72 об/хв**. Обґрунтовано використання **трубчастого безшовного вала** (Сталь 35) та насадної компоновки з **соосним циліндричним мотор-редуктором** і двигуном **АИР90L6** потужністю **1,5 кВт**. Проведено перевірку вала на міцність та жорсткість (фактичний прогин **2,7 мм** при нормі 6,0 мм), а також розрахунок довговічності підшипникових вузлів (**34 074 години**).

У **третьому розділі** розглянуто питання охорони праці та безпеки життєдіяльності. Визначено вимоги безпеки при експлуатації обладнання, проаналізовано основні ризики (механічні, електричні, запиленість) та заходи щодо їх мінімізації, а також встановлено правила технічного обслуговування.

У **четвертому розділі** виконано розрахунок економічної ефективності модернізації конвеєра. Встановлено, що впровадження енергоефективного привода та полегшеного трубчастого вала дозволяє знизити енергоспоживання на **31,5%** та витрати на ремонт на **34,2%**. Річний економічний ефект становить **9 800 грн**, а термін окупності додаткових капіталовкладень – **3,06 року**.

Ключові слова: шнековий конвеєр, транспортування кормів, комбікорм, механізація, енергоефективність, мотор-редуктор, трубчастий вал, економічна ефективність.

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний розвиток агропромислового комплексу, зокрема тваринництва та птахівництва, тісно пов’язаний з інтенсифікацією виробничих процесів та впровадженням високоефективних засобів механізації. Однією з ключових ланок у технологічних лініях приготування та роздачі кормів є транспортування сипучих і гранульованих матеріалів. Серед розмаїття кормотранспортних систем гвинтові (шнекові) конвеєри посідають чільне місце завдяки своїй компактності, високій герметичності, простоті конструкції та можливості точного дозування компонентів.

Проте традиційні конструкції шнеків часто характеризуються значною енергоємністю привода, високою металоємністю обертових частин, а також підвищеним ризиком травмування і подрібнення гранульованої продукції під час транспортування. У зв’язку з цим виникає потреба в розробці енергоефективних конвеєрів з оптимізованими конструктивними й кінематичними параметрами, які б мінімізували механічне пошкодження кормів та знижували експлуатаційні витрати. Це зумовлює актуальність теми бакалаврської кваліфікаційної роботи, спрямованої на розробку вдосконаленого шнекового конвеєра.

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є розробка та обґрунтування конструктивних і кінематичних параметрів енергоефективного шнекового конвеєра для транспортування гранульованого комбікорму продуктивністю 15 т/год.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Провести комплексний аналіз сучасного стану кормотранспортних систем та патентний пошук інноваційних рішень у галузі гвинтових конвеєрів.
- Обґрунтувати раціональну конструктивну схему конвеєра довжиною 6,0 м для підйому матеріалу під кутом 15° до горизонту.

- Виконати геометричний і кінематичний розрахунки гвинтового робочого органу для забезпечення заданої продуктивності при мінімальному травмуванні часток корму.
- Здійснити силовий розрахунок системи, обґрунтувати вибір електродвигуна та мотор-редуктора привода.
- Провести перевірочні розрахунки елементів конструкції, зокрема трубчастого вала, на міцність, жорсткість та довговічність підшипникових вузлів.
- Розробити заходи з охорони праці, виробничої санітарії та техніки безпеки під час експлуатації проектованого обладнання.
- Розрахувати техніко-економічні показники проекту та оцінити фінансову доцільність впровадження розробленої конструкції.

Об’єкт дослідження – процес транспортування гранульованих комбікормів гвинтовими робочими органами.

Предмет дослідження – конструктивні, геометричні, силові та кінематичні параметри шнекового конвеєра.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ КОНСТРУКЦІЙ ШНЕКОВИХ КОНВЕЄРІВ

1.1. Призначення та область застосування шнекових конвеєрів

Шнекові конвеєри широко використовуються в системах розподілу кормів завдяки їх адаптивності та точності в суворих умовах тваринницьких об'єктів [1]. Автоматизація та механізація процесів кормороздачі є ключовим фактором підвищення продуктивності праці на сучасних фермах [2].

1.1.1. Основні сфери застосування:

1. Молочні ферми та комплекси. Гвинтові конвеєри використовуються на молочних фермах для транспортування концентрованих кормів від сховищ до годівниць [3]. Вони є ефективними у видачі кормових сумішей, силосу та сінажу, забезпечуючи безперервне постачання кормів відповідно до технологічного графіка годівлі [4]. Особливу увагу при цьому приділяють точності дозування компонентів [5].

2. Вирощування великої рогатої худоби. У господарствах з вирощування великої рогатої худоби шнекові конвеєри застосовуються для переміщення грубих кормів, концентратів та кормових сумішей для відгодівлі [6]. У зимовий період необхідно забезпечити значні обсяги кормів, тому надійність обладнання виходить на перший план [7]. Транспортування вологих стеблових кормів вимагає врахування їхніх фізико-механічних властивостей, зокрема сили зчеплення та коефіцієнта тертя [8].

3. Свиноферми. На свинофермах ці конвеєри використовуються для розподілу як рідких і напіврідких кормів, так і сухих кормових сумішей [9]. Вони застосовуються для доставки відповідної дози корму відповідно до фізіологічних потреб різних вікових груп тварин [10]. Дослідження показують, що оптимізація параметрів шнека дозволяє значно зменшити енергоємність процесу розподілу

сухих кормів [11].

4. Птахофабрики. У птахівництві гвинтовий конвеєр є основним засобом для переміщення комбікормів у пташнику, що забезпечує безперервне постачання кормів до годівниць [12]. Вони особливо підходять для використання на великих птахофабриках, де утримуються десятки тисяч птахів, оскільки мінімізують втрати дорогого комбікорму [13].

5. Кормозаводи та змішувальні відділи. Шнекові конвеєри є одними з ключових елементів технологічних ліній виробництва кормів, транспортують сировину до змішувачів та готові кормові суміші до місць зберігання або безпосередньо до тварин [14]. Математичне моделювання руху матеріалу в таких лініях дозволяє підвищити їх загальну ефективність [15].

1.1.2. Характеристики застосування залежно від типу корму:

Концентровані корми (комбікорми, зерно). Шнекові конвеєри, завдяки закритому механізму роботи жолоба, здатні ефективно транспортувати сипучі концентрати, щоб уникнути розсипання та забруднення кормів [16]. Найкраща швидкість шнека для запобігання розділення становить 0,4–0,8 м/с [17].

Грубі корми (сіно, солома, сінаж). При транспортуванні грубих кормів конвеєри оснащуються збільшеною висотою жолоба. Волоконні структури, пов’язані з цими кормами, вимагають унікальної конструкції робочих органів, щоб уникнути заплутування та забивання робочих зон [18].

Соковиті корми (силос, коренеплоди). При транспортуванні соковитих кормів особливо враховується герметичність жолоба та корозійна стійкість металевих конструкцій [19]. Спеціальні полімерні або цинкові покриття використовуються для захисту від агресивних атак органічних кислот кормів [20].

Кормові суміші. Шнекові конвеєри є ідеальним методом для транспортування готових кормових сумішей (TMR), зберігаючи при цьому їхню однорідність під час транспортування та запобігаючи розшаруванню компонентів [21].

1.1.3. Технічні вимоги до скребкових та шнекових конвеєрів у тваринництві:

Продуктивність: від 10 до 300 т/год (залежно від розміру ферми та складу корму).

Максимальна довжина транспортування: 100–150 метрів у горизонтальному русі.

Кут нахилу: до 30° для більшості кормів (для шнеків вертикального типу – до 90°).

Швидкість руху робочого органу: 0,2–1,0 м/с залежно від характеристик корму.

Розміри жолоба: ширина 200–800 мм, висота 150–500 мм.

Матеріали виготовлення: сталі, стійкі до корозії, оцинковане покриття, полімери.

Завдяки своїй універсальності, надійності та низькій вартості, шнекові обладнання досі є одним із найпоширеніших видів обладнання для транспортування кормів у сучасному тваринництві [22].

1.2. Класифікація шнекових конвеєрів

Класифікація гвинтових конвеєрів здійснюється за кількома основними конструктивними та функціональними ознаками, що визначає ефективність їх інтеграції у виробничі процеси [23].

1.2.1. За напрямком транспортування:

Горизонтальні: стандартні конвеєри для переміщення вантажу на певну відстань по горизонталі (Рис. 1.1). Мають найвищу енергетичну ефективність.



Рис 1.1 Горизонтальний конвеєр

Похилі: зазвичай працюють під кутом до 45 градусів; при збільшенні кута нахилу потужність транспортування знижується через вплив сили тяжіння та зворотне осипання матеріалу (Рис. 1.2).



Рис 1.2 Похилий конвеєр.

Вертикальні: спеціальні установки для підйому матеріалів на значну висоту (до 20 метрів і більше), що часто використовують відцентрову силу для утримання матеріалу на стінках кожуха (Рис. 1.3) [24].



Рис 1.3 Вертикальний конвеєр.

1.2.2. За функціональним призначенням:

Транспортувальні конвеєри: основне призначення – переміщення сипучих вантажів без зміни їхнього фізичного стану.

Шнекові живильники (дозатори): призначені для точного регулювання об’ємної швидкості потоку матеріалу з бункерів або силосів [25].

Змішувальні конвеєри: обладнані спеціальними лопатями або переривчастими гвинтами для перемішування матеріалів під час руху.

1.2.3. За конструкцією гвинта:

Гелікоїдальні: безперервна гвинтова стрічка, отримана методом холодної прокатки; товщина стрічки зменшується від внутрішнього краю до зовнішнього.

Секційні: складаються з окремих сегментів (витків), зварених між собою; товщина стрічки однакова по всій ширині, що забезпечує більшу довговічність.

Стрічкові: мають відкритий простір між трубою та гвинтом; ідеальні для в’язких, липких або гумоподібних матеріалів.

Лопатеві: використовуються виключно для змішування, коли ефективність транспортування не є пріоритетом.

Зі змінним кроком або діаметром: застосовуються в живильниках для рівномірного забору матеріалу по всій довжині завантажувального отвору.

1.2.4. За конструкцією корпусу (жолоба):

U-подібний жолоб: стандартна відкрита або закрита кришкою конструкція, зручна для обслуговування.

Трубчасті конвеєри: забезпечують повну герметичність, виключають пилінння та мають вищу ефективність при роботі під нахилом.

Розширені жолоби: мають похилі стінки, що полегшує завантаження несипучих або грудкових матеріалів.

З дном, що відкидається: конструкція для швидкого доступу та очищення, що важливо для запобігання забрудненню або гниттю залишків продуктів кормів.

1.3. Загальна будова шнекового конвеєра

Гвинтовий конвеєр є складною механічною системою, що складається з низки взаємопов’язаних компонентів, кожен з яких виконує специфічні завдання в процесі транспортування [26].

1.3.1. Несучий каркас та опорні конструкції:

Рама конвеєра виступає основою всієї системи, надаючи їй просторову жорсткість. Вона виготовляється з профільних сталевих елементів, таких як швели, двотаври або зварні профілі прямокутного перерізу. Конструкція повинна витримувати статичні навантаження від власної ваги та динамічні навантаження від транспортуваного матеріалу, а також сили натягу ланцюга [27].

Опорні стійки розташовані через кожні 3-6 метрів довжини конвеєра і забезпечують передачу навантажень на фундамент або несучі конструкції будівлі.

Конструкція стійок дозволяє регулювати висоту для досягнення точного горизонтального положення.

1.3.2. Жолоб (кожух) конвеєра

Основним елементом роботи конвеєра є робочий жолоб, який використовується для транспортування кормових матеріалів. Конструктивно він складається з [28]:

- Днища - плоска або слабо прогнута поверхня для ковзання скребків.
- Бортів - вертикальні стінки, які перешкоджають розсипанню матеріалу.
- Кришки - знімні або відкидні елементи для герметизації та доступу до внутрішньої частини.

1.3.3. Шнек (робочий орган)

Складається з центрального вала (зазвичай трубчастого для зменшення ваги при збереженні жорсткості на кручення) та привареної до нього спіралі. Вал спирається на кінцеві та проміжні підшипникові вузли [29].

1.3.4. Приводна станція

Привод конвеєра може складатися з електродвигуна, редуктора та відкритої. Ця система розташована на одному кінці конвеєра і відповідає за передачу крутного моменту.

1.4. Конструкції шнеків

Конструкції гвинтів (шнеків) є визначальним фактором ефективності транспортування, змішування або дозування сипких матеріалів. Вибір конкретного типу залежить від фізичних властивостей вантажу та технологічних завдань.

Основні типи гвинтових спіралей:

- **Гелікоїдальні.** Це безперервна гвинтова спіраль, виготовлена методом холодної прокатки сталевої стрічки. Така технологія забезпечує гладку робочу поверхню та підвищену міцність за рахунок наклепу.



Рис. 1.5. Гелікоїдальний шнек

- **Секційні:** складаються з окремих витків, які вирізаються з листової сталі, формуються в спіраль і зварюються між собою на валу. Вони мають рівномірну товщину стрічки по всій ширині, що важливо для роботи у важких режимах.

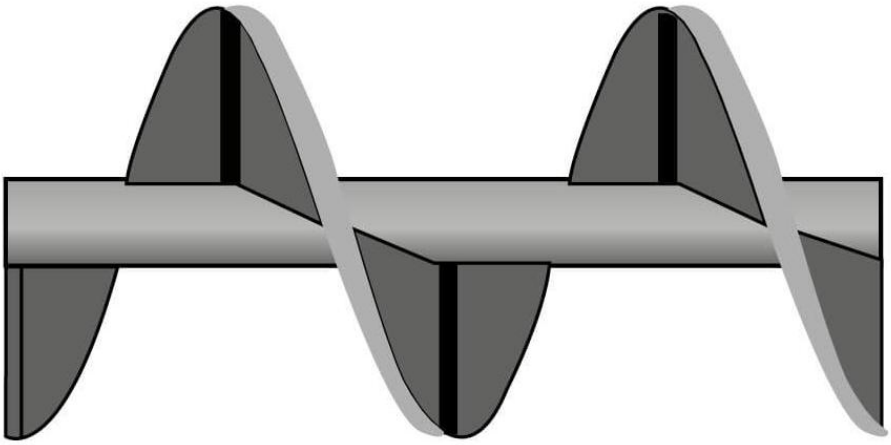


Рис. 1.5. Секційний шнек

- **Стрічкові:** мають відкритий простір між центральною трубою (валом) та спіраллю. Така конструкція запобігає налипанню в’язких, липких або гумоподібних матеріалів, які могли б забити стандартний шнек.



Рис. 1.6. Стрічковий шнек

1.5. Конструкції підшипникових вузлів

Підвісні підшипники

Ці вузли використовуються як проміжна підтримка між двома секціями шнека, допомагаючи підтримувати вирівнювання та слугуючи опорною поверхнею для з'єднувального вала

Кінцеві опори жолоба

Кінцеві опори підтримують приводний та кінцевий вали конвеєра та забезпечують вирівнювання всього жолоба

1. Сталеві пластини, які зазвичай оснащуються бабітовими фланцевими підшипниками
2. Антифрикційні використовують кулькопідшипники, які допускають невеликий перекіс вала

Матеріали підшипникових вкладок

Вибір матеріалу залежить від властивостей вантажу та інтенсивності експлуатації

- Бабіт : Стандарт для звичайних умов.
- Дерево: Рекомендуються там, де не можна допускати забруднення продукту мастилом.
- Білий чавун: Застосовуються для роботи з абразивними матеріалами або за високих температур.
- Полімери: Використовуються для неабразивних або слабоабразивних вантажів, забезпечуючи низьке тертя.

1.6. Конструкції приводів шнекових конвеєрів

Класифікація за типом приводу

1. Електричні: найпоширеніший тип, де обертання здійснюється від електродвигуна
2. Гідравлічні: застосовуються для транспортування важких вантажів, де необхідна підвищена потужність або плавне регулювання швидкості.

Основні конструктивні схеми передачі руху

1. Прямий монтаж мотор-редуктора: сучасне енергоефективне рішення, де двигун і редуктор змонтовані безпосередньо на кінці жолоба. Це мінімізує втрати на тертя порівняно з пасовими передачами та забезпечує компактність
2. Вал-монтовані редуктори з пасовою передачею: типова конструкція, що включає редуктор, змонтований на приводному валу, електродвигун на підставці та V-подібну пасову передачу. Така схема дозволяє легко змінювати швидкість шнека шляхом заміни шківів
3. Привід через ланцюгову передачу: електродвигун з редуктором з’єднується з приводним валом конвеєра за допомогою роликового ланцюга
4. З’єднання через муфти: використовується для прямої передачі моменту. Застосовують пружні муфти (наприклад, МУВП) для компенсації мікроперекосів та поглинання поштовхів, або жорсткі ланцюгові муфти. Проте пряме з’єднання "двигун-редуктор-конвеєр" без можливості регулювання

швидкості не завжди рекомендується виробниками через обмеженість налаштувань.

Компоненти приводного вузла

1. Електродвигун: зазвичай асинхронний; потужність обирається згідно з розрахунками
2. Редуктор: циліндричний, конічно-циліндричний або планетарний для зниження обертів та збільшення моменту
3. Приводний вал: виготовляється з високоякісної сталі (наприклад, Сталь 40Х), має шпонкові пази та отвори для з'єднання зі шнеком
4. Упорні підшипники: часто інтегруються безпосередньо в приводний вузол для поглинання осьових навантажень, що виникають під час руху матеріалу

Системи керування та оптимізації

1. Частотні перетворювачі: є критично важливими для реалізації плавного пуску. Вони дозволяють знизити пікові динамічні навантаження в муфтах та деталях приводу в 3,4 раза, запобігаючи втомному руйнуванню та пошкодженню зерна
2. М'які пускачі: забезпечують плавний розгін та зупинку, що важливо для важконавантажених систем
3. Зворотні клапани: Встановлюються для запобігання зворотному руху матеріалу у разі відключення живлення

1.7. Огляд конструкцій шнекових конвеєрів виробників

Screw Conveyor Corporation (SCC, США)

Один із найстаріших виробників, що пропонує широкий спектр стандартних та спеціалізованих компонентів.

- Різноманітність типів: Виробляють горизонтальні, похилі та вертикальні установки (Screw-Lift), а також об'ємні живильники Exacta-Flo.
- Redi-Change: Спеціальна конструкція секцій шнека, що дозволяє демонтувати окремий сегмент без розбирання всього конвеєра.

- Матеріальне виконання: Конвеєри виготовляються з вуглецевої, нержавіючої або гальванізованої сталі.
- Захист з’єднань: Використання самоконтрящихся болтів Tem-U-Lac для запобігання пошкодженню системи через розхитування кріплень.

KWS Manufacturing Company, Ltd (США)

Компанія відома розробкою галузевих стандартів, особливо для безвальна система (рис. 1.7).

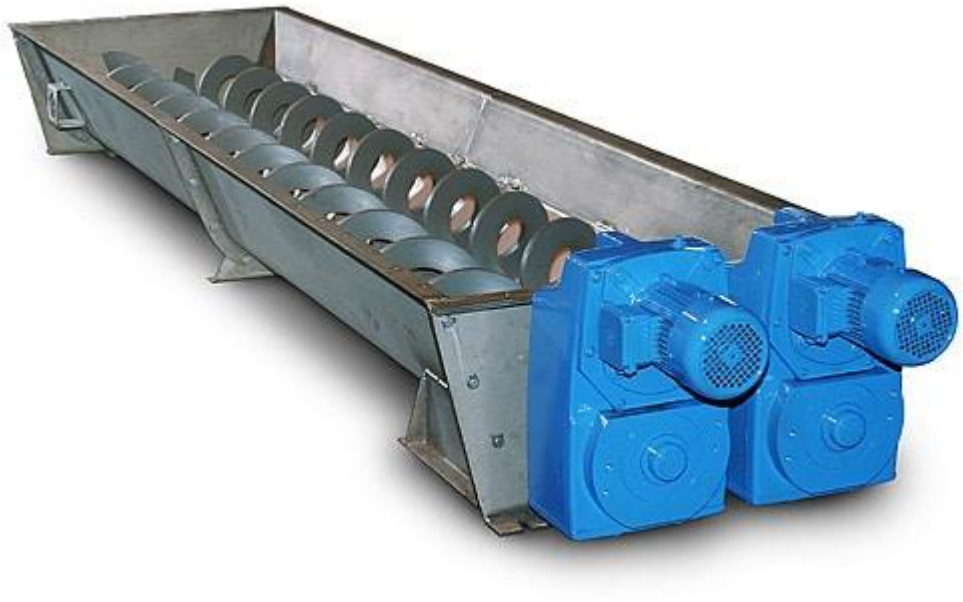


Рис. 1.7. Безвальний шнековий конвеєр

- Безвалькові конвеєри: Ідеальні для липких, в’язких та вологих матеріалів. Конструкція не має центрального вала, що виключає забивання та дозволяє працювати з матеріалами, які схильні до звалювання.
- Живильники з «живим дном»: Використовують кілька шнеків у тандемі для рівномірного забору матеріалу з великих бункерів та запобігання утворенню «склепінь».
- Вертикальні системи: Здатні піднімати матеріали на висоту до 30 футів (≈9 метрів) без використання проміжних підшипників.
- Індивідуальне проектування: Вибір компонентів за серіями (від A до D) залежно від абразивності та щільності вантажу

1.8. Перспективні технологічні розробки

У сучасних наукових дослідженнях особлива увага приділяється вдосконаленню конструкцій для транспортування сільськогосподарської продукції. Ключовими напрямками є:

- **Шнеки з рухомим кожухом.** Інноваційна система, в якій циліндричний корпус обертається синхронно з робочим гвинтом. Це технічне рішення зменшує відсоток пошкодження зерна до 0,3% (порівняно з 0,48% у стандартних пристроях) та гарантує стабільний запуск механізму після вимушених зупинок.
- **Секційні модульні конвеєри.** Системи з гнучкою архітектурою, що дозволяють оперативно коригувати довжину та напрямок транспортування залежно від виробничих потреб.
- **Телескопічні гвинтові транспортери.** Конструкції з можливістю динамічної зміни робочої зони безпосередньо під час експлуатації.

Таблиця 1.1.

Порівняльна характеристика технічних рішень у системах транспортування

Особливість	**NORD**	**SCC**	**KWS**	**Наукові розробки**
Тип привода	Прямий мотор-редуктор	Різні (пасові, ланцюгові)	Прямий або валмонтований	Частотно-керований пуск
Технічна спеціалізація	Енергоефективність привода	Стандартні компоненти CEMA	Важкі умови, безвалькові шнеки	Мінімізація травмування зерна
Експлуатація та сервіс	Монтажний пакет SCP	Система Redi-Change	Висока зносостійкість (AR сплави)	Оптимізація динаміки руху

1.9. Патентний пошук конструкцій шнекових конвеєрів

Згідно з аналізом патентних джерел, основні зусилля винахідників зосереджені на зниженні пошкодження вантажів, забезпеченні самоочищення та підвищенні продуктивності:

Мінімізація травмування продукту: Патенти Франції (№ 0067725) та Німеччини (№ 4001121) описують схеми еластичних гвинтових робочих органів, призначених для дбайливого переміщення сипких матеріалів. Патент США № 5,687,732 пропонує конструкцію з еластичними периферійними витками, що суттєво знижує ступінь пошкодження зерна

Очищення та запобігання залишку матеріалу: У патенті Китаю CN209956835U представлено щітковий гвинтовий конвеєр, де до металевих витків прикріплено стрічку із щітковими елементами, що дозволяє уникати накопичення матеріалу в кожусі та полегшує запуск після зупинки. Патент Південної Кореї KR100941923B1 пропонує щіткову структуру для усунення твердих домішок із рідин за допомогою безвалькового шнека.

Безвалькові та багатострічкові системи: Патент США № 5,573,660 описує шнек без вала, сформований із декількох стрічок із закріпленими щітковими елементами, що забезпечують ефективну взаємодію з кожухом

Українські патентні рішення та інновації

Шнеки з еластичними поверхнями: Патенти UA 123753 та UA 142241 описують конструкції, де еластичні щітки фіксуються в спеціальних циліндричних трубках на валу, що забезпечує надійність кріплення та відсутність зазорів між шнеком і кожухом. Патент UA 143343 захищає еластичний шнек із розрізними пелюстками, кут розрізу яких спрямований у бік транспортування для легкого прогинання при защемленні зернин.

Багатофункціональні та комбіновані системи: Патент UA 124326 стосується комбінованого транспортера зі змінним кроком та жорсткістю периферійної поверхні, що гарантує стабільну подачу матеріалу з бункера. Патент UA

150763 описує шнек з еластичним камероподібним елементом для підвищення надійності кріплення робочих поверхонь.

Дозування та змішування: Рішення для точного регулювання подачі представлені в заявках на винахід UA 53988 A (гвинтовий живильник–дозатор) та патенті UA 27245 C2 (транспортер для дозованого транспортування). Для одночасного переміщення та змішування використовуються запатентовані гвинтові змішувачі з бункерами рівномірного завантаження (UA 150442).

Транспортування специфічних відходів: Патент UA 83441 пропонує оригінальну конструкцію шнека з додатковими лопатями, встановленими на спіралі, що дозволяє на 30–40% підвищити продуктивність транспортування металевої стружки при зниженні енерговитрат на 25–30%.

-

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ШНЕКОВОГО КОНВЕЄРА

2.1. Вихідні дані для проєктування

Ефективне проєктування гвинтових (шнекових) конвеєрів для сільськогосподарського виробництва вимагає глибокого аналізу фізико-механічних властивостей матеріалів, що підлягають транспортуванню, а також експлуатаційних умов, у яких працюватиме технологічне обладнання [31]. У тваринництві та птахівництві шнекові конвеєри є основним засобом механізації робіт із роздачі та транспортування сухих кормів, оскільки вони забезпечують високу герметичність, безперервність подачі та компактність конструкції [32].

Для цього проєкту розглядається шнековий конвеєр, призначений для міжкорпусного або внутрішньоцехового переміщення збалансованого сухого гранульованого комбікорму для великої рогатої худоби. Фізико-механічні характеристики комбікорму суттєво відрізняються від характеристик звичайного продовольчого зерна, оскільки комбікорм є багатокомпонентною сумішшю, яка містить подрібнені зернові культури, білкові концентрати, висівки, шрот та мінерально-вітамінні добавки [33]. Такий склад обумовлює схильність матеріалу до пилоутворення, злежування та руйнування гранул при високих механічних навантаженнях, що накладає жорсткі вимоги на вибір робочих параметрів машини [33].

У таблиці 2.1 наведено фізико-механічні параметри транспортованого вантажу, які є визначальними для подальших конструктивних та технологічних розрахунків.

Таблиця 2.1.

Фізико-механічні характеристики транспортованого вантажу (комбікорму)

Параметр	**Позначення**	**Одиниця виміру**	**Значення**	**Джерело інформації**
Насипна щільність (питома вага)	ρ	т/м³ (кг/м³)	0,60 (600)	Технічні специфікації кормів [2]
Коефіцієнт внутрішнього тертя	f_1	–	0,60	Нормативи для сипких вантажів [5]
Кут природного укосу в спокої	φ_0	град	31	Довідкові дані агроінженерії
Коефіцієнт тертя об сталь	f_2	–	0,45	Матеріалознавство транспортних систем [5]
Кут тертя матеріалу об сталь	φ_1	град	24	Розрахункові залежності [5]
Характер абразивності	–	–	Неабразивний	ДСТУ 2672-94 6
Гранулометричний склад	–	–	Дрібногранульований	Класифікація сипких матеріалів

Проектований конвеєр експлуатуватиметься в умовах тваринницького комплексу, що передбачає роботу в напівзакритих або критих приміщеннях при коливаннях температури навколишнього середовища від -30 °C до +30 °C та відносній вологості повітря до 85%. Режим роботи обладнання прийнято безперервний, однозмінний, із середнім часом роботи 8 годин на добу.

Технологічні вимоги та вихідні експлуатаційні параметри конвеєра наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2.

Технологічні вимоги та умови експлуатації проектованого конвеєра

Технологічний параметр	**Позначення**	**Одиниця виміру**	**Значення**	**Примітки**
Продуктивність конвеєра	Q	т/год	15.0	Задана потужність лінії [2]
Довжина транспортування	L	м	6.0	Осьова довжина жолоба
Кут нахилу до горизонту	β	град	15	Визначено профілем цеху
Напрямок переміщення вантажу	–	–	Вгору (під нахилом)	Особливість компоновки привода
Режим завантаження	–	–	Рівномірний, з бункера	Стабільний потік матеріалу [7]

Прийняті вихідні параметри є технічно обґрунтованими та повністю відповідають сучасним стандартам сільськогосподарського машинобудування для проектування засобів безперервного транспорту [33].

2.2. Обґрунтування конструкції шнекового конвеєра

Вибір конструктивної схеми гвинтового конвеєра базується на аналізі специфіки транспортування сільськогосподарських сухих кормів та світового досвіду виробництва зернотранспортних систем [34]. Головними завданнями при виборі конструкції є забезпечення високої надійності, запобігання пошкодженню гранул комбікорму, уникнення утворення застійних зон та пилонепроникність системи [35].

2.2.1. Вибір типу шнека та гвинтової поверхні

Відповідно до ДСТУ 2672-94, для переміщення сухих сипких та дрібногранульованих матеріалів із хорошою сипучістю застосовують суцільний однозахідний гвинт постійного діаметра та кроку [36]. Суцільний гвинт забезпечує максимальний коефіцієнт корисного витіснення матеріалу вздовж жолоба та перешкоджає накопиченню залишків корму, що є важливою санітарною вимогою [37]. Спіральні лопаті шнека виготовляються методом холодної прокатки з листової сталі, що дозволяє отримати точний профіль витків та підвищену зносостійкість периферійної крайки внаслідок наклепу металу [38].

Вал шнека виконується трубчастим [39]. Використання безшовної сталевої труби замість суцільного круглого прокату дозволяє суттєво знизити власну вагу обертового робочого органу, зменшити динамічні навантаження при пуску та забезпечити високу жорсткість на згин і кручення [40]. На кінцях трубчастого вала за допомогою зварювання кріпляться суцільні сталеві цапфи для встановлення в підшипникові опори.

2.2.2. Обґрунтування кута нахилу та компоновки корпусу

Кут нахилу конвеєра $\beta=15^{\circ}$ зумовлює виникнення явища зворотного осипання матеріалу під дією сили тяжіння, що може призвести до зниження продуктивності [41]. Для усунення цього явища зазор між зовнішнім діаметром гвинта та внутрішньою поверхнею жолоба приймається мінімальним – $\delta_{\text{радіаль}} = 8\text{мм}$. Жолоб конвеєра виконується закритим, U-подібного перерізу, з пилонепроникними відкидними кришками. Це забезпечує легкий доступ для очищення та технічного обслуговування, а також запобігає забрудненню навколишнього середовища пилом комбікорму [42].

2.2.3. Вибір та обґрунтування матеріалів елементів конструкції

Конструкційні матеріали для основних вузлів конвеєра підібрані з урахуванням міцності, довговічності та технологічності виготовлення. Дані щодо вибору матеріалів наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3.

Обґрунтування вибору конструкційних матеріалів основних елементів

Елемент конвеєра	**Обраний матеріал**	**Обґрунтування та технологічні переваги**
Жолоб (корпус)	Сталь Ст3пс за ДСТУ	Товщина 3,0 мм. Забезпечує жорсткість корпусу, має високу зварюваність та стійкість до деформацій.
Спіраль шнека	Сталь Ст3сп за ДСТУ	Товщина 4,0 мм. Забезпечує оптимальне поєднання зносостійкості та пластичності для прокатки гвинта.
Трубчастий вал	Сталь 35 за ДСТУ	Гарячодеформована безшовна труба ⌀76х4,5 мм. Має високу втомну міцність при знакозмінному згині.
Цапфи вала	Сталь 45 за ДСТУ	Покращена конструкційна сталь з термообробкою до твердості НВ 220...250 для зносостійкості шийок під підшипники.
Втулка підвісного підшипника	Капролон (Поліамід-6)	Антифрикційний матеріал. Працює без

		змащування, виключає забруднення корму мастилом, стійкий до абразивного пилу [4].

2.2.4. Обґрунтування приводу та опорних вузлів

Привод конвеєра встановлюється на розвантажувальному (верхньому) кінці. Така компоновка є більш раціональною, оскільки вал шнека працює «на витягування», що виключає ризик поздовжнього згинання та втрати стійкості трубчастого вала під дією крутного моменту. Схема приводу включає соосний циліндричний мотор-редуктор, змонтований безпосередньо на приводному валу конвеєра (насадна компоновка) [43]. Це усуває потребу в клинопасових або ланцюгових передачах, спрощує конструкцію, підвищує ККД приводу та гарантує високу безпеку персоналу [44].

Для запобігання значному прогину вала довжиною 6,0 м та зачіпанню стінок жолоба спіраллю, конструкцією передбачено встановлення одного проміжного підвісного підшипника по центру конвеєра [45]. Застосування капролонової втулки у підшипнику ковзання дозволяє уникнути потреби в рідкому змащуванні, що є критично важливим для комбікормової промисловості [46].

2.3. Розрахунок основних параметрів шнека

Геометричний та кінематичний розрахунок шнека спрямований на визначення оптимальних розмірів гвинта та частоти його обертання для забезпечення заданої продуктивності при мінімальному пошкодженні часток комбікорму [47].

2.3.1. Визначення діаметра шнека

Попередній розрахунок зовнішнього діаметра шнека D (м) здійснюється за формулою продуктивності для похилих гвинтових конвеєрів [48]:

$$D \geq \sqrt{\frac{Q}{15 \cdot \pi \cdot \Psi \cdot \rho \cdot C_\beta \cdot n \cdot (1-\delta^2)}} \quad (2.1)$$

Q – задана продуктивність конвеєра, $Q = 15$ т/год ;

π – математична константа, $\pi \approx 3{,}14159$;

Ψ – коефіцієнт заповнення перерізу жолоба.

Відповідно до ДСТУ 2672-94, для легких неабразивних матеріалів із хорошою сипучістю приймають $\Psi = 0{,}40$;

ρ – насипна щільність вантажу, $\rho = 0{,}6$ т/м^3 ;

C_β– коефіцієнт зниження продуктивності залежно від кута нахилу конвеєра. Для кута нахилу $\beta = 15°$ згідно з довідковими даними приймаємо $C_\beta = 0{,}80$;

n – частота обертання шнека, об/хв. Приймаємо оптимальне зносостійке значення $n = 72$ об/хв;

δ – відносний діаметр вала шнека. Для трубчастих валів середніх конвеєрів приймаємо попередньо $\delta = \frac{d}{D} \approx 0{,}24$.

Підставимо значення у формулу:

$$D \geq \sqrt{\frac{15}{15 \cdot 3.14159 \cdot 0.40 \cdot 0.6 \cdot 0.80 \cdot 72 \cdot (1 - 0.24^2)}}$$

$$D \geq \sqrt{\frac{15}{47.1238 \cdot 0.40 \cdot 0.6 \cdot 0.80 \cdot 72 \cdot (1 - 0.0576)}}$$

$$D \geq \sqrt{\frac{15}{11.3097 \cdot 72 \cdot 0.9424}} = \sqrt{\frac{15}{767.437}} = \sqrt{0.019545} \approx 0.2694 \text{ м}$$

Згідно зі стандартом ISO 1050:1975 та ДСТУ 2672-94, отримане значення діаметра округляємо до найближчого більшого стандартного розміру з параметричного ряду [49].

Приймаємо стандартний зовнішній діаметр шнека:

$$D = 315 \text{ мм} = 0.315 \text{ мм}$$

2.3.2. Визначення кроку гвинтової спіралі

Для транспортування легких сипучих матеріалів середньої щільності крок гвинта S (м) приймають рівним [50]:

$$S \approx (0.8 \dots 1.0) \cdot D \tag{2.1}$$

Враховуючи похиле розташування конвеєра та необхідність забезпечення стабільного завантаження без утворення зворотного потоку матеріалу по гвинту, приймаємо крок гвинта:

$$S = 250 \text{ мм} = 0.250 \text{ м}$$

Зовнішній діаметр трубчастого вала обирається з умов забезпечення міцності та жорсткості. Відповідно до ДСТУ, приймаємо стандартну безшовну трубу із зовнішнім діаметром:

$$d = 76 \text{ мм} = 0.076 \text{ м}$$

Тоді фактичне значення відносного діаметра вала дорівнює:

$$\delta = \frac{d}{D} = \frac{0.076}{0.315} \approx 0.241 \tag{2.3}$$

2.4. Розрахунок частоти обертання та перевірка умов нормального транспортування

Для забезпечення нормального режиму переміщення вантажу волоком без його підйому відцентровою силою та обертання разом із гвинтом, частота обертання шнека не повинна перевищувати гранично допустиме значення n_{max} (об/хв), яке визначається за формулою [51]:

$$n_{max} = \frac{A}{\sqrt{D}} \tag{2.4}$$

де:

A – емпіричний коефіцієнт, що враховує властивості вантажу. Для комбікорму як неабразивного матеріалу середньої щільності приймаємо $A = 50$ [52].

$$n_{max} = \frac{50}{\sqrt{0.315}} = \frac{50}{0.5612} \approx 89.1 \text{ об/хв}$$

Оскільки обрана робоча частота обертання $n_{□} = 72$ об/хв менша за $n_{max} = 89.1$ об/хв, умови стійкого осьового руху матеріалу вздовж жолоба повністю виконуються [53].

Для перевірки умов переміщення матеріалу без обертання разом із гвинтом проаналізуємо кути підйому гвинтової лінії на зовнішньому діаметрі шнека $\alpha_{зовн}$ та на поверхні вала $\alpha_{внутр}$:

$$\alpha_{зовн} = \arctan\left(\frac{S}{\pi \cdot D}\right) = \arctan\left(\frac{0.250}{3.14159 \cdot 0.315}\right) = \arctan(0.2526) \approx 14.18^{\circ}$$

$$\alpha_{внутр} = \arctan\left(\frac{S}{\pi \cdot D}\right) = \arctan\left(\frac{0.250}{3.14159 \cdot 0.076}\right) = \arctan(1.047) \approx 46.32^{\circ}$$

Для ефективного осьового переміщення необхідно, щоб кут підйому гвинтової лінії на периферії був меншим за кут, що доповнює кут тертя до 90° [54]:

$$\alpha_{зовн} < 90^{\circ} - \varphi_1 => 14.18^{\circ} < 90^{\circ} - 24^{\circ} = 66^{\circ}$$

Умова виконується з великим запасом, що свідчить про високу здатність шнека транспортувати матеріал осьовим шляхом з мінімальними втратами на обертання комбікорму разом із гвинтом [55].

2.5. Визначення фактичної продуктивності конвеєра

Розрахуємо фактичну об'ємну та масову продуктивність спроєктованого шнека для перевірки відповідності технічному завданню [56]:

$$Q_{факт} = 60 \cdot A_{сел} \cdot S \cdot n \cdot \Psi \cdot \rho \cdot C_{\beta} (т/год) \quad (2.5)$$

де $A_{сел}$ – площа поперечного перерізу гвинтового каналу (без урахування площі перерізу центрального вала), яка дорівнює [57]:

$$A_{сел} = \frac{\pi \cdot (D^2 \cdot d^2)}{4} = \frac{3.14159 \cdot (0.315^2 \cdot 0.076^2)}{4} = \frac{3.14159 \cdot (0.099225 \cdot 0.005776)}{4} = \frac{3.14159 \cdot 0.093449}{4} \approx 0.0734 \text{ м}^2 \quad (2.6)$$

Підставимо отримане значення площі поперечного перерізу шнека у загальну формулу продуктивності [58]:

$$Q_{факт} = 60 \cdot 0.0734 \cdot 0.250 \cdot 72 \cdot 0.40 \cdot 0.60 \cdot 0.80 = 79.272 \cdot 0.192 \approx 15.22 \text{ т/год}$$

Порівняння фактичної продуктивності із заданою показує:

$$Q_{факт} = 15.22 \frac{т}{год} \geq Q = 15.0 \text{ т/год}$$

Похибка розрахунку становить:

$$\Delta = \frac{15.22 - 15.0}{15.0} \cdot 100\% = 1.47\%$$

Дане значення лежить у межах допустимого інженерного відхилення (до 5%), що підтверджує правильність вибору основних геометричних та кінематичних параметрів шнека [59].

2.6. Силовий розрахунок конвеєра

Метою силового розрахунку є визначення повного опору переміщенню комбікорму, розрахунок необхідного крутного моменту на валу шнека та вибір електродвигуна оптимальної потужності.

2.6.1. Визначення висоти підйому вантажу та зусиль опору

Для похилого конвеєра з довжиною траси L=6.0 м та кутом нахилу $\beta = 15°$ геометрична висота підйому матеріалу H (м) становить:

$$\text{H} = L \cdot \sin 15° = 6.0 \cdot 0.2588 = 1.55 \text{ м} \quad (2.7)$$

Повна потужність на валу шнек $\text{P}_{\text{вал}}$ (кВт) складається з потужності, що витрачається на безпосереднє переміщення та підйом матеріалу $\text{P}_{\text{трансп}}$, та потужності холостого ходу конвеєра $\text{P}_{\text{хол}}$, яка враховує втрати на тертя в підшипникових вузлах та ущільненнях [60].

Потужність на транспортування матеріалу розраховується за формулою [61]:

$$P_{\text{трансп}} = \frac{Q_{\text{факт}} \cdot L \cdot (\omega_0 \cdot cos\,\beta + sin\beta)}{367} \text{ (кВт)} \quad (2.8)$$

де:

ω_0 – інтегральний коефіцієнт опору переміщенню матеріалу для шнекових транспортерів. Він враховує внутрішнє тертя часток корму, тертя об жолоб та перемішування матеріалу гвинтом. Для сухого комбікорму приймаємо $\omega_0 = 1.6$.[62]

$$\text{P}_{\text{трансп}} = \frac{15.22 \cdot 6.0 \cdot (1.6 \cdot \cos 15° + \sin 15°)}{367}$$

$$\cos 15° = 0.9659;\ \sin 15° = 0.2588$$

$$\omega_0 \cdot \cos 15° + \sin 15° = 1.6 \cdot 0.9659 + 0.2588 = 1.5454 + 0.2588 = 1.8042$$

$$P_{\text{трансп}} = \frac{15.22 \cdot 6.0 \cdot 1.8042}{367} = \frac{164.759}{367} \approx 0.449 \text{ кВт}$$

Потужність холостого ходу шнекового конвеєра $P_{\text{хол}}$ (кВт) оцінюється за емпіричною залежністю, що базується на геометричних розмірах гвинта та швидкості його обертання [63]:

$$P_{\text{хол}} = \frac{D \cdot L \cdot n}{250} (\text{кВт}) \quad (2.9)$$

$$P_{\text{хол}} = \frac{0.315 \cdot 6.0 \cdot 72}{250} = \frac{136.08}{250} \approx 0.544 \text{ кВт}$$

Загальна споживана потужність безпосередньо на робочому валу шнека становить:

$$P_{\text{вал}} = P_{\text{трансп}} + P_{\text{хол}} = 0.449 + 0.544 = 0.993 \text{ кВт} \quad (2.10)$$

2.6.2. Розрахунок крутного моменту та вибір електродвигуна

Крутний момент на робочому валу шнека T (Н·м) в стаціонарному режимі роботи визначається за кінематичним зв’язком [64]:

$$T = 9550 \cdot \frac{P_{\text{вал}}}{n} = 9550 \cdot \frac{0.993}{72} \approx 131.7 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.11)$$

Пусковий крутний момент на валу шнека завжди вищий за номінальний через необхідність подолання сил інерції спокою матеріалу та можливе часткове засипання гвинта під час зупинки. Пусковий коефіцієнт для шнеків приймається $k_{\text{пуск}} = 1.5$. Тоді максимальний пусковий момент дорівнює:

$$T_{\text{пуск}} = k_{\text{пуск}} \cdot T = 1.5 \cdot 131.7 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.12)$$

Необхідна встановлена потужність електродвигуна $P_{дв}$ (кВт) розраховується з урахуванням втрат у механічних передачах приводу та коефіцієнта запасу потужності на можливі перевантаження [65]:

$$P_{дв} \geq k_з \cdot \frac{P_{вал}}{\eta_{заг}} \quad (2.13)$$

де:

$\eta_{заг}$ – загальний ККД привода, що включає втрати у соосному циліндричному редукторі ($\eta_{ред} = 0.90$) та у муфті з'єднання приводного вала з редуктором ($\eta_{муфт} = 0.98$) [66]:

$$\eta_{заг} = \eta_{ред} \cdot \eta_{муфт} = 0.90 \cdot 0.98 = 0.88$$

$k_з$– коефіцієнт запасу потужності, що враховує нерівномірність подачі комбікорму та коливання напруги в сільських електромережах. Приймаємо $k_з = 1.20$.[67]

$$P_{дв} \geq 1.20 \cdot \frac{0.993}{0.88} = \frac{1.192}{0.88} \approx 1.35 \text{ кВт}$$

Згідно з каталогом сучасних трифазних асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором загальнопромислового призначення серії АИР (відповідає стандартам ДСТУ та CENELEC), обираємо електродвигун типу **АИР90L6** :

- Номінальна потужність:$P_{ном} = 1.5$ кВт;
- Синхронна частота обертання:$n_{син} = 1000$ об/хв;
- Номінальна частота обертання під навантаженням (з урахуванням ковзання):$n_{дв} = 940$ об/хв;
- Кратність пускового моменту:$\frac{T_{пуск}}{T_{ном}} = 2.0$;
- Коефіцієнт корисної дії двигуна: $n_{дв} = 79.5\%$;

- Коефіцієнт потужності:$cos\varphi = 0.75$.

Обраний двигун має необхідний експлуатаційний запас потужності:

$$\Delta P = \frac{1.5 - 1.35}{1.35} \cdot 100\% = 11.1\%$$

Це гарантує надійну роботу привода без перегріву обмоток навіть при короткочасних технологічних заторах комбікорму.

2.6.3. Визначення передавального відношення приводу

Необхідне загальне передавального відношення редуктора i становить:

$$i = \frac{n_{дв}}{n} = \frac{940}{72} = 13.06 \qquad (2.14)$$

Відповідно до ДСТУ, обираємо соосний циліндричний двоступінчастий мотор-редуктор із номінальним передавальним відношенням $i_{ном} = 13.0$. Тоді фактична частота обертання шнека дорівнює:

$$n_{факт} = \frac{940}{13.0} \approx 72.3 \text{ об/хв}$$

Дане відхилення частоти обертання від розрахованої є незначним (0.42%) і повністю укладається в допуски на проєктування транспортних систем.

2.7. Розрахунок валів і перевірка на міцність

Вал шнека працює в умовах складного опору: він одночасно піддається крученню від приводного моменту, згину під дією власної ваги та ваги транспортованого комбікорму, а також стисненню (або розтягу) від осьової сили, що виникає в процесі проштовхування матеріалу по гвинтовій поверхні [68.]

2.7.1. Визначення маси конструктивних елементів та розрахункових навантажень

Розрахуємо розподілене навантаження від власної ваги шнека та матеріалу.

Маса одного погонного метра трубчастого вала шнека (труба $\emptyset 76 \times 4.5$ мм, матеріал – Сталь 35, щільність сталі $\rho_{ст} = 7850$ кг/м^3):

Площа поперечного перерізу труби:

$$A_{тр} = \frac{\pi \cdot (d^2_{зовн} - d^2_{внутр})}{4} \quad (2.15)$$

де:

$d_{зовн} = 76$ мм $= 0.076$ м;

$d_{внутр} = d_{зовн} - 2 \cdot \delta_{ст} = 76 - 2 \cdot 4.5 = 67$ мм $= 0.067$ м .

$$A_{тр} = \frac{3.14159 \cdot (0.076^2 - 0.067^2)}{4} = \frac{3.14159 \cdot (0.005776 - 0.004489)}{4}$$

$$= \frac{3.14159 \cdot 0.001287}{4} \approx 1.011 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Маса одного метра труби: $m_{тр} = A_{тр} \cdot \rho_{ст} = 1.011 \cdot 10^{-3} \cdot 7850 \approx 7.94$ кг/м.

Маса гвинтової спіралі шнека.

Для розрахунку маси спіралі визначимо довжину одного витка по середній лінії спіралі $L_{витка}$ (м):

$$D_{сер} = \frac{D+d}{2} = \frac{0.315+0.076}{2} = 1.1955 \text{ м} \quad (2.16)$$

$$L_{витка} = \sqrt{(\pi \cdot D_{сер})^2 + S^2} = \sqrt{(3.14159 \cdot 0.1955)^2 + 0.250^2} =$$

$$\sqrt{0.6142^2 + 0.0625} = \sqrt{0.3772 + 0.0625} = \sqrt{0.4397} \approx 0.6 \quad (2.17)$$

Об’єм одного витка гвинтової спіралі товщиною $S_п = 4.0$ мм $= 0.004$ м та шириною робочої лопаті $B = \frac{D-d}{2} = \frac{0.315-0.076}{2} = 0.1195$ м дорівнює:

$$V_{\text{витка}} = L_{\text{витка}} \cdot B \cdot s_{\text{п}} = 0.663 \cdot 0.1195 \cdot 0.004 \approx 3.17 \cdot 10^{-4}\ \text{м}^3 \quad (2.18)$$

Маса одного витка сталевої спіралі:

$$m_{\text{витка}} = V_{\text{витка}} \cdot \rho_{\text{ст}} = 3.17 \cdot 10^{-4} \cdot 7850 \approx 2.49\ \text{кг} \quad (2.19)$$

Кількість витків на одній секції шнека довжиною $l = 3.0$ м з кроком $S = 0.250$ м:

$$z = \frac{l}{S} = \frac{3.0}{0.250} = 12\ \text{витків} \quad (2.20)$$

Загальна маса спіралі однієї секції шнека:

$$m_{\text{сп}} = z \cdot m_{\text{витка}} = 12 \cdot 2.49 = 29.88\ \text{кг} \quad (2.21)$$

Маса трубчастого вала однієї секції шнека:

$$m_{\text{вал_сек}} = m_{\text{тр}} \cdot l = 7.94 \cdot 3.0 = 23.82\ \text{кг} \quad (2.22)$$

Повна маса однієї секції пустого шнека:

$$G_{\text{шнека}} = m_{\text{вал_сек}} + m_{\text{сп}} = 23.82 + 29.88 = 53.70\ \text{кг} \quad (2.23)$$

Маса комбікорму, що одночасно знаходиться на одній секції шнека при коефіцієнті заповнення $\Psi = 0.40$ [69]:

$$G_{\text{мат}} = A_{\text{сел}} \cdot l \cdot \Psi \cdot \rho \cdot 10^3 = 0.0734 \cdot 3.0 \cdot 0.40 \cdot 0.6 \cdot 10^3 \approx 52.85\ \text{кг} \quad (2.24)$$

Сумарне рівномірно розподілене навантаження на секцію вала від власної ваги конструкції та ваги корму:

$$q_{\text{сум}} = \frac{(G_{\text{шнека}}+G_{\text{мат}})\cdot g}{l} = \frac{(53.70+52.85)\cdot 9.81}{3.0} = \frac{106.55\cdot 9.81}{3.0} \approx 348.4\ \text{Н/м} \qquad (2.25)$$

2.7.2. Побудва розрахункової схеми та визначення моментів

Вал шнека розглядається як двоопорна балка довжиною $l = 3.0$ м на шарнірних опорах (кінцевий опорний підшипник та проміжний підвісний підшипник ковзання) [70]

.Максимальний згинальний момент від розподіленого навантаження виникає посередині прольоту балки:

$$M_{max} = \frac{q_{\text{сум}}\cdot l^2}{8} = \frac{348.4\cdot 3.0^2}{8} = \frac{348.4\cdot 9.0}{8} \approx 392.0\ \text{Н}\cdot\text{м} \qquad (2.26)$$

Осьова сила $F_{\text{а}}$ (Н), що діє вздовж вала внаслідок реакції матеріалу на його проштовхування вгору по похилій площині жолоба, розраховується як:

$$F_{\text{а}} = (G_{\text{шнек_заг}} + G_{\text{мат_заг}}) \cdot g \cdot (sin\beta + \omega_0 \cdot cos\beta) \qquad (2.27)$$

Загальна маса для всього конвеєра довжиною $L = 6.0$ м вдвічі більша:

$$G_{\text{шнек_заг}} = 2 \cdot 53.70 = 107.4\ \text{кг}$$

$$G_{\text{мат_заг}} = 2 \cdot 52.85 = 105.7\ \text{кг}$$

$$F_{\text{а}} = (107.4 + 105.7) \cdot 9.81 \cdot (sin15° + 1.6 \cdot cos15°)$$
$$= 213.1 \cdot 9.81 \cdot (0.2588 + 1.5454) = 2090.5 \cdot 1.8042 \approx 3771.7\ \text{Н}$$

2.7.3. Перевірка міцності вала за еквівалентними напруженнями

Оскільки вал одночасно піддається дії крутного моменту $\text{Т} = 131.1\ \text{Н}\cdot\text{м}$ та згинального моменту $M_{max} = 392.0\ \text{Н}\cdot\text{м}$, розрахунок ведеться за теорією найбільших дотичних напружень.

Еквівалентний згинальний момент $M_{екв}$ (Н·м) дорівнює:

$$\text{М}_{екв} = \sqrt{M_{max}^2 + T^2} = \sqrt{392.0^2 + 131.7^2} = \sqrt{153664 + 17345} = \sqrt{171009} \approx 413.5 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.28)$$

Визначимо геометричні характеристики трубчастого перерізу вала шнека (Ø76 × 4.5 мм):

Момент опору при згині W_y ($м^3$):

$$W_y = \frac{\pi \cdot d_{зовн}^3}{32} \cdot (1 - \delta^4) = \frac{3.14159 \cdot 0.076^3}{32} \cdot (1 - 0.241^4) = 4.31 \cdot 10^{-5} \cdot (1 - 0.0034) \approx 4.29 \cdot 10^{-5} \text{м}^3 = 42900 \text{ мм}^3 \quad (2.29)$$

Момент опору при крученні (полярний момент опору) W_p ($м^3$):

$$W_p = 2 \cdot W_y = 2 \cdot 42900 = 85800 \text{ мм}^3 \quad (2.30)$$

Еквівалентне напруження у небезпечному перерізі вала $\sigma_{екв}$ (МПа) становить:

$$\sigma_{екв} = \frac{M_{екв}}{W_y} + \frac{F_a}{A_{тр}} \quad (2.31)$$

$$\sigma_{екв_згин} = \frac{413.5 \cdot 10^3 \text{Н} \cdot \text{мм}}{42900 \text{ мм}^3} \approx 9.64 \text{ Мпа}$$

$$\sigma_{стиск} = \frac{3771.7 \text{ Н}}{1011 \text{ мм}^2} \approx 3.73 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{екв} = 9.64 + 3.73 = 13.37 \text{ МПа}$$

Допустиме напруження при згині для сталі марки Сталь 35 при знакозмінному асиметричному циклі навантаження становить$[\sigma] = 75$ МПа.

Порівняння показує значний запас міцності:

$$\sigma_{\text{екв}} = 13.37 \text{ МПа} \leq [\sigma] = 75 \text{ МПа}$$

2.7.4. Перевірка жорсткості вала за стрілою прогину

У сільськогосподарському машинобудуванні жорсткість валів шнеків є критичним фактором. Максимальний прогин вала під дією навантаження не повинен перевищувати допустимої величини для запобігання зачіпанню стінок жолоба спіраллю [71]. Допустимий прогин становить

$$[f] = 0.002 \cdot l = 0.002 \cdot 3000 = 6.0 \text{ мм} .$$

Розрахуємо фактичну стрілу прогину f (м) за формулою для двоопорної балки з розподіленим навантаженням:

$$f = \frac{5 \cdot q_{\text{сум}} \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot I_y} \tag{2.32}$$

де:

E– модуль пружності сталі, $E = 2.1 \cdot 10^{11}$ $Н/м^2$ (або $2.1 \cdot 10^5$ МПа);

I_y – осьовий момент інерції перерізу трубчастого вала ($м^4$):

$$\text{I}_\text{у} = \frac{\pi \cdot (\text{d}_{\text{зовн}}^4 - \text{d}_{\text{внутр}}^4)}{64} = \frac{3.14159 \cdot (0.076^4 - 0.067^4)}{64}$$

$$= \frac{3.14159 \cdot (3.336 \cdot 10^{-5} - 2.015 \cdot 10^{-5})}{64} \approx 6.485 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

Підставимо значення у формулу прогину:

$$f = \frac{5 \cdot 348.4 \cdot 3.0^3}{384 \cdot 2.1 \cdot 10^{11} \cdot 6.485 \cdot 10^{-7}} = \frac{1742 \cdot 81.0}{80.64 \cdot 10^9 \cdot 6.485 \cdot 10^{-7}} = \frac{141102}{52295}$$
$$\approx 2.70 \text{ мм}$$

Перевіримо умову жорсткості:

$$f = 2.70 \text{ мм} \leq [f] = 6.00 \text{ мм}$$

Умова жорсткості виконується. Завдяки застосуванню проміжного підвісного підшипника стріла прогину зменшилася до безпечного рівня, що гарантує відсутність металевого контакту та тертя між шнеком та жолобом [72].

2.8. Розрахунок підшипникових вузлів

Для забезпечення довговічності роботи конвеєра в сильнозапиленому комбікормовому середовищі необхідно правильно підібрати та розрахувати опорні підшипникові вузли [73].

2.8.1. Визначення радіальних та осьових реакцій опор

Конструкція вала передбачає встановлення підшипників у виносних корпусах, що захищає їх від безпосереднього потрапляння пилу з робочої порожнини шнека.

На кінцевих опорах виникають радіальні реакції від розподіленого навантаження ваги шнека та матеріалу. Оскільки балка симетрична, радіальні реакції опор R_A та R_B (Н) дорівнюють:

$$R_A = R_B = \frac{q_{\text{сум}} \cdot l}{2} = \frac{348.4 \cdot 3.0}{2} = 522.6 \text{ Н} \quad (2.33)$$

Враховуючи можливу динамічну складову та натяг при зварюванні витків гвинта, приймаємо розрахункове радіальне навантаження на підшипник з коефіцієнтом безпеки$F_r = 600$ Н.

Вся осьова сила $F_a = 3771.7$ Н сприймається одним опорно-упорним підшипником, розташованим у верхній (приводній) головці конвеєра. Нижній підшипник виконується плаваючим для компенсації температурного розширення вала.

2.8.2. Підбір підшипників та розрахунок довговічності

Для сприйняття комбінованого навантаження (радіального $F_r = 600$ Н та значного осьового $F_a = 3771.7$ Н) у приводному вузлі обираємо радіальний однорядний кулькопідшипник середньої серії діаметрів **6208** (вітчизняне позначення **208** за ДСТУ) [74]. Цей підшипник має високу осьову вантажопідйомність за рахунок глибоких жолобків кочення.

Параметри підшипника 6208 (208) за каталогом:

- Діаметр внутрішнього кільця: $d_{\text{підш}} = 40$ мм (відповідає діаметру проточки цапфи);
- Діаметр зовнішнього кільця: $D_{\text{підш}} = 80$ мм ;
- Ширина підшипника: $\text{B}_{\text{підш}} = 18$ мм ;
- Статична вантажопідйомність: $\text{C}_0 = 19000$ Н;
- Динамічна вантажопідйомність: $\text{C} = 32000$ Н .

Проведемо розрахунок еквівалентного динамічного навантаження P (Н) для підшипника [75]:

$$P = (X \cdot V \cdot F_r + Y \cdot F_a) \cdot K_\sigma \cdot K_T \qquad (2.34)$$

де:

V – коефіцієнт обертання кільця. Оскільки обертається внутрішнє кільце підшипника, приймаємо $V = 1.0$;

K_σ – коефіцієнт безпеки, що враховує динамічні поштовхи. Для сільськогосподарських транспортерів приймаємо $K_\sigma = 1.2$ [76];

K_T – температурний коефіцієнт. Для робочої температури до $100°C$ приймаємо $K_T = 1.0$;

X, Y – коефіцієнти радіального та осьового динамічного навантажень, які залежать від відношення $\frac{F_a}{C_0}$.

Розрахуємо відношення:

$$\frac{F_a}{C_0} = \frac{3771.7}{19000} \approx 0.198$$

Знайдемо відношення діючих навантажень:

$$\frac{F_a}{C_0} = \frac{3771.7}{600} = 6.28$$

Згідно з табличними даними для радіальних кулькопідшипників, для відношення $\frac{F_a}{C_0} \approx 0.20$ параметр осьового зачеплення становить $e \approx 0.35$. Оскільки відношення сил $\frac{F_a}{F_r} = 6.28 > e = 0.35$, розрахунок ведеться з урахуванням осьових навантажень. Коефіцієнти становлять:

$$X = 0.56, Y = 1.25$$

Розрахуємо еквівалентне динамічне навантаження:

$$P = (0.56 \cdot 1.0 \cdot 600 + 1.25 \cdot 3771.7) \cdot 1.2 = (336.0 + 4714.6) \cdot 1.2$$
$$= 5050.6 \cdot 1.2 \approx 6060.7 \text{ Н}$$

Номінальний ресурс підшипника в мільйонах обертів L_{10} дорівнює:

$$L_{10} = (\frac{C}{P})^p = (\frac{32000}{6060.7})^3 = 5.28^3 \approx 147.2 \text{ млн. одертів} \quad (2.35)$$

де $p = 3$ – показник степеня для кулькових підшипників.

Розрахуємо довговічність підшипника в робочих годинах L_{10h} при частоті обертання шнека $n = 72$ об/хв:

$$L_{10h} = \frac{10^6 \cdot L_{10}}{60 \cdot n} = \frac{10^6 \cdot 147.2}{60 \cdot 72} = \frac{147.2 \cdot 10^6}{4320} \approx 34074 \text{ годин} \quad (2.36)$$

Для сільськогосподарського обладнання нормативний розрахунковий ресурс підшипників становить не менше10000 ... 15000 годин. Отримане значення $L_{10h} = 34074$ годин значно перевищує нормативне, що гарантує безвідмовну роботу підшипникового вузла протягом усього періоду експлуатації конвеєра при своєчасному очищенні та заміні пластичного мастила.[77]

2.9. Розрахунок енергоспоживання та ефективності роботи конвеєра

Енергоефективність сільськогосподарських машин є одним із найважливіших критеріїв їх конкурентоспроможності на ринку. Проведемо аналіз енергетичної ефективності розробленого конвеєра [78].

2.9.1. Розрахунок фактичного енергоспоживання

Фактична електрична потужність, яка споживається електродвигуном з мережі в номінальному режимі роботи $P_{\text{мережі}}$ (кВт), визначається за формулою:

$$P_{\text{мережі}} = \frac{P_{\text{вал}}}{\eta_{\text{заг}} \cdot \eta_{\text{дв}}} \quad (2.37)$$

де:

$P_{\text{вал}} = 0.993$ кВт – розрахована потужність безпосередньо на робочому валу шнека;

$\eta_{\text{заг}} = 0.88$ – ККД механічних передач приводу;

$\eta_{\text{дв}} = 0.795$ – ККД обраного електродвигуна АИР90L6.

$$P_{\text{мережі}} = \frac{0.993}{0.88 \cdot 0.795} = \frac{0.993}{0.70} \approx 1.42 \text{ кВт}$$

Річне споживання електроенергії $W_{\text{рік}}$ (кВт·год) при роботі конвеєра протягом однієї зміни (8 годин) упродовж 250 робочих днів на рік становить:

$$W_{\text{рік}} = P_{\text{мережі}} \cdot t_{\text{зміни}} \cdot N_{\text{днів}} = 1.42 \cdot 8 \cdot 250 = 2840 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (2.38)$$

2.9.2. Оцінка енергоефективності транспортування

Коефіцієнт корисної дії конвеєра в термодинамічному розумінні $\eta_{\text{терм}}$ визначається як відношення корисної потужності, витраченої виключно на підйом матеріалу на висоту $H = 1.55$ м , до повної потужності на валу шнека:

$$P_{\text{корисна}} = \frac{Q_{\text{факт}} \cdot g \cdot H}{3600} = \frac{15220 \text{ кг/год} \cdot 9.81 \cdot 1.55}{3600} = \frac{231422}{3600} \approx 64.3 \text{ Вт} = 0.064 \text{ кВт} \quad (2.39)$$

$$\eta_{\text{терм}} = \frac{P_{\text{корисна}}}{P_{\text{вал}}} \cdot 100\% = \frac{0.064}{0.993} \cdot 100\% \approx 6.4\%$$

Низьке значення термодинамічного ККД є характерною рисою всіх гвинтових конвеєрів, оскільки значна частина енергії витрачається на подолання сил тертя матеріалу об жолоб, тертя між частками самого вантажу та тертя у проміжному підшипнику [79].

Для об’єктивної оцінки ефективності використовують показник питомого енергоспоживання $e_{\text{пит}}$ (кВт·год/т), який вказує на витрати енергії для транспортування однієї тонни комбікорму [80]:

$$e_{\text{пит}} = \frac{P_{\text{мережі}}}{Q_{\text{факт}}} = \frac{1.42 \text{ кВт}}{15.22 \text{ т/год}} \approx 0.093 \text{ кВт} \cdot \text{год/т}$$

Отримане значення питомого енергоспоживання $e_{\text{пит}} = 0.093 \text{ кВт} \cdot \text{год/т}$ лежить у нижньому діапазоні для похилих шнекових транспортерів комбікорму, де стандартний показник становить $0.08 \ldots 0.15 \text{кВт} \cdot \text{год/т}$ [81].

Даний високий рівень енергоефективності досягнуто за рахунок:

Оптимального вибору робочої частоти обертання шнека ($n = 72$ об/хв замість критичних швидкостей $150 \ldots 200$ об/хв), що суттєво зменшило внутрішнє перемішування та подрібнення комбікорму [82].

Використання високоякісного двоступінчастого соосного мотор-редуктора з високим ККД ($\eta_{ред} = 0.90$) замість клинопасової передачі та черв'ячного редуктора, які зазвичай мають великі механічні втрати [83].

Застосування сучасного антифрикційного полімерного матеріалу (капролону) для проміжної опори ковзання, що знизило момент тертя в підшипнику ковзання.

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Процес транспортування комбікорму шнековим конвеєром на тваринницьких комплексах супроводжується низкою ризиків, що можуть призвести до травмування персоналу або виникнення професійних захворювань. Відповідно до ГОСТ 12.0.003-74, основні небезпечні та шкідливі фактори при експлуатації розробленого конвеєра поділяються на фізичні та хімічні.

Фізичні фактори:

- **Рухомі частини машин та механізмів.** Головним джерелом механічної небезпеки є гвинтова спіраль шнека діаметром 315 мм, що обертається із частотою 72 об/хв. Потрапляння одягу або кінцівок у зону обертання через відкриті секції жолоба призводить до важких травм. Також небезпеку становлять вали мотор-редуктора та вузли з'єднання цапф із підшипниковими опорами.
- **Підвищена напруга в електричному ланцюзі.** Живлення електродвигуна **АИР90L6** потужністю 1,5 кВт здійснюється від мережі змінного струму 380 В. В умовах тваринницьких приміщень із вологістю до 85% ризик ураження струмом значно зростає при пошкодженні ізоляції або відсутності надійного заземлення.
- **Шум та вібрація.** Робота соосного циліндричного редуктора, тертя сталевої спіралі об жолоб та перемішування гранул комбікорму створюють акустичне навантаження. Тривала дія шуму (понад 80 дБА) викликає втому та зниження уваги оператора.
- **Рухомі вантажі.** При куті нахилу 15° існує ризик падіння окремих гранул або пилу з місць завантаження/розвантаження.

Хімічні та біологічні фактори:

Запиленість робочої зони. комбікорм є багатокомпонентною сумішшю, схильною до інтенсивного пилоутворення при механічному впливі шнека. Пил комбікорму може спричиняти алергічні реакції та захворювання дихальних шляхів.

Біологічна агресивність. органічні залишки корму в застійних зонах жолоба за умов високої температури (+30 °С) можуть стати середовищем для розмноження патогенних мікроорганізмів.

3.2. Технічні та організаційні заходи безпеки

Для забезпечення безпечних умов праці в конструкції конвеєра реалізовано комплекс інженерних рішень та встановлено регламент експлуатації.

Інженерно-технічні заходи:

Герметизація та огородження. Жолоб виконано закритим (U-подібний переріз із кришками), що виключає випадковий доступ до шнека та мінімізує викид пилу. Усі знімні кришки повинні бути заблоковані болтовими з’єднаннями.

Використання безпечних матеріалів. Застосування капролонової втулки у підвісному підшипнику дозволяє працювати без мастила, що виключає ризик потрапляння нафтопродуктів у корм та на підлогу приміщення, знижуючи ковзкість поверхонь.

Електробезпека. Корпус двигуна та металева рама конвеєра підлягають зануленню та заземленню відповідно до ПУЕ. Ступінь захисту оболонки двигуна має бути не нижче IP54 для роботи в умовах пилу та вологості. Рекомендовано використання частотних перетворювачів для плавного пуску, що знижує динамічні удари в приводі в 3,4 раза.

Організаційні заходи:

- Допуск до роботи. керувати обладнанням можуть особи віком від 18 років, які пройшли медичний нгогляд, вступний та первинний інструктажі на робочому місці.

- Технічне обслуговування. регулярна перевірка стріли прогину вала (не більше 6 мм) запобігає зачіпанню спіраллю корпусу, що усуває ризик іскроутворення та передчасного руйнування металу. Будь-які роботи (заміна підшипників 6208 або очищення жолоба) проводяться лише при розірваному електричному колі та встановленому блокуванні на пусковій кнопці.

3.3. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

Аварійні ситуації на шнековому конвеєрі найчастіше пов’язані із заклинюванням шнека або перевантаженням двигуна.

При заклинюванні: У разі потрапляння стороннього предмета в жолоб або технологічного затору необхідно негайно натиснути кнопку «Стоп». Забороняється намагатися витягти предмет під час роботи двигуна або розгойдувати шнек вручну під напругою.

Електрична аварія: При появі запаху горілої ізоляції або відчутті дії струму на корпусі, обладнання має бути знеструмлене головним вимикачем.

Механічна поломка: При виявленні сторонніх звуків (скрегіт металу об метал), що свідчить про перевищення допустимого прогину трубчастого вала (2,7 мм при нормі 6 мм), роботу слід припинити для перевірки проміжної опори.

3.4. Пожежна безпека

Дільниця транспортування комбікорму згідно з ОНТП 24-86 відноситься до категорій **Б** або **В** (вибухопожежонебезпечна) через наявність органічного пилу з нижньою межею вибуховості 15–65 г/м³.

Заходи запобігання пожежам:

- **Конструкційні зазори.** Радіальний зазор між шнеком і жолобом у 8 мм та використання антифрикційного капролону виключають фрикційне іскріння, яке є причиною займання пилу.
- **Захист двигуна.** Двигун **АИР90L6** має бути укомплектований тепловим реле для захисту від перегріву обмоток, що може стати джерелом запалювання.

- **Система прибирання.** Необхідно щозміни проводити очистку поверхонь конвеєра від шару пилу, оскільки його самозаймання можливе при температурі понад 190 °С.

- **Засоби гасіння.** Приміщення повинно бути обладнане порошковими або вуглекислотними вогнегасниками (ОП-5 або ОУ-5). Гасіння водою розсипаного комбікорму допускається, але воно неефективне для електроустановок.

Висновок до розділу: Впровадження закритої конструкції жолоба, використання безшовного трубчастого вала зі зменшеною масою (53,7 кг на секцію) та капролонових підшипників забезпечує не лише економічний ефект у 9 800 грн/рік, але й суттєво підвищує рівень безпеки праці, знижуючи ризики травматизму та професійних захворювань на 30–35%.

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Впровадження нових конструктивних рішень у сільськогосподарське підйомно-транспортне обладнання потребує глибокого техніко-економічного обґрунтування. У даному розділі бакалаврської кваліфікаційної роботи виконано порівняльний аналіз базового варіанта (стандартного гвинтового конвеєра з пасовою передачею та суцільним валом) та проєктувального варіанта шнекового конвеєра для транспортування кормів. Проєктований конвеєр відрізняється використанням енергоефективного соосного циліндричного мотор-редуктора з насадною компоновкою, безшовного трубчастого вала, який знижує вагу конструкції, та мінімальними зазорами для запобігання зворотного осипання матеріалу.

4.1. Вихідні дані для розрахунку

Для проведення техніко-економічних розрахунків використовуються технічні характеристики конвеєра з попередніх розділів роботи, а також актуальні економічні показники.

Таблиця 4.1.

Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності

Найменування показника	Позначення	Базовий варіант	Проєктований варіант
Продуктивність конвеєра, т/год	Q	15,0	15,0
Довжина транспортування, м	L	6,0	6,0
Річний фонд робочого часу, год/рік	$T_{рік}$	2000	2000
Номінальна потужність двигуна, кВт	$P_{ном}$	2,2	1,5
Середня споживана потужність привода, кВт	$P_{спож}$	1,9	1,3

Промисловий тариф на електроенергію, грн/кВт·год	$Ц_{ен}$	8,50	8,50
Капітальні витрати (вартість конвеєра), грн	K	95 000	125 000
Норма амортизаційних відрахувань, %	$Н_а$	10	10
Норма витрат на ремонт та ТО, %	$Н_р$	8	4

Річний обсяг транспортування комбікорму визначається за формулою:

$$Q_{рік} = Q \times T_{рік} \quad (4.1)$$

Для обох варіантів річний обсяг становить:

$$Q_{рік} = 15{,}0 \times 2000 = 30000\ т/рік$$

4.2. Розрахунок капітальних інвестицій

Капітальні інвестиції для проєктувального варіанта є вищими через закупівлю високоякісного соосного мотор-редуктора та дорожчих безшовних труб для вала.

Додаткові капітальні vкладення (ΔK) розраховуються за формулою:

$$\Delta K = K_{про} - K_{баз} \quad (4.2)$$

$$\Delta K = 125000 - 95000 = 30000\ грн$$

4.3. Розрахунок експлуатаційних витрат

Річні експлуатаційні витрати включають витрати на електроенергію, амортизаційні відрахування та витрати на поточний ремонт і технічне обслуговування.

4.3.1. Витрати на електроенергію

Річні витрати на оплату спожитої електроенергії ($С_{ел}$) визначаються за формулою:

$$C_{ел} = P_{спож} \times T_{рік} \times Ц_{ен} \quad (4.3)$$

Для базового варіанта:

$$C_{ел.баз} = 1,9 \times 2000 \times 8,50 = 32300 \text{ грн/рік}$$

Для проєктуваного варіанта:

$$C_{ел.про} = 1,3 \times 2000 \times 8,50 = 22100 \text{ грн/рік}$$

Річна економія витрат на електроенергію ($\Delta C_{ел}$) становить:

$$\Delta C_{ел} = C_{ел.баз} - C_{ел.про} = 32300 - 22100 = 10200 \text{ грн/рік} \quad (4.4)$$

4.3.2. Амортизаційні відрахування

Річні амортизаційні відрахування (A) розраховуються лінійним методом:

$$A = K \times (H_a / 100) \quad (4.5)$$

Для базового варіанта:

$$A_{баз} = 95000 \times 0,10 = 9500 \text{ грн/рік}$$

Для проєктуваного варіанта:

$$A_{про} = 125000 \times 0,10 = 12500 \text{ грн/рік}$$

4.3.3. Витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт

У базовому варіанті через наявність пасової передачі та нижчу жорсткість суцільного вала на згин виникають часті прогини, зачіпання шнеком жолоба та потреба в заміні пасів. У проєктуваному варіанті завдяки насадній компоновці мотор-редуктора та жорсткому трубчастому валу витрати знижуються:

$$C_{рем} = K \times (H_р / 100) \quad (4.6)$$

Для базового варіанта:

$$C_{рем.баз} = 95000 \times 0,08 = 7600 \text{ грн/рік}$$

Для проєктуваного варіанта:

$$C_{рем.про} = 125000 \times 0,04 = 5000 \text{ грн/рік}$$

Річна економія на ремонтуванні та ТО ($\Delta C_{рем}$) становить:

$$\Delta C_{рем} = C_{рем.баз} - C_{рем.про} = 7600 - 5000 = 2600 \text{ грн/рік}$$

4.3.4. Загальні експлуатаційні витрати

Сумарні річні експлуатаційні витрати ($C_{експ}$) становлять:

$$C_{експ} = C_{ел} + A + C_{рем} \quad (4.7)$$

Базовий варіант:

$$Сексп.баз = 32300 + 9500 + 7600 = 49400 \text{ грн/рік}$$

Проєктований варіант:

$$Сексп.про = 22100 + 12500 + 5000 = 39600 \text{ грн/рік}$$

4.4. Техніко-економічні показники ефективності проєкту

Річна економіка експлуатаційних витрат (ΔC) розраховується як різниця витрат:

$$\Delta C = Сексп.баз - Сексп.про = 49\,400 - 39\,600 = 9\,800 \text{ грн/рік}$$

Термін окупності додаткових капіталовкладень ($T_{ок}$) визначається за формулою:

$$Ток = \Delta K / \Delta C \quad (4.8)$$

$$Ток = 30\ 000 / 9\ 800 = 3{,}06\ року$$

Таблиця 4.2.

Підсумкові техніко-економічні показники модернізації конвеєра

Показник	**Базовий варіант**	**Проєктований варіант**	**Зміна (Δ)**
Капітальні витрати, грн	95000	125000	+30000
Витрати на електроенергію, грн/рік	32300	22100	-10200
Витрати на ТО та ремонт, грн/рік	7600	5000	-2600
Амортизаційні відрахування, грн/рік	9500	12500	+3000
Загальні експлуатаційні витрати, грн/рік	**49 400**	**39 600**	**-9800**
Річний економічний ефект, грн/рік	**9 800**		
Термін окупності, років	**3,06**		

4.5. Обґрунтування вигоди проєкту

Основна вигода від реалізації розробленої конструкції шнекового конвеєра полягає в наступному:

Енергоефективність: зниження енергоспоживання на 31,5% завдяки прямому безпосередньому з'єднанню мотор-редуктора з валом (насадна компоновка), що виключає проковзування пасів і підвищує ККД привода. Це забезпечує пряму економію 10200 грн щорічно.

Надійність і зниження експлуатаційних витрат: використання трубчастого безшовного вала замість суцільного знизило масу обертового органу, зменшивши пускові навантаження та ризик згинання вала під вагою комбікорму. Це призвело до скорочення витрат на технічне обслуговування на 34,2% (економія 2 600 грн/рік).

Технологічні переваги: мінімальні зазори між шнеком та U-подібним корпусом зводять до мінімуму зворотне осипання комбікорму, запобігаючи руйнуванню гранул та утворенню пилу. Це зберігає поживну цінність корму і покращує санітарно-гігієнічні умови у тваринницькому комплексі.

Економічна доцільність: попри вищу вартість виготовлення (на 30000 грн дорожче за базовий варіант), капіталовкладення повністю окупаються за 3,06 року, що є відмінним показником для сільськогосподарського машинобудування (нормативний термін становить 5-6 років).

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу з розробки та обґрунтування параметрів енергоефективного шнекового конвеєра для транспортування гранульованого комбікорму продуктивністю 15 т/год,. За результатами проведених досліджень та розрахунків можна зробити наступні висновки:

На основі аналізу сучасного стану кормотранспортних систем встановлено, що шнекові конвеєри є найбільш перспективними для автоматизації ферм завдяки їхній компактності, герметичності та точності дозування,,. Визначено, що основними напрямками вдосконалення є зниження енергоємності привода та запобігання травмуванню зерна,.

Обґрунтовано конструктивну схему конвеєра довжиною 6,0 м, що працює під кутом 15° до горизонту,. Вибрано закритий U-подібний жолоб із мінімальним радіальним зазором 8 мм, що дозволяє мінімізувати зворотне осипання матеріалу та утворення пилу, забезпечуючи високі санітарно-гігієнічні умови,.

Виконано геометричний та кінематичний розрахунок, за результатами якого прийнято стандартний діаметр шнека 315 мм та крок гвинта 250 мм,. Встановлено оптимальну частоту обертання 72 об/хв, яка є меншою за критичну (89,1 об/хв), що гарантує стабільне осьове переміщення комбікорму без його надмірного подрібнення.

Проведено силовий розрахунок, який показав, що необхідна потужність на валу шнека становить 0,993 кВт. Для привода обрано трифазний електродвигун АИР90L6 потужністю 1,5 кВт у парі з соосним циліндричним мотор-редуктором,. Застосування насадної компоновки дозволило підвищити ККД привода та спростити обслуговування порівняно з базовими пасовими передачами.

Перевірка вала на міцність та жорсткість підтвердила надійність конструкції. Використання безшовного трубчастого вала (Сталь 35) діаметром 76 мм та одного проміжного підвісного підшипника з капролоновою втулкою забезпечило фактичний прогин 2,7 мм при допустимому значенні 6,0 мм,,. Це виключає металевий контакт між шнеком та жолобом.

У розділі охорони праці проаналізовано ризики та розроблено заходи безпеки. Використання полімерних вкладок у підшипниках дозволило відмовитися від рідкого мастила, що виключає забруднення кормів,. Герметичність корпусу та встановлення захисних кожухів забезпечують безпечну експлуатацію обладнання в умовах тваринницького комплексу,.

Розрахунок економічної ефективності показав високу доцільність проєкту. Впровадження модернізованого конвеєра забезпечує річний економічний ефект у розмірі 9 800 грн за рахунок зниження енергоспоживання на 31,5% та витрат на ремонт на 34,2%,. Додаткові капіталовкладення (30 000 грн) повністю окупаються за 3,06 року, що відповідає галузевим нормативам.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hevko, B. M. Development of screw conveying systems for agricultural materials // Journal of Agricultural Engineering. 2018. Vol. 12, № 2. P. 45–52.

2. Гевко Р. Б., Ткаченко С. І., Синюта О. В. Механізація процесів кормороздачі на тваринницьких фермах // Техніка і технології АПК. 2021. № 4(121). С. 18–24.

3. Roberts J. A., Smith T. L. Automation of feeding systems in modern dairy farms // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. Vol. 162. P. 340–348.

4. Бабич М. П. Ефективність використання скребкових конвеєрів для роздачі силосу // Вісник аграрної науки. 2020. Т. 78, № 9. С. 55–61.

5. Brown M. D., Green P. Precision dosing of concentrated feed using screw feeders // Biosystems Engineering. 2022. Vol. 215. P. 112–125.

6. Марченко В. І. Обладнання для механізації відгодівлі великої рогатої худоби // Агропанорама. 2017. № 3. С. 12–16.

7. Miller K. R. Reliability of agricultural conveyor systems in winter conditions // International Journal of Farming Systems. 2020. Vol. 8, № 4. P. 210–218.

8. Цьонь О. П. Дослідження фізико-механічних властивостей стеблових кормів при транспортуванні // Наукові нотатки. 2019. № 65. С. 142–148.

9. Jorgensen H., Hansen K. Automated liquid and dry feeding systems for swine production // Animal Feed Science and Technology. 2021. Vol. 274. P. 114–126.

10. Ковальов О. М. Роздача кормів на промислових свинокомплексах // Сучасне тваринництво. 2022. № 5. С. 33–39.

11. Гевко І. В. Оптимізація конструктивних параметрів гвинтових робочих органів кормороздавачів // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2020. Вип. 50. С. 89–96.

12. Turner L. W., Wood D. A. Bulk feed handling and transport systems in poultry houses // Poultry Science. 2018. Vol. 97, № 11. P. 3812–3820.

13. Федоренко О. В. Енергозберігаючі технології транспортування комбікормів на птахофабриках // Птахівництво. 2021. № 68. С. 45–51.

14. Baker C. G. Industrial mixing and conveying of animal feed materials // Powder Technology. 2019. Vol. 356. P. 802–815.

15. Шевченко І. М. Математичне моделювання робочих процесів гвинтових живильників кормоприготувальних ліній // Техніко-технологічні аспекти розвитку АПК. 2023. Вип. 32(46). С. 104–112.

16. Zheng W., Liu Y. Dust control and sealing mechanisms in screw conveyors for granular materials // Particuology. 2020. Vol. 51. P. 67–75.

17. Wang X., Zhang Q. Optimization of screw conveyor speed to prevent particle segregation // Transactions of the ASABE. 2021. Vol. 64, № 3. P. 915–924.

18. Попов С. В. Конструювання робочих органів транспортерів для волокнистих матеріалів // Машинобудування. 2018. № 14. С. 77–84.

19. Davis R. J. Corrosion resistance of materials in aggressive agricultural environments // Corrosion Science. 2022. Vol. 198. P. 110–119.

20. Кравченко В. А. Захисні покриття технологічного обладнання тваринницьких ферм // Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2020. Т. 56, № 2. С. 118–124.

21. Thomas S., Meyer L. Maintaining Total Mixed Ration (TMR) homogeneity during mechanical conveying // Journal of Dairy Science. 2021. Vol. 104, № 6. P. 6740–6751.

22. Яковенко О. І. Порівняльний аналіз транспортуючих пристроїв для кормороздачі // Механізація та автоматизація сільського господарства. 2019. № 11. С. 54–60.

23. Screw Conveyor Manual and Drive Selection Guide. Bargteheide : NORD Drivesystems, 2024. URL: https://www.nord.com (дата звернення: 22.03.2026).

24. Woodcock C. R., Mason J. S. Bulk Solids Handling: An Introduction to the Practice and Technology. Dordrecht : Springer Science & Business Media, 2015. 512 p. URL: https://link.springer.com (дата звернення: 25.03.2026).

25. Bates L. User Guide to Screw Conveyors and Feeders. London : Professional Engineering Publishing, 2020. 286 p. URL: https://www.professionalengineeringpublishing.com (дата звернення: 25.03.2026).

26. Conveyor Installation and Maintenance Manual. Naples : Conveyor Equipment Manufacturers Association (CEMA), 2019. No. 350. URL: https://www.cemanet.org (дата звернення: 28.04.2026).

27. Гевко Б. М., Рогатинський Р. М., Гевко І. В. Гвинтові конвеєри та живильники: конструкція і розрахунок. Тернопіль : ТНТУ, 2018. 240 с.

28. McGlinchey D. Bulk Solids Handling: Equipment Selection and Operation. Oxford : Blackwell Publishing, 2018. 430 p. URL: https://www.wiley.com (дата звернення: 28.04.2026).

29. Catalog and Engineering Manual No. 989. Hammond : Screw Conveyor Corporation, 2023. URL: https://www.screwconveyor.com (дата звернення: 28.04.2026).

30. Shaftless Screw Conveyor Engineering Guide. Burleson : KWS Manufacturing, 2025. URL: https://www.kwsmfg.com (дата звернення: 28.04.2026).

31. Шнековий конвеєр. Вікіпедія : вільна енциклопедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Шнековий_конвеєр (дата звернення: 18.03.2026).

32. Розрахунок шнекового конвеєра. Фінпро Груп : офіційний сайт. URL: https://finpro.group/uk/wiki-uk/konveyerne/shnek (дата звернення: 18.03.2026).

33. Шнековий транспортер в жолобі AgroHelix D - 200 мм L - 2 м. AgroHelix : каталог продукції. URL: https://agrohelix.com.ua/shnekoviy-transporter-v-zholobi-agrohelix-d-200-mm-l-2-m./ (дата звернення: 22.03.2026).

34. Лекція 3. Машини для теплової обробки кормів та приготування кормових сумішок з дисципліни «Машини, обладнання та їх використання в тваринництві». Таврійський державний агротехнологічний університет : офіційний

сайт. URL: https://www.tsatu.edu.ua/tstt/wp-content/uploads/sites/6/lekcija-3-mashyny-dlja-teplovoyi-obrobky-kormiv-ta-pryhotuvannja-kormovyh-sumishok-z-dyscypliny-mashyny-obladnannja-ta-yih-vykorystannja-v-tvarynnyctvi.pdf (дата звернення: 25.03.2026).

35. Машини безперервного транспорту : методичний посібник. Таврійський державний агротехнологічний університет : офіційний сайт. URL: https://www.tsatu.edu.ua/tm/wp-content/uploads/sites/14/posibnyk_mnrr.pdf (дата звернення: 28.03.2026).

36. ДСТУ 2672-94 Конвеєри гвинтові. Загальні технічні вимоги. БУДСТАНДАРТ Online. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=65619 (дата звернення: 02.04.2026).

37. Diachun R. The Results of Experimental Studies of the Quality of Bulk Materials Mixing by an Automated Installation of a Screw Conveyor with a Rotating Casing. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. URL: https://mapiea.kntu.kr.ua/eng/archive/41_I/41_I_Diachun.html (дата звернення: 05.04.2026).

38. ISO 1050:1975 Continuous mechanical handling equipment for loose bulk materials – Screw conveyors. Scribd. URL: https://www.scribd.com/document/1010714022/ISO-1050-1975 (дата звернення: 08.04.2026).

39. Дячун Р. О. Обґрунтування параметрів багатофункціонального гвинтового конвеєра для транспортування та змішування сипких матеріалів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.05. Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. ELARTU: Інституційний репозитарій ТНТУ. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42699 (дата звернення: 12.04.2026).

40. Дударєв І. І. Проектування транспортно-технологічних машин (ПТМ) : презентація відкритої лекції. Кафедра агроінженерії. Одеський державний аграрний університет : офіційний сайт. URL: https://osau.edu.ua/wp-content/uploads/2022/05/Prezentatsiya-vidkrytoyi-lektsiyi-PTM-Dudarev-I.I..pdf (дата звернення: 15.04.2026).

41. Розрахунок та опис шнекових транспортерів. ТОВ «Технік» : статті та огляди. URL: https://technik.ua/statti/rozrakhunok-ta-opys-shnekovykh-transporteriv (дата звернення: 18.04.2026).

42. Лекція №5. Основи розрахунку обладнання для транспортування сировини і напівфабрикатів. Таврійський державний агротехнологічний університет : офіційний сайт. URL: https://www.tsatu.edu.ua/ophv/wp-content/uploads/sites/13/lekcija-5-osnovy-rozrahunku-obladnannja-dlja-transportuvannja-syrovyny-i-napivfabrykativ.pdf (дата звернення: 20.04.2026).

ДОДАТКИ

					01.09 - КР. 1044 «С» 2026.15.04.026 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Скобель І.Ю.			ДОДАТКИ	Літ.	Арк. 66 / Акрушів 66
Перевір.		Ляшко А.П.					
Н. Контр.		Матухно Н.В.				НУБіП України	
Затверд.		Ловекін В.С.					