

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра технології та обладнання переробних і харчових виробництв

Пояснювальна записка
до *дипломної роботи* на здобуття ступеня вищої освіти
«магістр»

на тему: «Розробка та дослідження гвинтового пристрою для завантаження
зерна у силос»

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньо-професійною програмою
Технології і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва
спеціальності 208 Агроінженерія
ступеня вищої освіти «магістр» групи
208АІмз_21[1]
Антонець А.В.
Керівник: Горобець О.М.
Рецензент: Харак Р.М.

Полтава – 2021 року

РЕФЕРАТ

Основна частина кваліфікаційної роботи виконана на 70 сторінках пояснювальної записки і 8 фоліях, відображена у 7 таблицях та 22 рисунках.

Пояснювальна записка складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел, який містить 40 найменувань та 2 додатків.

Тема кваліфікаційної роботи: «Розробка та дослідження гвинтового пристрою для завантаження зерна у силос».

Мета роботи – розробка пристрою для обережного завантаження зерна у силос на основі побудови, дослідження та обґрунтування моделі швидкості руху зерна у відкритому гвинтовому каналі із двома змінними кутами нахилу..

Об'єкт дослідження – шляхи травмування зерна, способи його усунення.

У першому розділі розглянуто існуючі технічні пристрої і засоби завантаження силосів зерновим матеріалом, а також наявні теоретичні аналітичні моделі та практичні дослідження.

В другому розділі досліджено та обґрунтовано вигляд та структуру теоретичної моделі швидкості руху зерна у відкритому гвинтовому каналі, знайдено співвідношення між кутами нахилу розгінної і гальмівної ділянок. Запропонована модель враховує радіус та висоту силоса, кути нахилу розгінної та гальмівної ділянок гвинтового жолоба, кількість витків спіралей, початкову швидкість, а також коефіцієнт тертя-ковзання зерна по поверхні жолоба.

У третьому розділі запропоновано технічний опис периферійного відкритого гвинтового завантажувального пристрою із змінними кутами нахилу розгінної і гальмівної ділянок. Співставлення теоретичних та експериментальних значень швидкості зерна вказує на прийнятно високий рівень точності розробленого експериментального зразка ПВГК.

У четвертому розділі представлена екологічна експертиза зерносховищ, розглянуті питання охорони праці, наведено заходи щодо їх покращення. Проведено техніко-економічне обґрунтування модернізації силосів.

Ключові слова: силос, зерно, травмування, модель, відкритий гвинтовий канал.

ВСТУП

Важливою проблемою сучасного сільського господарства є збільшення валового виробництва високоякісного зерна. Від його кількості і якості залежить продовольча безпека країни і сталий розвиток переробної і харчової промисловості [1]. Зерно є живою біологічною системою, в якій виникають фізіолого-біохімічні процеси активність яких обумовлюється характеристиками процесів транспортування і зберігання зерна у силосах і бункерах [2].

На даний час силоси завантажуються зерновою масою переважно за рахунок гравітаційних сил, що діють на зерновий матеріал. Під час падіння зі значної висоти зерно може багаторазово стикатися із внутрішніми стінками силосу та його бетонним дном. Вплив сил тяжіння на зерно під час його завантаження викликає появу в нижній його частині накопичення зернівок, що мають механічні пошкодження внаслідок пружно-пластичної деформації.

Для зберігання зерна на сучасних елеваторах використовують металеві силоси на бетонній основі. Висота їх обмежується несучою здатністю і не перевищує 30–60 м. Силоси будуються, як правило, для збільшення потужності підприємства і економії земельних площ. Стінки сучасних силосів виготовляються із гофрованої цинкової сталі, це збільшує міцність конструкції і знижує її вагу. Завантажуються силоси зерном за допомогою скребкових транспортерів, котрі знаходяться у верхніх транспортних галереях. Ці транспортери подають зерновий вантаж до завантажувальних отворів силосів.

Із збільшенням відстані від головної споруди елеватора до силосів інтенсивність взаємодії зерна з робочими органами скребкових транспортерів збільшується і, як наслідок, кількість і величина травм також зростає. Тому зерновий вантаж, який транспортується до завантажувальних отворів силосів може мати деякий відсоток уже травмованого зерна.

На даний час завантаження зернової маси у силоси відбувається з використанням переважно гравітаційних пасивних пристроїв. Зерновий вантаж, який падає із вершини силосу, не є зв'язаним середовищем, тому його можна

розглядати як вертикальний рух окремих зернівок, з відповідним їх окремим травмуванням. Потрапивши до завантажувального отвору зерно під дією гравітації вільно падає на дно силосу і травмується. Гравітаційне завантаження силосів також супроводжується ударом зерна об зерновий насип. Ударна взаємодія ушкодженого і не ушкодженого зерна в середині силосу збільшує кількість травмованого зерна. Дуже часто при таких ударах відбувається ушкодження основної частини зернівки – зародка.

Загальновідомо, що травмоване зерно менш стійке до зберігання, а отримані під час завантаження травми слугують осередком розвитку шкідливих бактерій і мікробів. При тривалому перебуванні у силосі травмоване зерно починає інтенсивно дихати, в наслідок чого зростає кількість тепла, що виділяється, яке може призвести до самозігрівання зерна у нижній частині силосу, що приводить до порчі зерна або його загибелі. Вказані вище проблеми зберігання зернової маси залишають **актуальними питання** обережної загрузки зернівок у силоси та потребують пошуку шляхів контролю швидкості руху зерна для його гравітаційного завантаження без травмування.

Існуючі технічні засоби завантаження силосів зерновим матеріалом не в повній мірі задовольняють потреби виробництва. Нагальною залишається проблема травмування зерна. Для комплексного вирішення задачі обережного завантаження зерна у силоси доцільно розробити та дослідити роботу периферійного відкритого гвинтового каналу із двома змінними кутами нахилу розгінної та гальмівної ділянок. Це у свою чергу потребує розробки відповідної фізико-математичної моделі руху зерна по поверхні даного гвинтового каналу.

Метою дослідження є розробка пристрою для обережного завантаження зерна у силос на основі побудови, дослідження та обґрунтування моделі швидкості руху зерна у відкритому гвинтовому каналі із двома змінними кутами нахилу. Це дасть змогу покращити технологію завантаження силосів зерновим матеріалом без травмування. Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступний **перелік завдань**, а саме:

– провести аналіз існуючих технічних пристроїв і засобів завантаження

силосів зерновим матеріалом, а також наявних відповідних досліджень;

– обґрунтувати вигляд та структуру теоретичної моделі швидкості руху зерна у відкритому гвинтовому каналі, знайти співвідношення між кутами нахилу розгінної і гальмівної ділянок;

– дослідити параметри аналітичної моделі швидкості руху зерна у відкритому гвинтовому каналі із двома змінними кутами нахилу;

– на основі проведених теоретичних досліджень запропонувати технічний опис периферійного відкритого гвинтового завантажувального пристрою із змінними кутами нахилу розгінної і гальмівної ділянок;

– представити результати експериментальних досліджень та порівняти їх з розрахунковими теоретичними даними досліджуваної моделі.

Об'єкт дослідження – шляхи травмування зерна, способи його усунення.

Предметом дослідження є гравітаційні пристрої що запобігають або зменшують травмування зернової маси.

Методика досліджень – аналіз, синтез, порівняння, узагальнення, спостереження, моделювання, експеримент.

Теоретична значущість – представлено та обґрунтовано адекватну теоретичну модель швидкості руху зерна по гвинтовій лінії із двома змінними кутами нахилу спіралей. Аналітична модель дає змогу знаходити швидкість руху зерна у будь-який момент часу, враховує висоту отвору бункера від краю розгінної частини та залежність між кутами нахилу спіралей розгінної та гальмівної ділянок. Визначено час за якого зерно переходить із розгінної до гальмівної частини каналу, а швидкість досягає максимального значення.

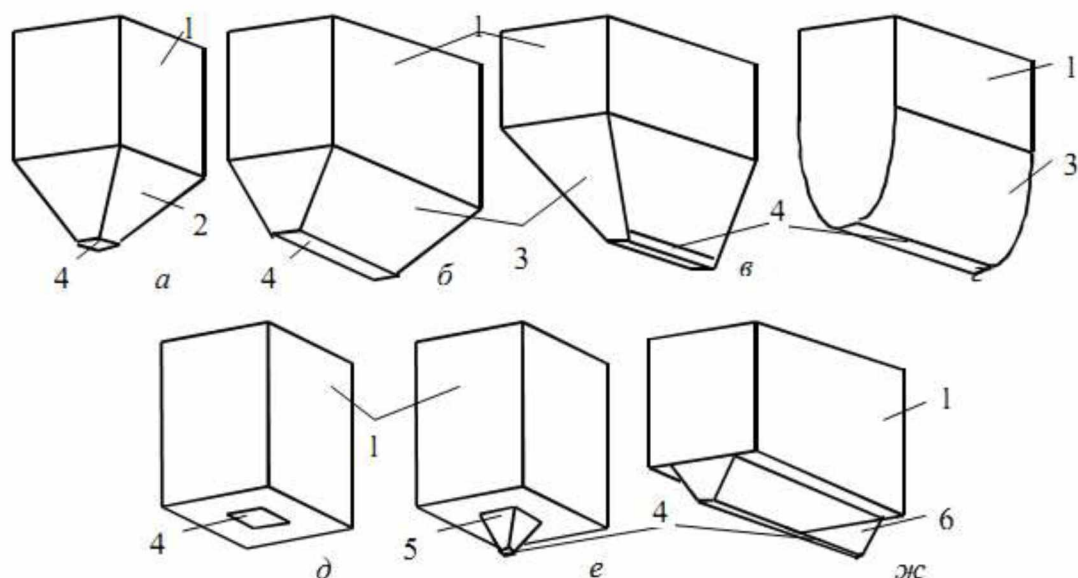
Практична значущість – розроблений периферійний відкритий гвинтовий канал. Запропонований пристрій запобігає травмуванню зерна завдяки наявності в ньому одночасно розгінної і гальмівної гвинтової ділянок із двома різними кутами нахилу витків спіралі. Для даного пристрою обґрунтовано значення рекомендованих кутів розгінної та гальмівної ділянок, що запобігає травмуванню та забезпечує оптимальне проходження зернової маси, зокрема пшениці стандартної вологості.

1. СТАН ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Огляд конструкційних особливостей існуючих бункерів та силосів

Бункери та їх особливості

Найбільш широке поширення в промисловості отримали бункери прямокутної (рис. 1.1) і круглої форми (рис. 1.2) в поперечному перерізі. Прямокутні бункери поширені значно більше, ніж круглі, що пояснюється зручністю їх розміщення в сітці колон і можливістю монтажу з лінійних і плоских елементів. До їх недоліків слід віднести неминучість утворення застійних зон вантажу в місцях перетину суміжних стінок.

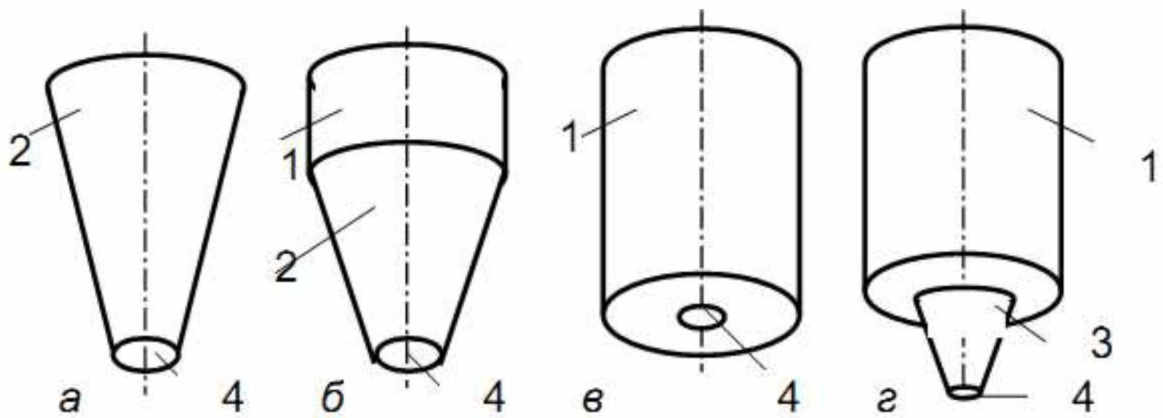


а - пірамідальний; б - лотковий з трапецієподібним лотком; в - лотковий з трикутним лотком; г - лотковий з параболічним лотком; д - ящиковий; е - ящиковий з лійкою; ж - ящиковий з лотком; 1 - призматична частина; 2 - воронка; 3 - лоток; 4 - випускний отвір; 5 - місцева воронка; 6 - місцевий лоток

Рисунок 1.1 – Схеми бункерів прямокутної форми

Однак при досить великих площах випускних отворів і кутах нахилу стінок воронки кращі типи прямокутних бункерів працюють задовільно. При цьому стінки повинні бути без суцільних шорсткостей, уступів та вибоїн. Симетричні бункера працюють помітно краще, ніж несиметричні.

Пірамідальні бункери, нижня частина яких виконується у вигляді усіченої піраміди (воронки), а верхня - у вигляді призми непогано себе зарекомендували для досить сипучих вантажів.



а - конусний; б - конусно-циліндричний; в - циліндричний;
г - циліндричний з лійкою; 1 - циліндрична частина; 2 - воронка;
3 - місцева воронка; 4 - випускний отвір

Рисунок 1.2 – Схема бункерів круглої форми

На даний час пірамідальні воронки з подовженими випускними отворами зустрічаються рідко. Практика підтверджує доцільність застосування бункерів з такими воронками для погано сипучих матеріалів.

У лоткового-призматичних бункерах розвантажувальна воронка виконується у вигляді лотка. Зазвичай дно лотка розташоване горизонтально, а торцеві стінки - вертикально або похило. У поперечному перерізі лоток може мати трапецієподібний (рис. 1.1, б), трикутний (рис. 1.1, в) або параболічний (рис. 1.1, г) обрис.

Для погано сипучих вантажів найдоцільніше використання лоткових бункерів з призматичною частиною або без неї, з симетричним трапецієподібним лотком і щілинним випускним отвором. Застосування трапецієподібних лотків зі щілинними отворами особливо доцільне при великій ємності і протяжності бункерів. Залежно від технологічного рішення в лотково-призматичному бункері може бути поздовжній або поперечний напрямок лотків.

Функціонування бункерів з подовженими і, особливо, щілинними

випускними отворами багато в чому залежить від конструкції розвантажувальних пристроїв. При поздовжньому отворі і, так званому, розвантажувальному столі (рис. 1.3) стабільне розвантаження бункера забезпечують сучасні типи розвантажувачів, які виносять сипучий вантаж, пересуваючись уздовж щілинного отвору.



1 - корпус бункера; 2 - розвантажувальний стіл

Рисунок 1.3 – Схеми бункерів з воронками лоткового типу зі щілинними отворами і розвантажувальними столами

Конусні (рис.1.2, а) і конусно-циліндричні (рис. 1.2, б) бункера з центрально розташованим круглим випускним отвором добре задовольняють умову як найменшої товщини застійної зони, так як їх форма досить близька до форми зони потоку сипучих вантажів. Їх велика перевага - відсутність вертикальних та похилих ребер. При добре сипучих матеріалах мінімально допустимий кут нахилу утворюваної конусної воронки виходить значно меншим, ніж при пірамідальній.

Конусні і конусно-циліндричні симетричні бункери можна рекомендувати для добре і погано сипучих матеріалів. Область їх використання слід обмежити окремо стоячими бункерами. Циліндричні бункера (рис. 1.2, в) набагато поступаються бункерам з конусною нижньою частиною. Горизонтальне днище сприяє створенню в нижній частині значної застійної зони. Щоб уникнути цього нижня частина бункера навколо випускного отвору зазвичай заповнюється бетоном або щільною кладкою.

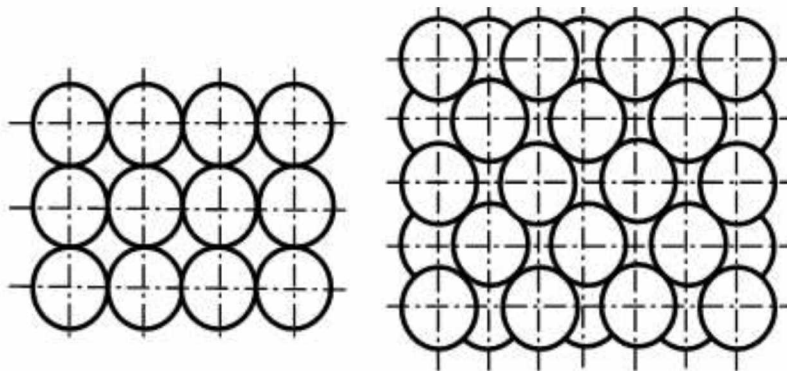
Конструктивні особливості силосів

Бункери і силоси відрізняються великими розмірами останніх за висотою. Конструкція силосів є такою самою, як і бункерів. На багатьох підприємствах в

експлуатації знаходяться як металеві циліндричні, так і прямокутні силоси. Вони слугують в якості сховищ готового товару або використовуються як тимчасові об'єми для розміщення сировини чи напівфабрикатів. Будуються окремими конструкціями, або групою силосів, що конструктивно об'єднуються в один спільний склад.

Форма, розміри та кількість силосів, способи опори на фундамент визначаються у відповідності з вимогами технологічних процесів виробництв, способами розвантаження та завантаження, та відповідно до техніко-економічної кон'юнктури. За формою силоси поділяють на круглі, квадратні, прямокутні, 6-ти гранні та більшою кількістю граней. Через простоту конструювання перевагу мають круглі силоси. Адже за круглої форми стінки силоси піддаються переважно зусиллям розтягу, тому не потребують великої товщини стінки.

Якщо циліндричні силоси розміщуються в стик один до одного у декілька рядів, то між ними (рис. 1.4, а, б) виникають порожнини «зірочки», які зазвичай використовуються як додаткові місця для збереження товару або для розміщення в них сходів, фільтрів та іншого обладнання.

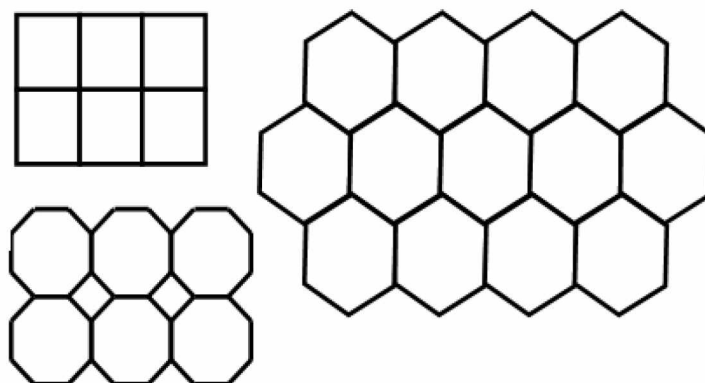


а - розташуванням циліндричних силосів по рядах; б - з шаховим розміщенням

Рисунок 1.4 – Корпуси з круглих силосів з різними схемами розміщення

Прямокутні, квадратні та шестигранні перерізи скупчення силосів розміщуються впритул одне до одного. За квадратного чи прямокутного перерізу скупчень зовнішній вигляд усього силосного складу буде прямокутним (рис. 1.5, а). Прямокутні чи квадратні перерізи використовуються

тоді, коли силоси повинні мати значну кількість малих приміщень для зберігання різного вантажу або того самого вантажу, але різних сортів. Квадратний переріз є раціональним при розмірах сторін не більше 3...4 м.



а - з квадратними силосами; б - з силосами шестикутної форми; в - з силосами восьмикутної форми

Рисунок 1.5 – Корпуси з багатокутних силосів

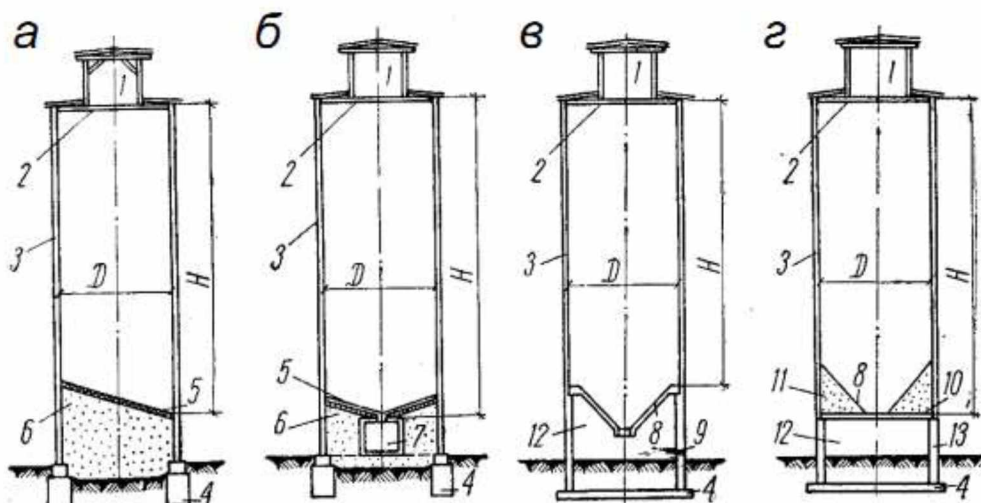
За кордоном широке поширення набули 6-кутні та 8-кутні силосні склади (рис. 1.5, б, в). Вони об'єднують одночасно переваги круглих і квадратних силосів: зокрема немає потреби в побудові криволінійної опалубки; виникають незначні моменти згину через наявність коротких прольотів у стінках; використовується весь простір складу; окремі силоси завантажуються не заважаючи роботі інших.

Типи силосних днищ зазвичай визначаються умовами розвантаження матеріалів. Тип I – під силосна поверхня відсутня, стінки закінчуються на рівні верху фундаменту, дном є бетонна підлога, розвантаження матеріалу здійснюється через випускні отвори у стінках (рис. 1.6, а). Тип II – також не має підсилосного поверху, розвантажується через спеціальні галереї, що проходять під днищем. Вантаж самопливом іде на транспортери або шнеки, розташовані в галереях, через отвір в перекритті. Цей тип застосовується для інвентарних складів цементу на базах будівельної індустрії (рис. 1.6, б). Тип III – стінки безпосередньо спираються на фундамент. Дно є конічною воронкою, сталеву чи залізобетонною, що спирається на уступи в потовщенні стінки. У межах підсилосного поверху товщина стінок робиться більшою, ніж товщина силосу

над воронками. Розвантаження силосів здійснюється самопливом (рис. 1.6, в). Тип IV – стінки починаються на рівні залізобетонного днища, що є перекриттям підсилосного поверху, днище виконується у вигляді плоскої залізобетонної плити (рис. 1.6, г, ж) або зі сталевими або залізобетонними воронками (рис. 1.6, в, д, е). Колони у цьому випадку встановлюються по контурах силосів. Тип V – стінки починаються від позначки днища, колони розташовані по периметру силосу під його стінкою і безпосередньо під днищем. Облаштування додаткових колон дозволяє зменшити товщину плити днища силосу і фундаменту. Силоси такого типу отримали широке поширення для складів готової продукції на цементних заводах (рис. 1.6, ж).

Збірні силоси

При зведенні силосів як збірних залізобетонних конструкцій їх розділяють на окремі вертикальні або горизонтальні частини. Велика висотність робить складним процес поділу конструкції на частини лише вертикально. У такому разі всі елементи будуть мати довжину рівну висоті самого силосу. При такому поділу силосу на частини, потрібно провести стиковку відповідно кільцевої арматури. Це призводить до невиправданих витрат сталі на стики, тому від такого способу зазвичай відмовляються.



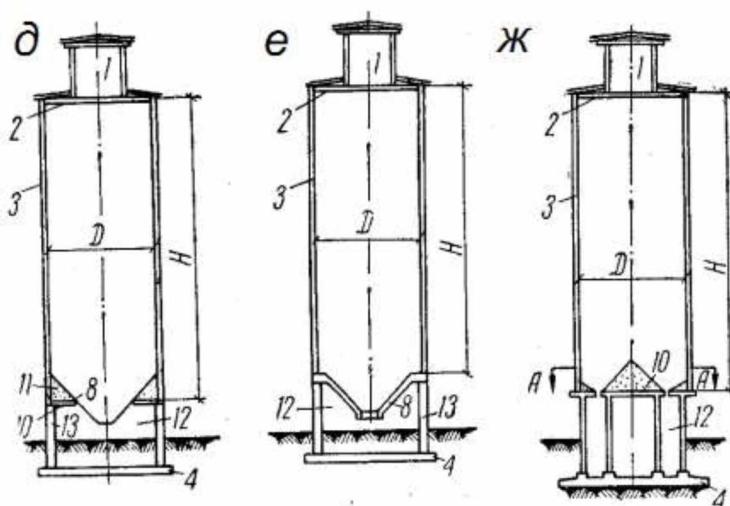


Рисунок 1.6 – Різні схеми облаштування силосів

Під час розробки проектів збірних силосів необхідно за можливості зменшувати число елементів вертикальних стиків. Найкращим варіантом є побудова таких силосів із замкнутих кільцевих елементів.

Прикладом рішення по конструюванню силосних корпусів у збірному залізобетоні є силосні споруди для збереження зерна масою близько 30 тис. тон, із врахуванням заповнення міжсилосних «зірочок», що розроблені ДПІ-6. Конструкція складається з двох частин по 24 круглих силоси в ряді. Силоси мають радіус у 3 м, висотою 30 м. Вони установлені по шість силосів у кожному з чотирьох рядів. Під силосом на стовпах розміщується підсилосний поверх, що має висоту 5 м, а над ним розташована галерея. Вся конструкція силосного блоку, крім монолітної плити фундаментна, запропоновані у збірному залізобетоні [3].

Сукупність силосів для зберігання зерна масою близько 25 тис. т (рис. 1.7) має шість 12-кутних силосів, що мають діаметри близько 18 м і розподільну вежу висотою 40 м. Воронки та силосні банки збирають із завчасно виготовлених плит. На прямокутні залізобетонні колони, які монтуються зі збірних плит із заливкою швів на місці, спираються воронки (рис. 1.7, в). Силосні споруди складаються з 12-ти трапецієподібних частин (рис.1.7, б). По центру силосу розміщується багатокутне приміщення діаметром близько 6 м, у якому розміщується підйомник, укладений в спеціальний збірний циліндр,

висота циліндра дорівнює висоті силосу [3].

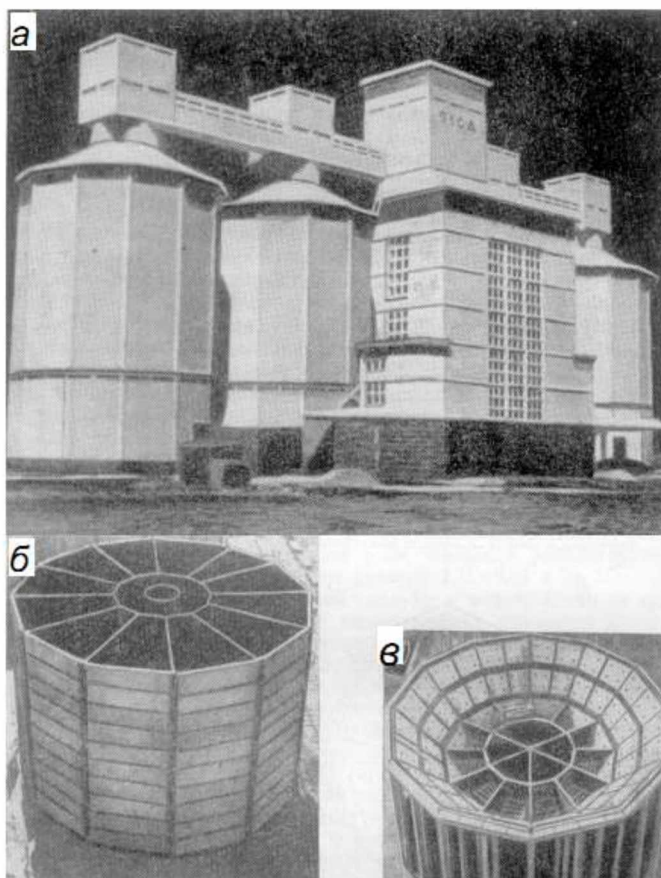


Рисунок 1.7 – Багатокутні силоси для зберігання зерна

В останні десятиліття спостерігається тенденція зведення силосних корпусів із гофрованої оцинкованої і емальованої сталі для зберігання зернових вантажів (рис. 1.8). У силосах подібних конструкцій забезпечується: рівномірне завантаження по щільності насипу зернових вантажів; механізоване перевантаження з будь-якого силосу у будь-який інший силос блоку, рециркуляція в одному силосі; виключення конденсації вологи на внутрішній частині; режим аерації зерна в будь-якій комбінації силосів; енергозбереження при вивантаженні зернових вантажів; механізоване дозавантаження зернових вантажів (при наземному виконанні); автоматизація, контроль граничного завантаження зі звуковою сигналізацією; електронний контроль температури насипу в силосах з центрального пульта в диспетчерській зі світловою індикацією граничних режимів і цифровим архівом; виключення попадання в

порожнину бункерів силосів атмосферних опадів, птахів і гризунів; можливість технічного обслуговування аераційних і вивантажувальних систем при порожньому силосі і ручної доочистки днища.




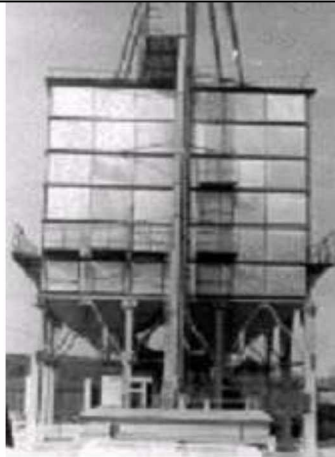
Рисунок 1.8 – Силосні корпуси з оцинкованої сталі

Основні види металевих силосів місткістю від 5 до 6000 т представлені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні типи металевих силосів місткістю від 5 до 6000 т

Тип конструкції	Коротка характеристика	Загальний вид
1	2	3
Тип «Д»	Збірка на болтах з герметиком. Циліндричні, панельні, збірні на болтах, з профільної сталі.	
Тип «С»	Збірка зварюванням одного шва. Циліндричні, суцільнометалеві.	

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
Тип «К» («СН»)	Збірка фальцевим стиком. Циліндричні, спірально-навивні	
	Збірка за допомогою болтових з'єднань. Прямокутні, з плоских панелей, зблоковані із загальним двосхилим дахом або окремо стоячі з пірамідальною покрівлею.	





Універсальні комплексні зерносховища місткістю від 500 до 30000 т і більше призначені для зберігання зернових вантажів вологістю від 16 до 20%. Силоси розміщуються безпосередньо на легких незаглиблених фундаментах або на опорах з конусним дном. Комплексні сховища, представлені в табл. 1.2, можуть комплектуватися сушильним устаткуванням на газі, рідкому і твердому паливі, очисними цехами, міні-заводами з переробки зерна, виробництва борошна, масла, спирту тощо, будь-якої місткості і структури від 500 до 30000 т і більше.

1.2 Аналіз причин травмування зерна під час завантаження у силос

Зерно багатьох культур в процесі збирання, післязбиральної обробки та завантаження для зберігання зазнає впливу різних машин і механізмів, які в тій чи іншій мірі пошкоджують його. Особливо пошкоджується насінневий

матеріал в силу того, що для його отримання необхідно застосовувати технології, що включають значне число операцій і машин по його подальшому транспортуванню та зберіганню. Постає проблема – з одного боку, необхідно витримувати насичений машинами режим обробки та зберігання насіння, з іншого – режим повинен бути досить обережним з тим, щоб забезпечити якість.

Таблиця 1.2 –Типи зерносховищ місткістю від 500 до 30000 т і більше

Тип конструкції	Місткість силосу, т	Кількість комплектів силосів, шт.	Загальний вид
К-1700	40	10	
	125	6	
	300	2	
К-4000	125	6	
	300	4	
	500	4	
К-9000	300	8	
	500	6	
	1000	4	
К-15000	300	10	
	500	4	
	1000	10	

Ступінь пошкодження насіння залежить від комплексу різних факторів: фізико-механічних і біологічних властивостей насіння; стану при збиранні та обробці; характеристик машин (конструкція, рівень виконання) і режимів їх роботи. Більшість факторів носить непостійний характер, через що змінюється і стійкість до механічних навантажень.

Під час транспортування зерна до завантажувального отвору силосу і його гравітаційного падіння відбувається зіткнення зернівок зернового вантажу з робочими органами транспортерів, стінками бункерів [4], бетонним дном силосу і зерновим насипом, що утворюється у середині споруди [5, 6].

Чисельними дослідженнями встановлено, що насіння, котре має високий відсоток ушкодження, має гірші показники по його схожості. У роботах [7, 8] показано, що 30–40 % насіння зернових культур не дають сходів через мікропошкодження. Причиною цього є травмування окремих зернівок та їх інтенсивне осідання під час заповнення силосів компактным струменем (самопливом).

Важливим фактором, що впливає на процес зберігання зернових вантажів і продуктів помелу в ємностях різного призначення, є ущільнення вантажу. Характер ущільнення залежить від способу завантаження, часу і умов зберігання, умов транспортування, біохімічних і фізико-механічних властивостей самого вантажу. При ущільненні вантажу зростає сила внутрішнього тертя і початковий опір зрушенню. Зростання початкового супротиву зрушення викликає утворення стійкого зводу. Як наслідок в нижніх шарах насипу відзначається велике стиснення і об'ємна щільність. В роботі [9] наводиться опис технічних рішень для рівномірного завантаження зерна, що зменшує його травмування. Причини травмування зерна та шляхи його зниження при механічній обробці представлені в роботах [10, 11]. У статті [12] обґрунтовується вплив робочих органів зернозбиральних комбайнів на пошкодження і якість насіння.

Збільшення висоти падіння зерна на бетонну основу силосу підвищує кількість битих та ушкоджених зернівок, які на початку завантаження

накопичуються у нижніх шарах зернового насипу. Встановлено, що збільшення висоти падіння зерна у 3 рази, призводить до підвищення кількості ушкоджених зернівок більше ніж у 8 разів [7, 13].

Заповнення силосів зерновим вантажем включає в себе три основні етапи: підйом зернового вантажу на задану висоту, транспортування зернового вантажу до завантажувальних отворів силосів, завантаження силосів зерном. На кожному із вказаних етапів зерно контактує із робочими органами і може ушкоджуватись. Так, при підйомі зернового вантажу норією НЗ–20 ушкодження зерна складає 2–5,6 % [14].

Травмоване зерно має більшу інтенсивність дихання. Даний показник у 1,8 рази перевищує значення не травмованого зерна [10]. На початку завантаження травмоване зерно накопичується в нижніх шарах зернового насипу, і в наслідок інтенсивного дихання відбувається значне виділення тепла і вологи. Це призводить до появи осередків самозігрівання і, як наслідок, до пошкодження або повної загибелі всієї партії зерна, що недопустимо. Під дією динамічних сил травмована маса в нижніх шарах більш ущільнюється, що негативно впливає на міцність травмованого і не травмованого зерна [15]. Крім того в нижніх шарах зерно під дією динамічних сил злежується. Також швидке гравітаційне завантаження силосів зерном впливає на його деформацію і характер ушкодження по всьому об'єму [16].

В роботах науковців [17, 18] наведено узагальнені результати з питань швидких гравітаційних потоків зернистих матеріалів у лотках, каналах та похилих площинах. Як вказується у дослідженнях [19, 20], гравітаційні потоки зернистих матеріалів супроводжуються ефектами сегрегації. При завантаженні силосів компактним струменем спостерігається сегрегація зернового насипу. Сегрегація суттєво впливає на динаміку руху зернового вантажу. Вплив сегрегації на якість зернової продукції як правило є негативним.

Сегрегація спостерігається, в основному, в процесі гравітаційного завантаження, де можна виділити дві ділянки ймовірного розшарування вантажу: ділянку вільного падіння, як відстань від завантажувального отвору до

поверхні насипу; ділянку формування насипу (рухливий поверхневий шар).

На ділянці вільного падіння сипучий вантаж ділиться на фракції, які в процесі завантаження ємності займають певні місця в її порожнині. Це є наслідком різної швидкості витання великих і дрібних частинок сипучого вантажу або частинок різної природи для багато компонентних сумішей. Ступінь розшарування залежить на цьому етапі від висоти падіння вантажу. Розшарування вантажу по фракціям істотно ускладнює його зберігання, вивантаження і, крім того, може значно погіршувати якість вантажу, особливо зернової маси. На ділянці формування насипу сегрегація відбувається за рахунок скочування більш важких частинок до стінок ємності силосу. Для запобігання розшарування засипаного вантажу необхідно забезпечити його рівномірний розподіл по всьому поперечному перерізу ємності силосу. Для багато компонентного вантажу, яким є наприклад комбікорм, сегрегація призводить до зміни співвідношення компонентів і після випуску склад може виявитися неприпустимим за якістю.

Отже, численними роботами дослідників встановлено шкідливість різних видів ушкоджень та травмування зерна. Через мікропошкодження і внутрішні тріщини збільшується дроблення і знижується вихід готової продукції. Через ушкодження оболонок полегшується доступ шкідників і патогенної мікрофлори до зернівки, відбувається її зараження бактеріями і грибами, заселення хлібними кліщами і комахами. У пошкодженого зерна різко зростає дихання, воно стає нестійким при зберіганні, швидко пліснявіє і самозігрівається. Також у пошкодженого зерна змінюється здатність до проростання, що безпосередньо негативно впливає на майбутній врожай.

1.3 Огляд, пристроїв, конструкцій та теоретичних моделей для обережного завантаження зернової маси у силоси

Для зменшення травмування зерна при його завантаженні у силоси використовують спеціальні завантажувальні пристрої [21]. Робочими органами можуть бути різноманітні за конструкцією конуси, пересипні полиці

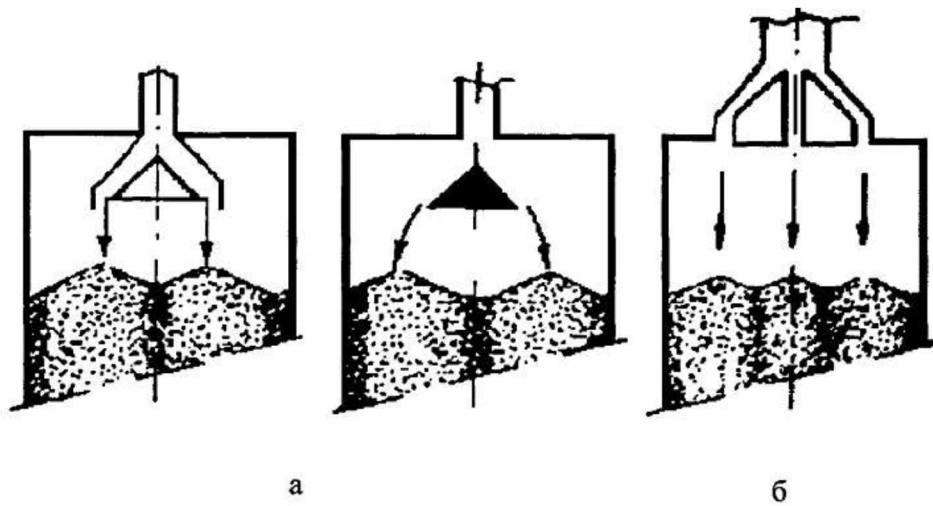
встановлені у телескопічній трубі, концентричні кільця з вертикально розміщеними лопатями, вертикальні гвинтові конвеєри з вікнами, нерухомі жолоби тощо.

Відзначимо три найпоширеніші способи заповнення кузовів транспортних засобів і сховищ різного призначення сипучими вантажами: завантаження струменем, дощем і каскадне завантаження. У кожного з цих способів є свої переваги і недоліки. Найбільш простим, але і не найкращим є завантаження компактною струменем або самопливом. При такому способі завантаження відзначається значне ущільнення в нижніх шарах насипаного зернового вантажу і сегрегація.

Якщо силос заповнювався за методом розкидання по типу дощу або душа (рис. 1.9), матеріал виявляється розподіленим по поперечному перерізі силосу з більш рівномірною щільністю. У разі розосередженого потоку (завантаження дощем), спостерігається більш рівномірне укладання частинок вантажу, що призводить до збільшення місткості ємності, зниження розшарування внаслідок відсутності насипу. В результаті на початку процесу випуску тиск на днище буде частково зменшуватися. В цьому випадку днище силосу не відчуває раптового додаткового тиску, і подальше зберігання зерна буде більш рівномірним. Одним з оптимальних способів заповнення ємності слід вважати такий, при якому вантаж якомога більш рівномірно розподіляється по поперечному перерізу ємності в процесі завантаження від початку до кінця.

Такий спосіб знижує сегрегацію, збільшує місткість ємності, зменшує ущільнення вантажу і таким чином сприяє більш тривалому його зберігання і стабілізації випуску з ємності. Він досить універсальний, але підходить переважно для ємностей малої глибини.

Для гравітаційної завантаження зернових вантажів і продуктів помелу без допоміжних пристроїв, тобто компактним струменем, застосовують стрічкові конвеєри в різному конструктивному виконанні (рис. 1.10). Вони можуть бути забезпечені додатковими пристроями (наприклад скребками), що забезпечують скидання вантажу зі стрічки в одну або кілька точок. Для очищення від твердих



а - заповнення розкиданням; б - заповнення в декількох точках

Рисунок 1.9 – Рівномірне заповнення ємності і розшарування вантажу

сторонніх домішок використовують пасивні відбивачі або кишені з гребінчастим уловлювачами (рис. 1.10, а). Завантаження за допомогою норії також здійснюється струменем, однак, не дивлячись на високу продуктивність, цей пристрій має обмежені функціональні можливості (рис. 1.10, б). Як завантажувач кузовів транспортних засобів, використовується завантажувальний рукав (рис. 1.10, в). Пристрій для завантаження силосних складів і різних транспортних і технологічних ємностей містить завантажувальний патрубков, в нижній частині якого закріплені дві труби, з гофрованими стінками (рис. 1.10, г). За допомогою пристрою на рисунку 1.10, д, можна робити транспортування зернового вантажу на велику відстань, пластикові циліндричні труби, з'єднані між собою хомутами з пропущеним через них тросом, розташовуються вертикально або похило. Це дозволяє здійснювати заповнення, наприклад, з верхньої частини бункера, силоса або будівлі. Гравітаційний спуск (рис. 1.10, е) містить складний гофрований жолоб. Він має заслінку, що закривається і привод. Вантаж, потрапляючи у жолоб, по мірі навантаження розтягує його. При досягненні дна ємності, від контакту відкривається заслінка і підйомом жолоба забезпечується звільнення від вантажу. Внаслідок малої висоти падіння виключається руйнування частинок зернового вантажу.

Як відмічається у дослідженнях [22, 23], для зменшення швидкості падіння зернового матеріалу під завантажувальною горловиною силосу необхідно встановити гравітаційний розподільник, який складається з пустотілого зрізаного конуса. Із завантажувальної горловини зерновий вантаж попадає на бокову поверхню конуса, при цьому відбувається зміна вертикальної швидкості матеріалу на швидкість під кутом до горизонту. В результаті, зерновий вантаж менше травмується і зменшується динамічне ущільнення насипу.

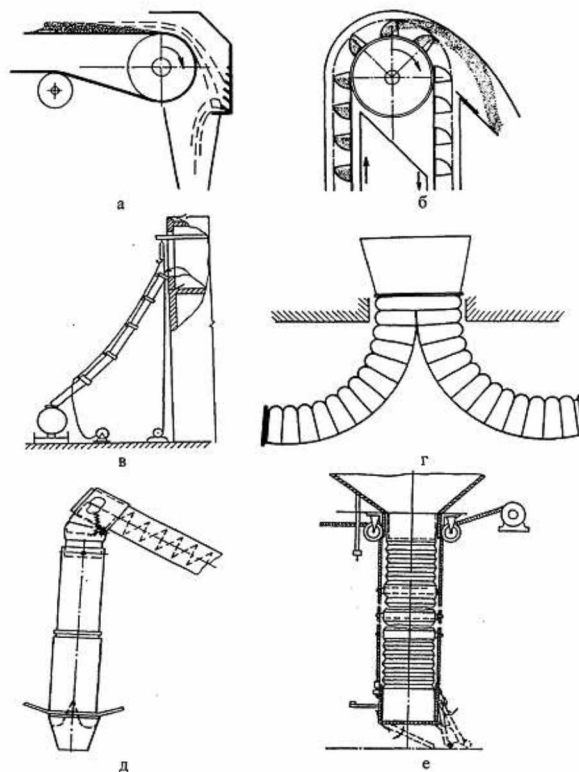


Рисунок 1.10 – Завантажувальні пристрої з концентрованим потоком

Пристрій (рис. 1.11, а) для розподілу сипучого вантажу має конус з отворами і обичайку з пазами, концентрично розміщену із зазором навколо основи конуса. При русі по конусу матеріал рівномірно розподіляється по його поверхні і частина його через отвори на поверхні конуса зсипається в ємність, а частина, досягнувши основи конуса, зсипається по периферії бункера. Завантажувальний пристрій (рис. 1.11, б) складається з завантажувального патрубку і закріпленого на ньому за допомогою хомута зі стійками складного

конуса. Конус має поздовжні вертикальні вирізи.

При завантаженні силосів з використанням конусних розподільників [6] спостерігається рівномірне розподілення зернового вантажу без утворення конусного насипу, що зменшує динамічне навантаження, сегрегацію, але травмування зерна все ж таки відбувається.

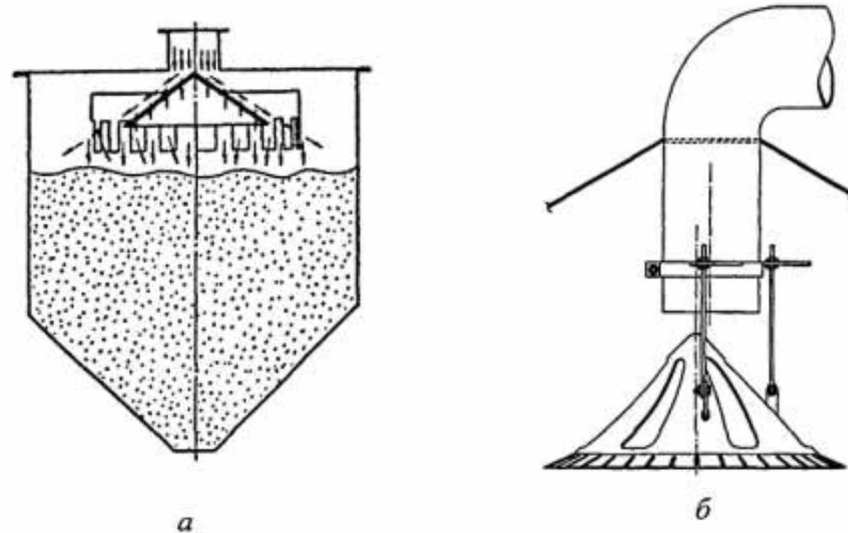


Рисунок 1.11 – Конусні розподільники

Механічні завантажувальні пристрої також отримали велике поширення (відцентрові дискові, роторні розкидачі). Але завантажувальні пристрої з гідравлічним приводом не знайшли широкого використання внаслідок труднощів, що виникають при виготовленні та експлуатації.

На рис. 1.12, б наведено пристрій, що складається з розподільного бункера, що має на бічній поверхні три ряди прямокутних вирізів. Вони розташовані в шаховому порядку і служать для розвантаження бункера. Із зовнішнього боку його дна встановлена, з можливістю обертання, вертикальна вісь, на якій під заданими в горизонтальній і вертикальних площинах кутами закріплені два ряди лопатей. Потрапляючи на лопаті, вантаж викликає обертання осі, чим досягається рівномірне розкидання його частинок на великій площі. Для завантаження стаціонарних і пересувних ємностей використовується завантажувальний пристрій, що містить обертовий на вертикальному валу диск і кільцевий обмежувач (рис. 1.12, в). Існують також

відцентрові розкидачі інших конструкцій (рис. 1.12, г), на вертикальному валу бункера горизонтально закріплені концентричні кільця з вертикально установленими лопатями. Подача вантажу в ємність здійснюється одночасно з обертанням пристрою. Для завантаження транспортних засобів може застосовуватися бункер з рухомою рамою, на якій рівномірно розташовані вертикальні лопатки (рис. 1.12, д). Зображений на рис. 1.12, е пристрій, що включає бункер з випускними воронками і вивантажувальними отворами, що перекриваються конусами, призначений для завантаження зерна і продуктів його переробки.

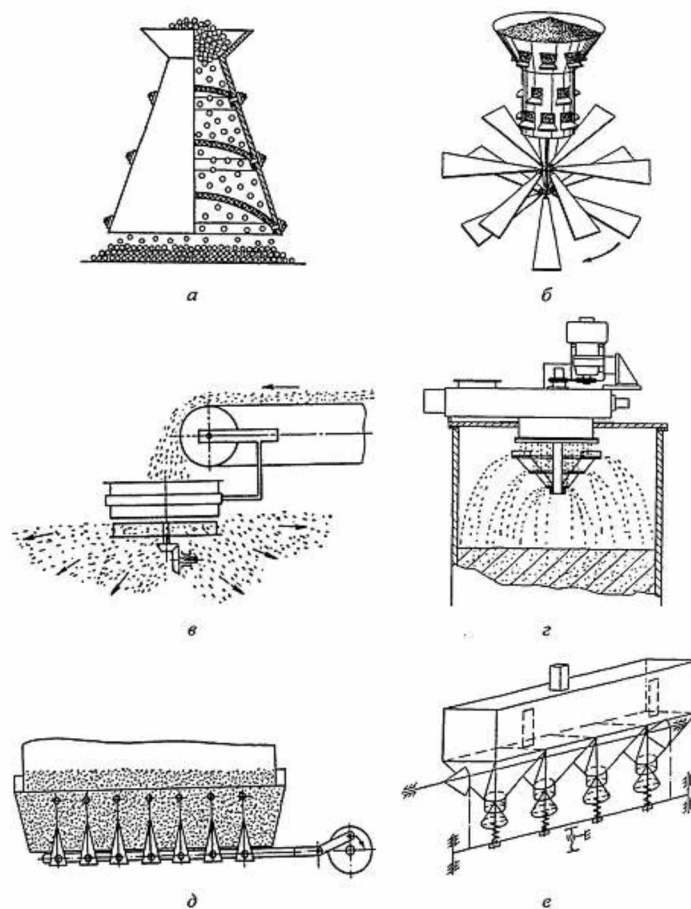


Рисунок 1.12 – Завантажувальні пристрої з розрідженим потоком

При завантаженні силосів із використанням телескопічних труб зерновий вантаж пересипається з однієї полиці на іншу, при цьому його швидкість постійно змінюється як за величиною так і за напрямом. Так, в роботі [22] розроблена теорія руху окремих зернівок і пороговий стан їх на похилих

площинах.

Варіантом подолання проблеми безударного завантаження силосів зерном є створення різноманітних каскадних пристроїв які зменшують висоту вільного падіння зерна на дно ємності. Каскадний спосіб завантаження силосу більш рівномірно розподіляє зерновий матеріал по всьому периметру ємності, за рахунок чого зменшується сегрегація, ущільнення і травмування зернівок. Як спосіб зниження швидкості, а, відповідно, і травмування гранульованих вантажів в силосах при завантаженні може застосовуватися трос з рядом амортизувальних елементів, встановлених поперек нього (рис. 1.13, а). Для перевантаження сипучих і кускових вантажів за допомогою стрічкових транспортерів використовується гравітаційний спуск (рис. 1.13, б). Він представляє собою зигзагоподібний жолоб з дном, виконаним по кривій. Навпроти вихідних ділянок кожної із ступенів спуску розміщені кармани, що гасять швидкість. Завдяки цьому швидкість великої фракції вантажу періодично гаситься, в той час як дрібні частинки рухаються безперервно. Для зменшення висоти вільного падіння матеріалу при завантаженні служить каскадний пристрій (рис. 1.13, в), що складається з похило розташованих патрубків, з'єднаних між собою перехідними колінами, що змінюють напрямок руху вантажу. Тим самим виконується зниження швидкості на цих ділянках.

Для підвищення рівня механізації навантажувальних робіт з легко пошкоджуваними вантажами може бути використаний пристрій, що складається з бункеру і завантажувального жолоба змінної довжини (рис. 1.13, г). З внутрішнього боку на ньому змонтовані в шаховому порядку похилі полки, на корпусі бункера закріплені барабани, на них намотуються стрічки, з яких складається завантажувальний жолоб. За допомогою представленого на рис. 1.13, д пристрою доцільно робити завантаження коренебульбоплодів. Падаючий з транспортера вантаж під дією сили тяжіння і інерції скочується по напрямних, виконаних у формі напівциліндрів з початковою швидкістю, яка визначається тільки вертикальною її складовою.

Під час завантаження силосів вертикальними гвинтовими конвеєрами

зерновий вантаж здійснює гвинтовий рух. В роботах [23, 24] проведені теоретичні дослідження руху зернівок по гвинтовій поверхні. Такий рух забезпечує обережне завантаження ємності зерном. Недоліком такого способу завантаження являється наявність в середині порожнини ємності громіздкої каскадної споруди.

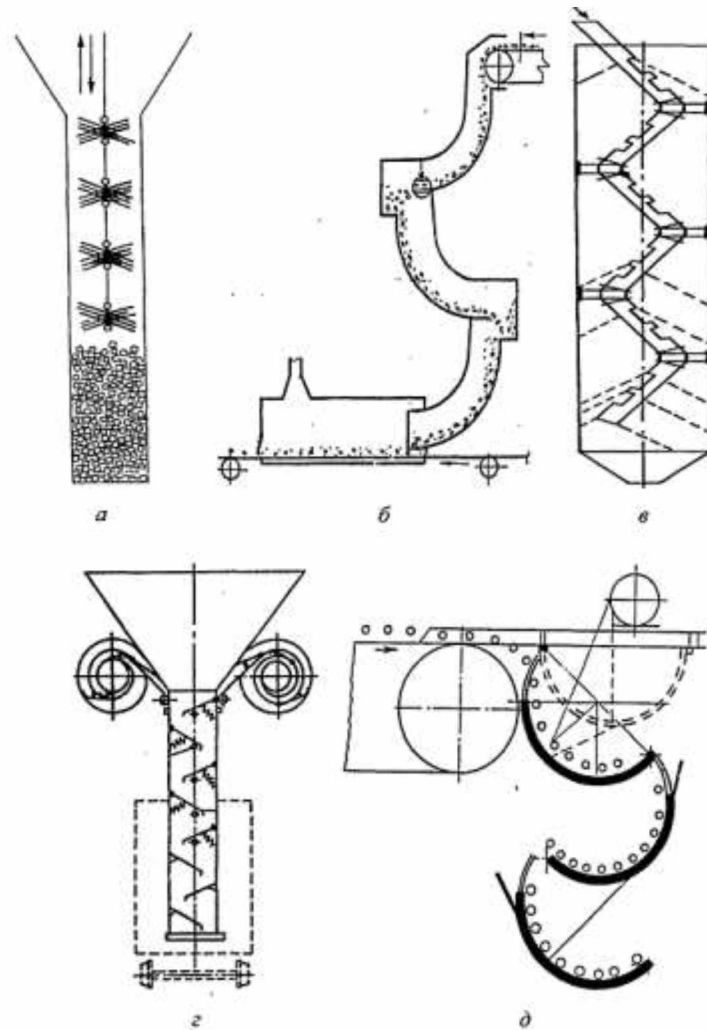


Рисунок 1.13 – Завантажувальні пристрої з каскадними спусками

Для завантаження ємностей сипким вантажем інколи використовують гофрований жолоб. Жолоб може по мірі наповнення розтягуватися, а при досягненні дна ємності відкривається його нижня заслінка і підйом жолоба забезпечує звільнення вантажу. Внаслідок малої висоти падіння зерна на дно силосу виключається ушкодження зернівок зернового вантажу. У роботі [20] описана механіка руху зернового потоку в круглих трубах.

Процесу руху зернового матеріалу в гравітаційних сепараторах

присвячена стаття [25], в якій розроблена теорія розвинутого зсувного потоку. В роботі вказується, що верхні шари матеріалу при русі можуть обганяти нижні шари і взаємодіяти з ними, обмінюючись між собою зернівками. На рисунку 1.14 показано пристрій, в якому спочатку відбувається гравітаційне завантаження до вершини насипу з матеріалу, що завантажується до приводного конусу з вертикальними перегородками, потім включається привід конуса. Продовжуючи надходити в бункер матеріал перегородками захвачується за допомогою обертального руху і під дією відцентрових сил відкидається до периферії, заповнюючи порожнечі силосу.

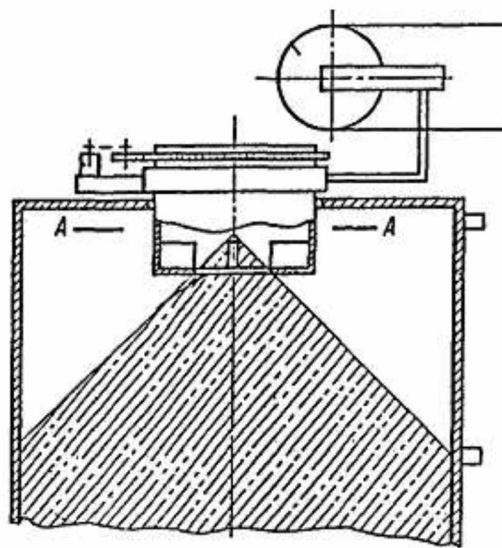


Рисунок 1.14 – Комбінований завантажувальний пристрій

В роботах [26, 27] наведено результати досліджень швидкого гравітаційним руху зернистого матеріалу по різним робочим органам. Але залишилися невирішеними питання, пов'язані із хаотичним переміщення матеріалу та значною лінійною швидкістю гравітаційних потоків. Рух зерна з високою швидкістю супроводжується активною взаємодією частинок між собою і робочим органом. Це негативно впливає на процес завантаження зерна та його довготривале зберігання.

З вище зазначених способів, каскадний спосіб завантаження є найбільш вдалим. Хоча потік зернового вантажу по шершавій поверхні характеризується суттєвою просторовою неоднорідністю [28, 29]. Дана неоднорідність зумовлює

у центральній частині зернового шару найбільшу концентрацію твердої фази та підвищений вміст крупного і щільного зерна. В той же час, на периферійних частинах потоку, які характеризуються підвищеним міжзерновим простором, має місце більш висока концентрація легких частинок.

Огляд існуючих теоретичних моделей механічного руху зерна

Значна увага науковців присвячена проблемі розробки фізико-математичних моделей руху зерна. Зокрема у дослідженнях [30, 31] розглянуто рух частинок сферичної форми по поверхнях сільськогосподарських машин та рух зерна по рухомим поверхням висівних машин відповідно. Зокрема в [30] наводяться залежності для визначення розміщення зерна, але не швидкості його руху. Аналітичні залежності у роботі [31] визначають траєкторію руху зерна по поверхні диска та швидкість обертання зернової маси, але не враховує його відхилень від правильної конічної форми.

У роботах [32, 33] представлено математичні моделі руху зерна у повітряному потоці та у циліндричному решеті, що обертається. Так у роботі [32] побудовано математичну модель руху часточки обчесаного вороху, яка встановлює залежність між швидкістю руху часточки і швидкістю повітряного потоку, але у неявному вигляді, що значно ускладнює знаходження реальної швидкості і потребує додаткових механіко-математичних досліджень. В той же час, модель у [33] представлена диференціальними рівняннями, що описують рух вороху по циліндричному решету, яке обертається навколо осі під кутом до горизонту. Модель представлена окремою обертальною та поступальною складовою руху в неявній формі і призначена перш за все для виявлення ефективного режиму роботи для очистки зерна. У статті [27] представлено чисельну модель потоку гранульованих матеріалів. Дана чисельна модель заснована на методах скінченних елементів і призначена для прогнозування полів напружень та швидкостей твердих частинок.

В цілому, розглянуті вище фізико-математичні моделі не описують швидкість руху зерна саме по спіральному відкритому жолобу зі змінними дискретними кутами нахилу розгінної і гальмівної ділянок.

Загальна класифікація завантажувальних пристроїв

Завантажувальні пристрої сипучих вантажів можна класифікувати (рис. 1.15) за п'ятьма ознаками: по об'єкту завантаження; по виду

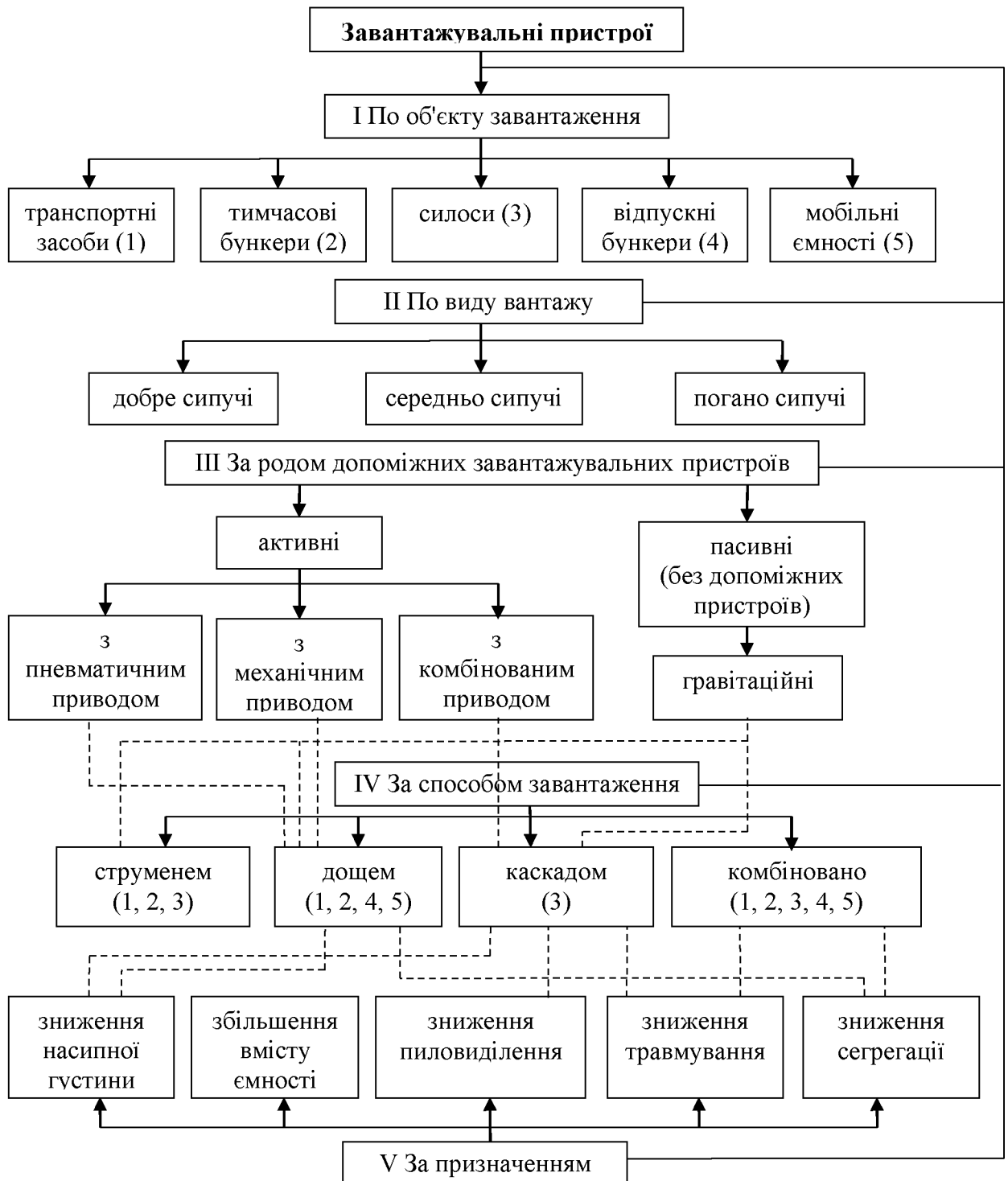


Рисунок 1.15 – Загальна класифікація завантажувальних пристроїв

вантажу; за родом допоміжних завантажувальних пристроїв; за способом завантаження; за призначенням.

Проведений аналіз конструктивних схем завантажувальних пристроїв та існуючих моделей механічного руху зерна дозволяє зробити висновок про те, що чим вище їх ефективність при забезпеченні якісних параметрів завантаження, тим складніше вони у виготовленні і експлуатації. Ряд пристосувань, крім того, покращуючи деякі характеристики, негативно впливають на інші.

Висновки по розділу

Незважаючи на значну кількість наукових досліджень, присвячених питанням травмування зерна під час його завантаження у силос, проблема досі залишається актуальною і не до кінця вирішеною. Існуючі технічні пристрої і засоби завантаження силосів зерновим матеріалом, а також наявні теоретичні аналітичні моделі та практичні дослідження, не в повній мірі задовольняють потреби виробництва. Зокрема, у розглянутих вище пристроях, методах та підходах науковців недостатньо освітлена проблема регулювання, контролю та зменшення швидкості руху зерна під час виконання операції його завантаження у силоси. Нагальною залишається проблема травмування зерна. Це, у свою чергу, зумовлює необхідність розробки гравітаційного завантажувача з іншим принципом роботи та відповідним теоретичним обґрунтування руху зернового матеріалу в ньому.

Дані дослідження нами розпочаті у роботі [34], де було встановлено зв'язок між кутами ділянок спускного прямого каналу з наведенням функціональної залежності між ними для прямолінійного руху зерна. В дослідженні [35] розглянуто гвинтовий канал з одним незмінним кутом нахилу спіралей.

2. МЕТОДИКА Й ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Система сил, діючих на елементарний об'єм зернового потоку у відкритому гвинтовому каналі

Дослідження швидкості руху зерна проводиться для відкритого гвинтового каналу, що має розгінну та гальмівну ділянки із відповідними змінними кутами нахилу. Дана модель ґрунтується на системі сил, діючих на елементарний об'єм зернового потоку у гвинтовому каналі, у циліндричній системі координат (рис. 2.1). Розглянемо ці сили більш детально.

Гравітаційне переміщення зернової маси по гвинтовому каналу відбувається під впливом рушійної сили $\vec{F}_{руш} = m\vec{a}$, що визначається з балансу сил, діючих на окреслену рухому масу:

$$\vec{F}_{руш} = \sum \vec{F}_k \text{ або } m\vec{a} = \sum \vec{F}_k, \quad (2.1)$$

де $\sum \vec{F}_k$ – сума всіх сил, що діють на певну масу зернового потоку у гвинтовому каналу.

Із врахуванням обертально-поступального характеру руху зерна у гвинтовому каналі баланс сил у векторній формі буде мати наступний вигляд:

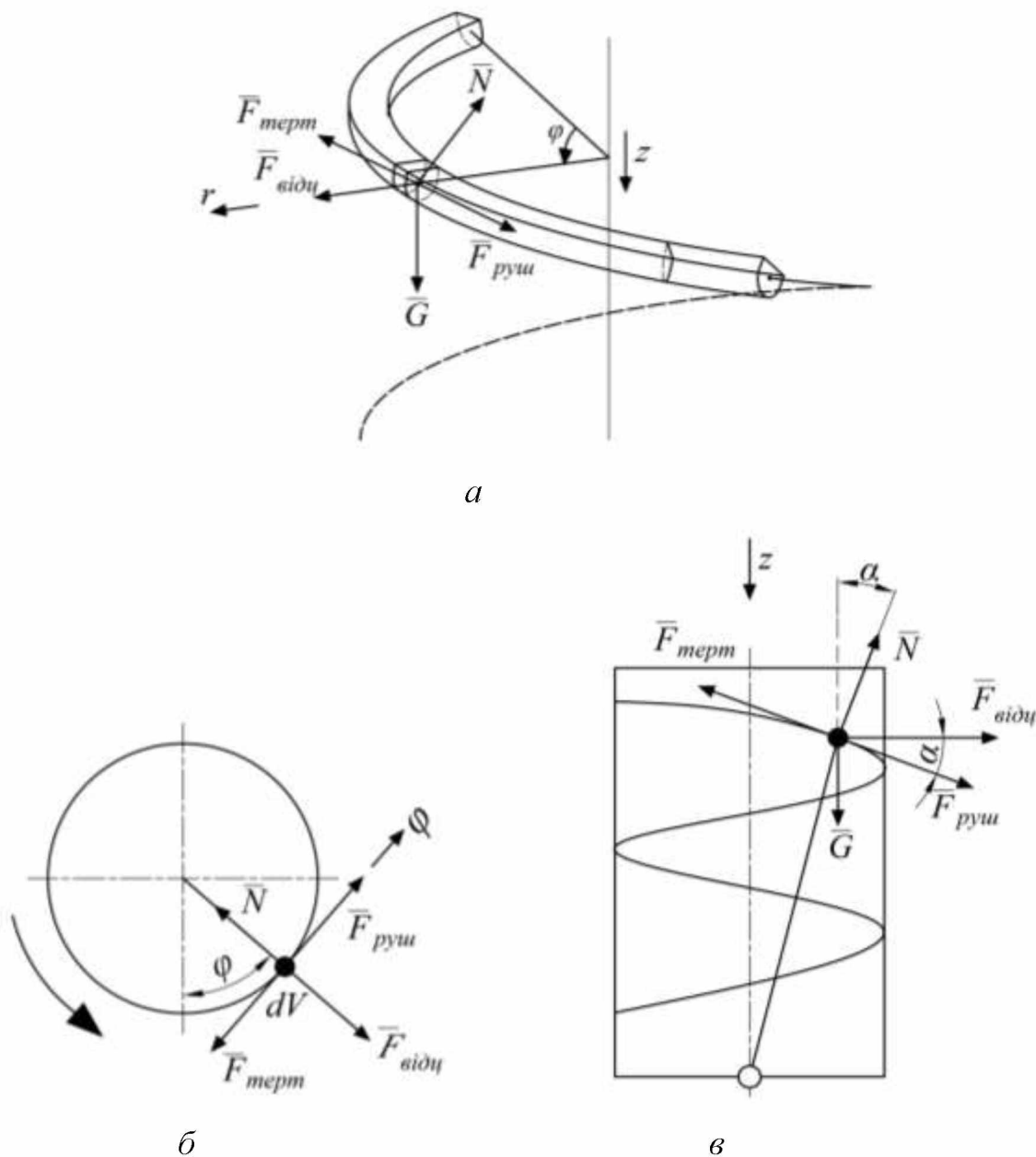
$$m\vec{a} = \vec{F}_{терп} + \vec{F}_{відц} + \vec{N} + \vec{G}, \quad (2.2)$$

де $\vec{F}_{терп}$ – сила тертя зернового потоку об поверхню гвинтового каналу; $\vec{F}_{відц}$ – відцентрова сила, що діє на зерновий потік при обертальному русі зернового потоку навколо центральної осі гвинтового каналу; \vec{N} – сила нормальної реакції поверхні гвинтового каналу; \vec{G} – сила гравітаційного тяжіння.

Здійснюючи проектування усіх складових на відповідні напрямки циліндричної системи координат, баланс сил може бути представлений у вигляді наступної системи сил проєкцій:

$$\begin{cases} ma_r = F_{відц}^r - N^r, \\ ma_\varphi = -F_{терп}^\varphi + N^\varphi, \\ ma_z = -F_{терп}^z - N^z + G^z, \end{cases} \quad (2.3)$$

де a_r, a_φ, a_z – проекції прискорення зернової маси m за радіальним, кутовим та висотним напрямком циліндричної системи координат; $F^r_{відц}, N^r$ – проекції відцентрової сили та нормальної сили реакції опори за радіальним напрямком; $F^\varphi_{терт}, N^\varphi$ – проекції сили тертя та нормальної сили реакції опори за кутовим напрямком; $F^z_{терт}, N^z, G^z$ – проекції сили тертя, нормальної сили реакції опори та сили гравітаційного тяжіння за висотним напрямком.



a – у просторовому відображенні; $б$ – у горизонтальному відображенні;
 $в$ – у вертикальному

Рис. 2.1 – Система сил, діючих на елементарний об'єм зернового потоку у гвинтовому каналі, у циліндричній системі координат

2.2. Обґрунтування теоретичної моделі швидкості руху зерна у відкритому гвинтовому каналі

Проекції вектору прискорення \vec{a} у системі (2.3) за кожним із напрямків циліндричної системи координат, з урахуванням відсутності руху зернової маси у радіальному напрямку, можна визначити з виразів:

$$\begin{cases} a_r = 0, \\ a_\varphi = r \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2 \frac{dr}{dt} \frac{d\varphi}{dt}, \\ a_z = \frac{d^2z}{dt^2}. \end{cases} \quad (2.4)$$

Так як переміщення зернової маси у радіальному напрямку відсутнє, то координата r приймає стале значення, а складова $\frac{dr}{dt}$ у системі рівнянь (2.4) нівелюється і дана система приймає наступний вигляд:

$$\begin{cases} a_r = 0, \\ a_\varphi = r \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2}, \\ a_z = \frac{d^2z}{dt^2}. \end{cases} \quad (2.5)$$

Беручи до уваги нульове радіальне прискорення $a_r=0$, система рівнянь (2.3) дещо спрощується:

$$\begin{cases} F_{\text{відц}}^r = N^r, \\ ma_\varphi = -F_{\text{мерт}}^\varphi + N^\varphi, \\ mv_z = -F_{\text{мерт}}^z - N^z + G^z. \end{cases} \quad (2.6)$$

Відцентрова сила, що діє на зернову масу при її обертанні навколо осі гвинтового каналу, визначається з виразу:

$$F_{\text{відц}} = mr\omega^2, \quad (2.7)$$

де r – відстань від осі гвинтового каналу до центру ваги зернової маси;
 ω – кутова швидкість обертання зернової маси.

Сила тертя $F_{\text{терт}}$:

$$F_{\text{терт}} = \mu \cdot N, \quad (2.8)$$

де μ – коефіцієнт тертя зерна об поверхню гвинтового каналу, N – сила нормальної реакції опори.

З урахуванням залежностей (2.7) та (2.8) система рівнянь (2.6) приймає наступний вигляд:

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ ma_\varphi = -\mu N^\phi \cos \alpha + N^\phi, \\ ma_z = -\mu N^z \sin \alpha - N^z + mg. \end{cases} \quad (2.9)$$

Після виділення спільних множників та їх групування система (2.9) набуде вигляду:

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ ma_\varphi = N^\varphi (1 - \mu \cos \alpha), \\ mv_z = mg - N^z (1 + \mu \sin \alpha). \end{cases} \quad (2.10)$$

Проекції сили нормальної реакції опори N_φ та N_z можуть бути знайдені шляхом їхнього проектування на напрямок дії сили гравітаційного тяжіння (рис. 2.1):

$$\begin{cases} N_\varphi = G \sin \alpha, \\ N_z = G \cos \alpha, \end{cases} \quad \text{або} \quad \begin{cases} N_\varphi = mg \sin \alpha, \\ N_z = mg \cos \alpha, \end{cases} \quad (2.11)$$

де α – кут нахилу гвинтової лінії на певній ділянці гравітаційного каналу.

З урахуванням виразів (2.11), система (2.10) набуває наступного вигляду:

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ ma_\varphi = (1 - \mu \cos \alpha) \cdot mg \cdot \sin \alpha, \\ ma_z = mg - (1 + \mu \sin \alpha) \cdot mg \cdot \cos \alpha. \end{cases} \quad (2.12)$$

Після скорочень та тригонометричних перетворень маємо:

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ a_\varphi = g \cdot (\sin \alpha - 0.5 \cdot \mu \sin 2\alpha), \\ a_z = g(1 - \cos \alpha - 0.5 \mu \sin 2\alpha). \end{cases} \quad (2.13)$$

Проводячи заміну проєкцій прискорень a_φ та a_z їх виразами з системи рівнянь (2.5), система (2.13) формується таким чином:

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ r \frac{d^2\varphi}{dt^2} = g(\sin\alpha - 0.5 \cdot \mu \sin 2\alpha), \\ \frac{d^2z}{dt^2} = g(1 - \cos\alpha - 0.5\mu \sin 2\alpha). \end{cases} \quad (2.14)$$

Приведемо наступну заміну:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{1}{r} g(\sin\alpha - 0.5 \cdot \mu \sin 2\alpha), \\ K_2 &= g(1 - \cos\alpha - 0.5\mu \sin 2\alpha). \end{aligned} \quad (2.15)$$

Тим самим система (2.13) приводиться до наступного вигляду:

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ \frac{d^2\varphi}{dt^2} = K_1, \\ \frac{d^2z}{dt^2} = K_2. \end{cases} \quad (2.16)$$

Для пошуку аналітичного вирішення складеної системи диференціальних рівнянь, проведемо подвійне інтегрування:

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ \frac{d\varphi}{dt} = K_1 t + C_1, \\ \frac{dz}{dt} = K_2 t + C_3, \end{cases} \quad (2.17)$$

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ \varphi = 0.5 K_1 t^2 + C_1 t + C_2, \\ z = 0.5 K_2 t^2 + C_3 t + C_4. \end{cases} \quad (2.18)$$

Отримані сталі інтегрування C_1 , C_2 , C_3 , C_4 можуть бути знайдені, заданням відповідних граничних умов.

Загальний пройдений шлях зерною масою по гвинтовому каналу, з

урахуванням характеру зміни координат φ та z відповідно до системи рівнянь (18), можна знайти з виразу:

$$l = \sqrt{(r \cdot \varphi)^2 + z^2}. \quad (2.19)$$

Швидкість V переміщення зернової маси, з урахуванням $V = \frac{d\ell}{dt}$, визначається:

$$V = \frac{r^2 \varphi(t) \frac{d}{dt} \varphi(t) + z(t) \frac{d}{dt} z(t)}{\sqrt{r^2 (\varphi(t))^2 + (z(t))^2}}. \quad (2.20)$$

Якщо гвинтовий пристрій має єдиний кут нахилу спіралі α , то канал не має гальмівної ділянки і зернова маса постійно збільшує свою швидкість. Тобто відповідно до (20) маємо швидкість руху зерна для розгінної ділянки:

$$V = \frac{r^2 \varphi^p(t) \frac{d}{dt} \varphi^p(t) + z^p(t) \frac{d}{dt} z^p(t)}{\sqrt{r^2 (\varphi^p(t))^2 + (z^p(t))^2}}. \quad (2.21)$$

Для запобігання травмування зерна необхідно, щоб швидкість руху маси зерна істотно не зростала. Для цього наведену теоретичну гвинтову установку (рис. 2.1) доцільно удосконалити і умовно розділити на розгінну та гальмівну ділянки, з довжинами спіралей l_p та l_Γ і кутами їх нахилу до горизонту α та β відповідно. Тобто швидкість зерна наприкінці розгінної ділянки буде максимальною V_{max} . При цьому остаточна швидкість зерна в кінці гальмівної ділянки повинна бути якомога меншою, але бути не меншою ніж стартова швидкість зернової маси на розгінній ділянці, $V_{ноч} \leq V_{кін}$ [34]. Остання умова забезпечує проходження зерна без його згруження на будь-якій ділянці пристрою. Для проведення подальшого дослідження будемо вважати, що ці швидкості рівні між собою $V_{ноч} = V_{кін} = V_0$ [34].

Нехай V_0 – швидкість, яку зерно набуває під дією сили гравітації падаючи з отвору бункера, що розташований на висоті h_0 від краю каналу розгінної ділянки. В момент падіння зерна з воронки бункера на початок жолобу відбувається перехід його потенціальної енергії в кінетичну, в результаті чого

зерно набуває швидкості V_0 . Згідно закону збереження енергії $mgh_0 = \frac{mV_0^2}{2}$

[34]. Отже, початкова швидкість зерна:

$$V_0 = \sqrt{2gh_0}. \quad (2.22)$$

Подальше дослідження швидкості руху зерна потребує відшукування математичної залежності між дискретно змінними кутами α та β нахилу спіралей гвинтового каналу до горизонту.

2.3. Знаходження співвідношення між кутами нахилу спіралей розгінної і гальмівної ділянок гвинтового каналу

Для виведення формули, що визначає математичне співвідношення між кутами нахилу розгінної та гальмівної ділянки α і β , відповідно до умови $V_{поч} = V_{кін} = V_0$, скористаємось результатами наших попередніх досліджень [34] для прямих розгінних та гальмівних ділянок. Крім сили тертя, реакції опори та сили тяжіння також врахуємо дію на зерно відцентрової сили з прискоренням $a = \frac{V^2}{r}$ під час його руху по гвинтовій лінії. Відповідно до закону збереження енергії отримаємо і розв'яжемо систему рівнянь, що описує перетворення кінетичної та потенціальної енергії зернового потоку на розгінній та гальмівній ділянці циліндричної спіралі:

$$\begin{cases} mgh_0 = \frac{mV_0^2}{2}, \\ \frac{mV_0^2}{2} + mgl_p \sin \alpha - \mu m \left(g + \frac{V^2}{r} \right) l_p \cos \alpha = \frac{mV_{\max}^2}{2}, \\ \frac{mV_{\max}^2}{2} + mgl_r \sin \beta - \mu m \left(g + \frac{V^2}{r} \right) l_r \cos \beta = \frac{mV_0^2}{2}. \end{cases} \quad (2.23)$$

Прирівнявши друге і третє рівняння системи (2.23) та спростивши вираз отримаємо:

$$\frac{mV_0^2}{2} + mgl_p \sin \alpha - \mu m \left(g + \frac{V^2}{r} \right) l_p \cos \alpha + mgl_r \sin \beta - \mu m \left(g + \frac{V^2}{r} \right) l_r \cos \beta = \frac{mV_0^2}{2},$$

$$mgl_p \sin \alpha - \mu m \left(g + \frac{V^2}{r} \right) l_p \cos \alpha + mgl_r \sin \beta - \mu m \left(g + \frac{V^2}{r} \right) l_r \cos \beta = 0,$$

$$l_p \sin \alpha - \mu \left(1 + \frac{V^2}{rg} \right) l_p \cos \alpha + l_r \sin \beta - \mu \left(1 + \frac{V^2}{rg} \right) l_r \cos \beta = 0. \quad (2.24)$$

Для спрощення подальшого розв'язку (2.24) прийнемо довжини розгінної та гальмівної ділянки однаковими, тобто $l_p = l_r$:

$$\sin \alpha - \mu \left(1 + \frac{V^2}{rg} \right) \cos \alpha + \sin \beta - \mu \cos \beta = 0. \quad (2.25)$$

З рівняння (25) маємо:

$$\sin \alpha + \sin \beta = \mu \left(1 + \frac{V^2}{rg} \right) \cos \alpha + \mu \left(1 + \frac{V^2}{rg} \right) \cos \beta,$$

$$\sin \frac{\alpha + \beta}{2} = \mu \left(1 + \frac{V^2}{rg} \right) \cos \frac{\alpha + \beta}{2},$$

$$\beta = 2 \arctg \mu \left(1 + \frac{V^2}{rg} \right) - \alpha. \quad (26)$$

Для спрощення (2.26) покладемо швидкість руху зерна V , яка безпосередньо впливає на відцентрове прискорення, рівною V_0 :

$$V = V_0 \rightarrow V^2 = V_0^2 = 2gh_0. \quad (2.27)$$

З (2.26) враховуючи (2.27) остаточно маємо залежність між кутами розгінної та гальмівної ділянки:

$$\beta = 2 \arctg \mu \left(1 + \frac{2h_0}{r} \right) - \alpha. \quad (2.28)$$

2.4. Дослідження параметрів аналітичної моделі швидкості руху зерна у відкритому гвинтовому каналі із двома змінними кутами нахилу

Враховуючи (2.28) та результати досліджень [36] запишемо коефіцієнти розгінної ділянки (2.15) для гальмівної частини спіралі з кутом нахилу β :

$$K_1^r = \frac{1}{r} g (\sin \beta - 0.5 \cdot \mu \sin 2\beta),$$

$$K_2^r = g (1 - \cos \beta - 0.5 \mu \sin 2\beta),$$

або

$$\begin{aligned} K_1^r &= \frac{1}{r} g \left(\sin \left(2 \arctg \mu \left(1 + \frac{2h_0}{r} \right) - \alpha \right) - 0.5 \cdot \mu \sin 2 \left(2 \arctg \mu \left(1 + \frac{2h_0}{r} \right) - \alpha \right) \right), \\ K_2^r &= g \left(1 - \cos \left(2 \arctg \mu \left(1 + \frac{2h_0}{r} \right) - \alpha \right) - 0.5 \mu \sin 2 \left(2 \arctg \mu \left(1 + \frac{2h_0}{r} \right) - \alpha \right) \right). \end{aligned} \quad (2.29)$$

Враховуючи (2.29) перепишемо систему (2.18) для гальмівної ділянки у вигляді:

$$\begin{cases} N^r = mr\omega^2, \\ \varphi^r = 0.5K_1^r t^2 + C_1 t + C_2, \\ z^r = 0.5K_2^r t^2 + C_3 t + C_4. \end{cases} \quad (2.30)$$

Знаючи (30) з (20) отримаємо рівняння швидкості зернової маси для гальмівної ділянки гвинтового каналу:

$$v^r = \frac{r^2 \varphi^r(t) \frac{d}{dt} \varphi^r(t) + z^r(t) \frac{d}{dt} z^r(t)}{\sqrt{r^2 (\varphi^r(t))^2 + (z^r(t))^2}}. \quad (2.31)$$

Для подальшого розв'язку врахуємо наступні факти:

– на розгінній ділянці швидкість зерна зростає з V_0 до V_{max} за проміжок час $[0; t_p]$;

– на гальмівній ділянці швидкість починає зменшуватись і за проміжок часу $(t_p; t_{max}]$ спадає до V_0 .

Для знаходження рівняння, яке б визначало миттєву швидкість руху зерна в будь-який момент часу на обох ділянках потрібно визначити час t_p . За цей час зерно переходить із розгінної до гальмівної частини, а швидкість досягає максимального значення.

Знаючи крок розгінної ділянки гвинтової лінії S та кількість її витків n_p з кутом їх нахилу α відшукаємо спочатку висоту h_p цієї ділянки.

Для цього знайдемо довжину витка та довжину розгінної ділянки l_p в цілому:

$$S = \pi dtg\alpha = 2\pi rtg\alpha,$$

$$l_0 = \sqrt{(2\pi r)^2 + S^2} = \sqrt{4\pi^2 r^2 + (2\pi rtg\alpha)^2} = \sqrt{4\pi^2 r^2 + 4\pi^2 r^2 tg^2\alpha} = 2\pi r\sqrt{1 + tg^2\alpha},$$

$$l_p = n_p l_0 = n_p 2\pi r\sqrt{1 + tg^2\alpha}. \quad (2.32)$$

З іншого боку, визначивши крок витка гвинтової спіралі отримаємо:

$$S = \frac{h_p}{n_p},$$

$$l_0 = \sqrt{(2\pi r)^2 + \left(\frac{h_p}{n_p}\right)^2} = \sqrt{4\pi^2 r^2 + \left(\frac{h_p}{n_p}\right)^2},$$

$$l_p = n_p l_0 = n_p \sqrt{4\pi^2 r^2 + \frac{h_p^2}{n_p^2}} = \sqrt{4\pi^2 r^2 n_p^2 + h_p^2}. \quad (2.33)$$

Знайдемо h_p прирівнявши праві сторони рівнянь (2.32) і (2.33):

$$2n_p \pi r \sqrt{1 + tg^2\alpha} = \sqrt{4\pi^2 r^2 n_p^2 + h_p^2},$$

$$h_p = 2n_p \pi r tg\alpha.$$

Знаючи h_p знайдемо час проходження зерна по розгінній ділянці t_p , для цього використаємо рівняння $z(t)$ системи (2.18), прирівнявши $z=h_p$:

$$z = h_p = 0.5K_2 t^2 + C_3 t + C_4,$$

$$K_2 t^2 + 2C_3 t + 2C_4 - 2h_p = 0,$$

$$t_{1,2} = \frac{-2C_3 \pm 2\sqrt{C_3^2 - 2K_2(C_4 - h_p)}}{2K_2},$$

$$t_p = \frac{-C_3 + \sqrt{C_3^2 - 2K_2(C_4 - 2n_p \pi r tg\alpha)}}{K_2}. \quad (2.34)$$

Довжина спіралі пристрою складається з однакових довжин розгінної та гальмівної ділянок. З (2.19) знайдемо загальну довжину гвинтової спіралі відповідно до цих ділянок:

$$l = l_p + l_r = \sqrt{(r \cdot \varphi)^2 + z^2} = \frac{1}{2} \sqrt{(r \cdot \varphi^p)^2 + (z^p)^2} + \frac{1}{2} \sqrt{(r \cdot \varphi^r)^2 + (z^r)^2}. \quad (2.35)$$

Запишемо узагальнену формулу швидкості переміщення $V = \frac{dl}{dt}$:

$$V = \left(\frac{1}{2} \sqrt{(r \cdot \varphi^p)^2 + (z^p)^2} + \frac{1}{2} \sqrt{(r \cdot \varphi^r)^2 + (z^r)^2} \right)'$$

Враховуючи спадання швидкості на гальмівній ділянці гвинтової спіралі отримаємо:

$$V = \frac{r^2 \varphi^p(t) \frac{d}{dt} \varphi^p(t) + z^p(t) \frac{d}{dt} z^p(t)}{2 \sqrt{r^2 (\varphi^p(t))^2 + (z^p(t))^2}} - \frac{r^2 \varphi^r(t) \frac{d}{dt} \varphi^r(t) + z^r(t) \frac{d}{dt} z^r(t)}{2 \sqrt{r^2 (\varphi^r(t))^2 + (z^r(t))^2}}. \quad (2.36)$$

Приймаючи рівність довжин розгінної та гальмівної ділянок $l_p = l_r$, аналогічно до (2.32)–(2.34) визначаємо кількість витків гальмівної ділянки n_r , час її проходження зерном t_r та час t_{max} :

$$n_r = \frac{l_p}{2\pi r \sqrt{1 + tg^2 \beta}}, \quad (2.37)$$

$$t_r = \frac{-C_3 + \sqrt{C_3^2 - 2K_2^r (C_4 - 2n_r \pi r t g \beta)}}{K_2^r}. \quad (2.38)$$

$$t_{max} = t_p + t_r. \quad (2.39)$$

Враховуючи співвідношення (2.18), (2.21), (2.22), (2.28)–(2.31), (2.34)–(2.39) остаточно отримуємо шукану модель швидкості руху зерна по гвинтовому каналу у вигляді системи рівнянь:

$$V = \begin{cases} \sqrt{2gh_0}, & \text{npu } t = 0, \\ \frac{r^2 \varphi^p(t) \frac{d}{dt} \varphi^p(t) + z^p(t) \frac{d}{dt} z^p(t)}{2 \sqrt{r^2 (\varphi^p(t))^2 + (z^p(t))^2}}, & \text{npu } t \in (0; t_p], \\ \frac{r^2 \varphi^p(t_p) \frac{d}{dt} \varphi^p(t_p) + z^p(t_p) \frac{d}{dt} z^p(t_p)}{2 \sqrt{r^2 (\varphi^p(t_p))^2 + (z^p(t_p))^2}} - \\ \frac{r^2 \varphi^r(t - t_p) \frac{d}{dt} \varphi^r(t - t_p) + z^r(t - t_p) \frac{d}{dt} z^r(t - t_p)}{2 \sqrt{r^2 (\varphi^r(t - t_p))^2 + (z^r(t - t_p))^2}}, & \text{npu } t \in (t_p; t_{max}), \\ \sqrt{2gh_0}, & \text{npu } t = t_{max}. \end{cases} \quad (2.40)$$

Початкова швидкість зерна на початку розгінної ділянки у другому та третьому рівняннях моделі (2.40) враховується у (2.18) за допомогою початкових умов $C_1 \dots C_4$. Аналогічні початкові умови для руху по гальмівній ділянці визначаються із (2.30) і залежать від максимальної швидкості V_{max} , що набуває зерно наприкінці розгінної ділянки.

Висновки по розділу

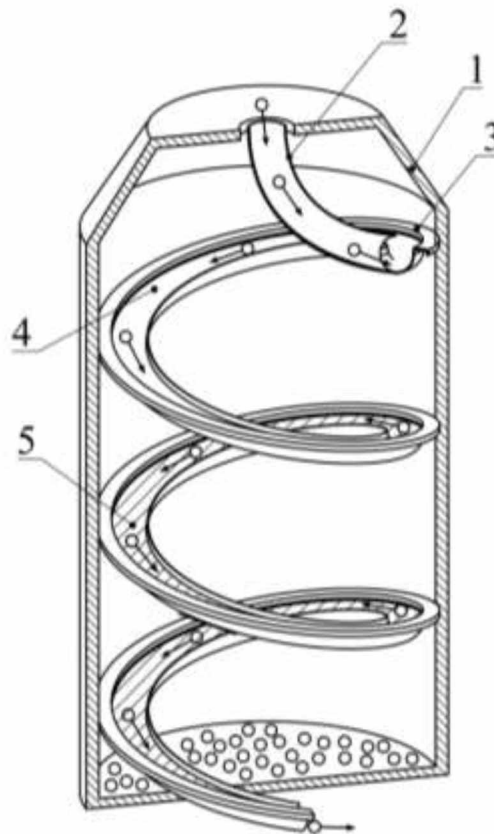
Запропонована теоретична модель враховує радіус та висоту силосу, кути нахилу розгінної та гальмівної ділянок гвинтового жолоба, кількість витків спіралей, початкову швидкість, а також коефіцієнт тертя-ковзання між зерном та поверхнею жолоба.

Представлена аналітична модель визначає швидкість руху зерна у будь-який момент часу як по розгінній так і по гальмівній частині гвинтового пристрою із дискретно змінними двома кутами нахилу спіралей. Контроль швидкості зерна здійснюється за допомогою регулювання цих кутів та вибору матеріалу поверхні жолоба з відповідним коефіцієнтом тертя.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Технічний опис периферійного відкритого гвинтового завантажувального пристрою із двома змінними кутами нахилу розгінної і гальмівної ділянок

На основі вище наведеної моделі, для зменшення травмування зерна був запропонований периферійний відкритий гвинтовий завантажувальний пристрій (ПВГК) зі змінними кутами спуску (рис. 3.1). Завантажувальний пристрій складається із розгінної і гвинтової гальмівної ділянок, які встановлюються під різним кутом до горизонту. ПВГК кріпиться на внутрішній частині силосу з можливістю регулювання кутів спуску. По мірі заповнення силосу зерном засипається у відкритий гвинтовий канал.



1 - циліндрична ємність; 2 – завантажувальний патрубок; 3 – периферійний відкритий гвинтовий канал; 4 – розгінна ділянка; 5 – гальмівна ділянка

Рисунок 3.1 – Силос із периферійним відкритим гвинтовим каналом

Силос із ПВГК (рис. 3.1) складається з циліндричної ємності 1, завантажувального отвору 2, периферійного відкритого гвинтового каналу 3 з дискретно змінними кутами нахилу. Завантажувальний патрубок 2 спрямовує зерновий матеріал з верхньої частини силосу до ПВГК. Тіло гвинтового каналу 3 утворено шляхом повертання U- подібного профілю за гвинтовою лінією зі змінними кутами на розгінній 4 і гальмівній 5 ділянках пристрою.

Представлений гвинтовий пристрій враховує відомі теоретичні та експериментальні дослідження науковців та спирається на проведене моделювання швидкості руху зерна у гвинтовому каналі зі змінним кутом нахилу.

3.2 Дослідження геометричних параметрів гвинтового каналу та кінематичних параметрів руху зерна

Збільшення швидкості у верхній частині пристрою обумовлено потребою убезпечити утворення накопичення зерна на розгінній ділянці та не пересипання його через краї відкритого зернового каналу. Така комбінація забезпечує суттєвий приріст швидкості зернового вантажу на першій ділянці ПВГК. Розгінна ділянка 4 ПВГК (рис. 3.1) повинна мати якомога більший кут нахилу α до горизонту, а гальмівна ділянка 5 з кутом нахилу β , повинна бути дещо меншою від кута α . Обґрунтування співвідношення даних кутів слідує із формул (2.23)–(2.26) та (2.28).

Водночас зменшення кута нахилу з α на β при переході з однієї ділянки пристрою на іншу дає можливість суттєво зменшити швидкість гравітаційного спуску. Зменшення швидкості запобігає виникненню критичних ударних сил зернинок об стіну та бетонне дно силосу, що в свою чергу зменшує або повністю усуває його механічне травмування.

Для оптимального вибору кутів потрібно враховувати коефіцієнт тертя μ зерна по поверхні жолобу ПВГК. Крім того, виникають об'єктивні труднощі, щодо визначення оптимального співвідношення кутів розгінної та гальмівної ділянок для різних зернових культур. Для забезпечення стаціонарного потоку

зернової маси по гвинтовій поверхні пристрою потрібно враховувати кут природного відкосу зерна, що залежить від сорту зернової культури.

Кут нахилу гальмівної ділянки β повинен бути більшим від кута тертя зерна сільськогосподарської культури ξ [17], яке завантажується у силос. Ця умова забезпечує сталий рух зернового вантажу по поверхні каналу. Отже, вибір і співвідношення кутів нахилу розгінної та гальмівної ділянок ПВГК залежить від формули (2.28) та конкретного сорту зерна з відповідним кутом тертя ξ .

Для переважної більшості різновидів зерна сільськогосподарських культур кут тертя лежить в межах від 15° до 25° в залежності від фізико-механічних властивостей та рівня зволоженості зернової маси. Зважаючи на це, формуючи кути ключових ділянок ПВГК повинні бути більшими від вказаного кутового діапазону, тобто для гальмівної ділянки слід дотримуватися наступної вимоги $\beta > \xi$. В найбільш невідповідних умовах переміщення зернового потоку кут β приймає значення, що перевищує верхню межу діапазону варіації кута тертя, а саме – $\beta > 25^\circ$. При цьому зважаючи на взаємозалежність (2.28) між кутами гальмівної та розгінної ділянки ПВГК, кут α буде більшим від 41° .

Приймаючи до уваги вище приведені умови при встановленні кутів нахилу ділянок ПВГК, було проведено комплекс теоретичних розрахунків по визначенню особливостей формування геометричних характеристик гвинтового каналу та кінематичних параметрів руху зернового потоку.

Найбільш вагомими та значимими результатами теоретичного вивчення процесу руху зернового потоку в ПВГК викладені нижче.

Формування геометрії гвинтового каналу в першу чергу вимагає визначитися з кутами нахилу обох ділянок каналу. Так, використовуючи залежність (2.28) між даними кутовими параметрами, була побудована поверхня відгуку (рис. 3.2), що ілюструє характер зміни кута нахилу гальмівної ділянки від кутового параметра ділянки розгону та співвідношення початкової висоти h_0 падіння зерна у гвинтовий канал до радіуса r цього каналу.

З аналізу проілюстрованої залежності встановлюється той факт, що

головним чинником формування величини кута β є співвідношення між ключовим габаритним параметром ПВГК – радіусом r каналу та висотою падіння зерна h_o . Так, з його зростанням від 0,1 до 1 кут нахилу гальмівної ділянки, з врахуванням алгебраїчної різниці з кутом α , збільшується від нульового значення до майже 50° . Приймаючи до уваги накладені вище обмежувальні умови на значення кутів нахилу ділянок каналу, кут β слід формувати відштовхуючись від значення співвідношення h_o/r рівних 0,6...0,7 та вище. У цьому випадку даний кут буде гарантовано перевищувати обмежувальну границю у 25° .

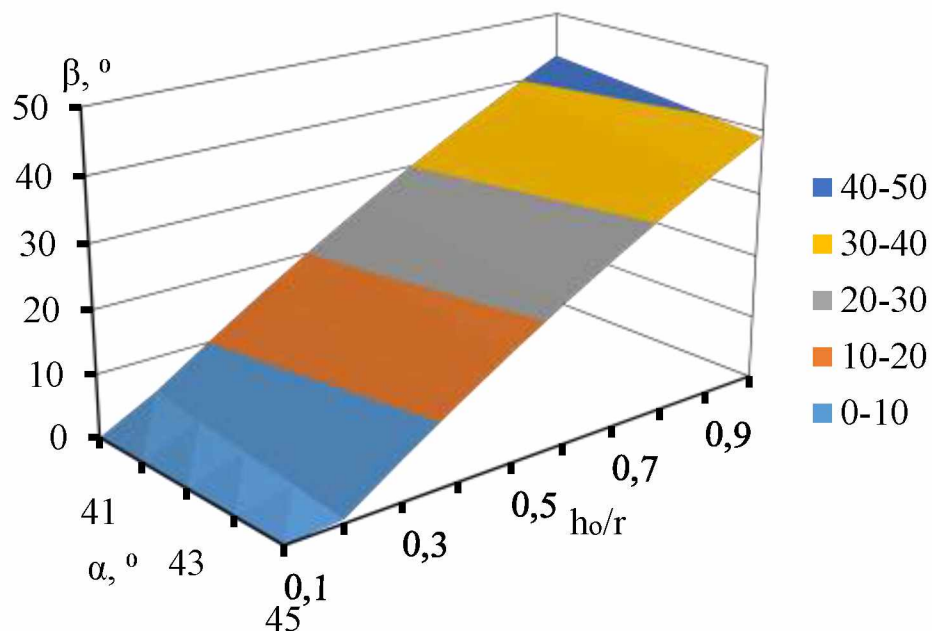
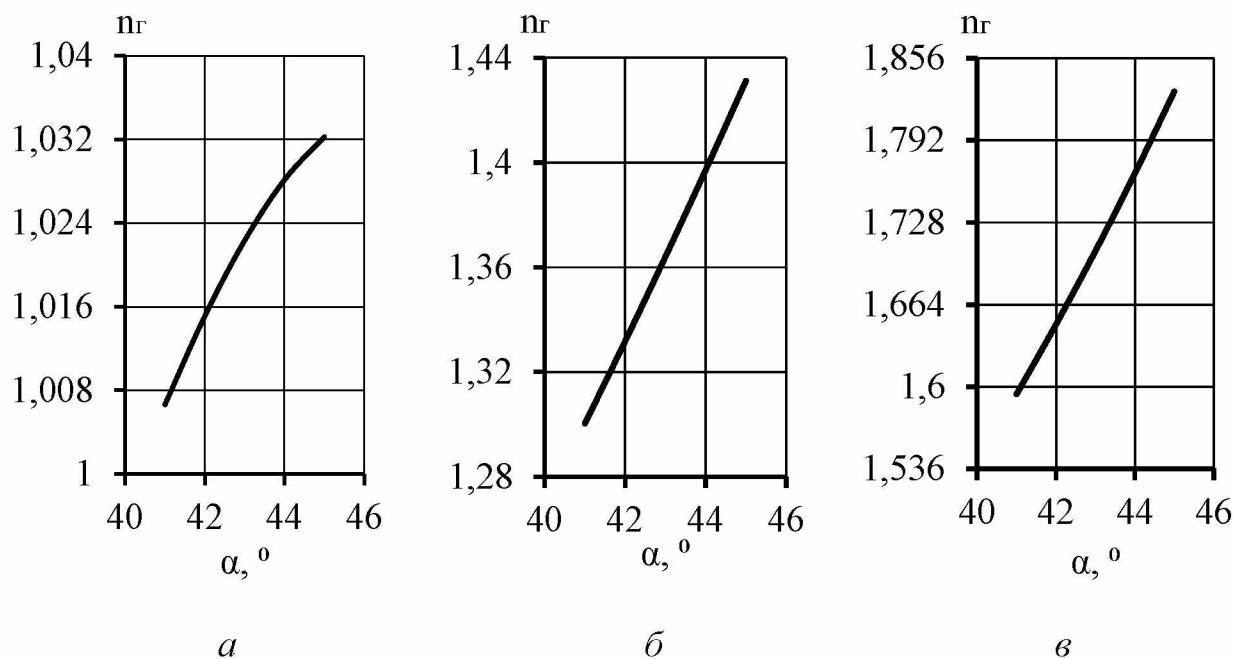


Рисунок 3.2. – Співвідношення кутів α розгінної та β гальмівної ділянки з врахування співвідношення h_o/r

Наступним показником, що визначає геометричну будову гвинтового каналу, є кількість витків окремо взятої ділянки каналу. Розрахунок кількості витків використовує формули (3.32) і (3.37), та сконцентрований на дотриманні та виконанні декількох умов. По-перше, геометрична висота розгінної та гальмівної ділянки не повинна перевищувати загальну висоту усього гвинтового каналу. По-друге, повинне бути певне співвідношення між ними,

щоб забезпечити допустимі межі по тривалості розгону та гальмування зернового потоку.

Так, на рисунку 3.3 відображені результати розрахунку необхідної кількості витків для гальмівної ділянки n_{Γ} при довільно вибраній чисельності витків ділянки розгону n_p . Розрахунки проводились при сталому співвідношенні $h_o/r=0,7$; висоті гвинтового каналу 1,5-2,5 м та в діапазоні зміни кута α від 41° до 45° .



$$a - n_p = 0,8; \quad b - n_p = 1; \quad v - n_p = 1,2$$

Рисунок 3.3 – Кількість витків гальмівної ділянки в залежності від кута α та n_p при $h_o/r=0,7$

Згідно до графічно відображених результатів розрахунків, кількість витків n_{Γ} при зростаючому куті α має тенденцію до майже лінійного характеру свого збільшення, не зважаючи на кількість витків ділянки розгону. Найбільш стрімко подібне зростання n_{Γ} зі збільшення кута α відбувається при $n_p=1,2$; коли кількість витків в крайніх точках зростаючого відрізка відрізняється на 14%. Це обумовлено жорстким співвідношенням кутів α та β в незалежності від кількості витків відповідних ділянок каналу при сталій величині відношення h_o/r .

3.3. Програма проведення експериментальних досліджень швидкості руху зерна у запропонованому гвинтовому пристрої

Метою проведення експериментальних досліджень є визначити характер зміни кінематичних параметрів руху зерна від факторів впливу та провести їхнє співставлення з теоретично обрахованим. Це дасть змогу визначити рівень збіжності отриманих результатів та скласти висновок про адекватність і точність запропонованої аналітичної моделі та ПВГК.

У якості кінематичних параметрів, що аналізуються, були вибрані максимальна та кінцева швидкість руху зерна.

Відповідно до поставленої мети дослідних експериментів була сформована програма досліджень з двох етапів.

На першому етапі визначався характер зміни величини максимальної швидкості руху зерна на розгінній ділянці в залежності від геометричних параметрів цієї ділянки. Кількість факторів, що мають безпосередній вплив на формування даного критерію, є досить значним, тому з метою зменшення кількості дослідів варіативній зміні піддавались лише декілька. Зокрема, змінювався кут нахилу α ділянки розгону та радіус гвинтового каналу r при умові незмінності кількості витків n_p та сталості висоти падіння зерна h_o .

На другому етапі досліджувалась кінцева швидкість зерна при сході з каналу. Дослідження здійснювалось при зміні кута нахилу розгінної та гальмівної ділянки та фіксованих інших параметрах, співвідношення, що визначає залежність між кутами зберігалось.

З метою отримання достовірних даних у кожній комбінації змінних факторів з рівнем значущості 5%, було заплановано проведення п'яти паралельних експериментів.

Отримані результати експериментальних досліджень опрацьовувались за стандартною методикою статистичної обробки даних. А саме: перевірка на однорідність дисперсій дослідів за критерієм Кохрена, перевірка нормального розподілу залишкового ряду за RS критерієм, знаходження відносної похибки залишків та їх статистичних оцінок, визначення коефіцієнта множинної

кореляції, співставлення результатів експериментальних та теоретичних досліджень за величиною відносних похибок між ними. Дані дослідження є підставою для оцінки точності та адекватності запропонованої моделі.

Процедура проведення дослідів передбачала зміну геометрії гвинтового каналу під вибрані для кожного етапу параметри та циклічного проведення експериментів з необхідною періодичністю та рівнем повторюваності.

У якості зернового матеріалу було вибрано зерно пшениці озимої зі середньою вологістю 14%.

Відстеження у часі переміщення зернового потоку (окремо виділених яскравою фарбою його частинок) по гвинтовому каналу при експериментальних дослідженнях здійснювалось за використанням високочастотної відеотехніки. Покадровий аналіз відзнятого матеріалу дозволив визначати місце розташування ключових частинок зернового потоку у гвинтовому каналі та обраховувати часову тривалість їхнього переміщення. За величиною пройденого шляху та тривалістю переміщення між ними визначались швидкості руху зерна.

3.4 Результати експериментальних досліджень та їх співставлення з даними теоретичних розрахунків

З метою перевірки адекватності складеної моделі руху зернового потоку по гвинтовому каналу та визначення ступеня відповідності отриманих розрахунковим шляхом параметрів руху їх еквівалентним величинам в реальних умовах протікання гравітаційного руху зерна було здійснено ряд експериментальних досліджень. Дослідження проводились на лабораторному зразку периферійного відкритого гвинтового завантажувального пристрою (ПВГК) зі змінними кутами спуску (рис. 3.4). Рух зернового потоку у гвинтовому каналі у ході проведення теоретичних та експериментальних дослідженнях оцінювався кількома важливими кінематичними параметрами. До таких було віднесено максимальна швидкість розгону та кінцева швидкість

сходу зерна з гвинтового каналу.



Рисунок 3.4 – Експериментальний дослідний зразок ПВГК

Стосовно дискретності зміни факторів впливу, то для першого етапу досліджень було прийнято наступне: висота гвинтового каналу – 2 м; співвідношення h_0/r вибиралось дискретно (0,7; 0,8; 0,9); кількість витків $n_p=1$; кут α змінювалась від 41 до 45° з кроком в 1°; коефіцієнт тертя зернового матеріалу при русі по металевому каналу приймався рівним $\mu = 0,3$.

На рисунку 3.5 відображено характер зміни максимальної швидкості розгону у вибраному діапазоні зміни кута α , у таблиці 1, як приклад, приведені результати співставлення теоретичних та експериментальних досліджень при $h_0/r = 0,7$.

межу кута природного відкосу ξ для зерен пшениці.

Із статистичної оцінки отриманих експериментальних даних (табл. 3.1) видно, що варіативність зміни швидкостей для кожного кута α є доволі невелика, а відхилення поточних значень від середнього показника не перевищує 10...13%. При перевірці однорідності дисперсій досліджень було встановлено, що спостережене значення Кохрена $G=0,04525$ не перевищує його критичної величини $G_{\text{табл.}}=0,6838$, вибраного виходячи з кількості дослідів, паралельних досліджень та прийнятих факторів впливу. Це свідчить про належний рівень якості і повторюваності проведеного експерименту.

Значення похибки експерименту та відносних похибок (<10%) дослідних та теоретичних значень максимальної швидкості засвідчують цілком допустимі межі відхилень для даного багатofакторного експерименту з наявною складністю його натурної реалізації.

Таблиця 3.1 – Результати експериментів по визначенню максимальної швидкості руху на розгінній ділянці ($h_0/r = 0,7$)

Кут α	Максимальна швидкість V_{max} , м/с					Максимальна швидкість V_{max} , середня	Дисперсія дослідів D_i	Теоретична максимальна швидкість V_{max} , м/с	Відносна похибка, δ , %
41	2,39	2,40	2,47	2,32	2,43	2,40	0,0032	2,31063	4,0
42	2,10	2,08	2,00	2,30	2,31	2,16	0,0194	2,34355	7,9
43	2,21	2,31	2,36	2,17	2,24	2,26	0,0057	2,37837	5,1
44	2,39	2,26	2,47	2,48	2,34	2,39	0,0083	2,41493	1,1
45	2,69	2,81	2,56	2,62	2,68	2,67	0,0087	2,45312	8,9
Похибка експерименту							0,09513		
Максимальна дисперсія, D_{max}							0,01944		
Сума дисперсій, ΣD							0,04525		
Спостережене значення критерію Кохрена, G							0,42957		

Для другого етапу програми досліджень фактори впливу набували таких же самих значень як і на першому етапі, співвідношення $h_0/r=0,9$. Кут β при цьому обраховувався на підставі величини кута α за приведеним у теоретичній

частині аналітичним виразом (2.28). Правило п'ятикратного повторення експерименту для кожного варіанту значення кутів зберігалось для даного етапу.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень по визначенню швидкості (рис. 3.6) зернового потоку при сході з гвинтового каналу приводять до аналогічних висновків. Статистична обробка результатів досліджень (табл. 3.2) по визначенню кінцевої швидкості також вказує на однорідність дисперсій досліджень, зокрема спостережний критерій Кохрена $G=0,5446$ не перевищує його критичне значення $0,6838$. Значення кінцевої швидкості в межах одного експерименту суттєвим чином не відрізняються від їх усереднених величин. Відносні похибки не перевищують 12%.

За рахунок дотримання чіткого взаємозв'язку між основними геометричними компонентами гвинтового каналу у ході проведених експериментів було виявлено, що кінцева швидкість сходу зерна з каналу (рис. 3.6) знаходиться в межах від 1,8 м/с до 2,2 м/с при середніх розрахункових значеннях біля 1,98 м/с.

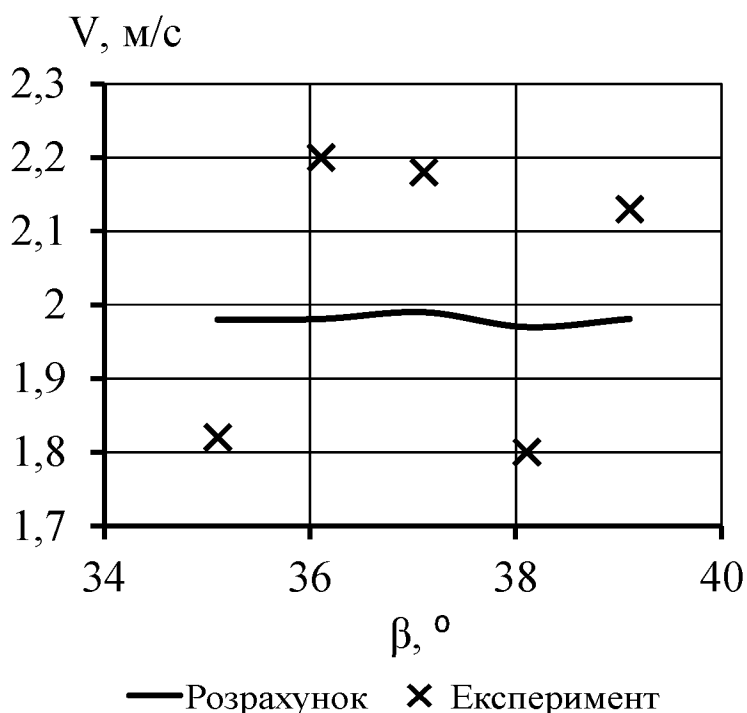


Рисунок 3.6 – Швидкість руху зерна в моменту його сходу з каналу

Таблиця 3.2 – Результати експериментів по визначенню поточної швидкості руху зерна в моменту його сходу з гвинтового каналу ($h_0/r = 0,9$)

Кут α	Кут β	Кінцева швидкість $V_{кін}$, м/с					Кінцева швидкість $V_{кін}$, середня	Дисперсія дослідів D_i	Теоретична кінцева швидкість $V_{кін}$, м/с	Відносна похибка, δ , %
		1,98	1,9	2,6	2,3	1,9				
41	39	1,98	1,9	2,6	2,3	1,9	2,14	0,0945	1,980909	7,8
42	38	1,8	1,8	1,7	1,8	1,9	1,8	0,005	1,970000	8,6
43	37	2,1	2,2	2,2	2	2,4	2,18	0,022	1,990000	9,5
44	36	2,1	2,2	2	2,4	2,3	2,2	0,025	1,980909	11,1
45	35	1,7	1,7	1,8	1,8	2,1	1,82	0,027	1,980000	8,1
Похибка експерименту								0,18627		
Максимальна дисперсія, D_{max}								0,09448		
Сума дисперсій, ΣD								0,17348		
Спостережене значення критерію Кохрена, G								0,54462		

Таблиця 3.3 – Результати дослідження залишків експериментальних та теоретичних даних кінцевої швидкості руху зерна в момент сходу з каналу

Залишки $V_{кінц}$, м/с				
-0,01	0,080909	-0,61909	-0,31909	0,080909
0,180909	0,180909	0,280909	0,180909	0,080909
-0,11	-0,21	-0,21	-0,01	-0,41
-0,11909	-0,21909	-0,01909	-0,41909	-0,319091
0,28	0,28	0,18	0,18	-0,12
Відносні похибки, %				
0,505051	4,258362	23,8112	13,87353	4,25836
10,05049	10,05049	16,52405	10,05049	4,25836
5,238095	9,545455	9,545455	0,5	17,0833
5,671006	9,958687	0,954556	17,46213	13,8735
16,47059	16,47059	10	10	5,71429
Середня відносна похибка, %			9,85	
Математичне сподівання			-0,05	
Дисперсія			0,061	
Довірчий інтервал			(-0,54; 0,451)	
Сума квадратів залишків			1,52643	
RS критерій нормального розподілу			3,57 € (3,34; 4,53)	

Висновки по розділу

Статистичний аналіз експериментальних даних та значень залишків кінцевої швидкості сходу зерна (табл. 3.2-3.3) вказують на достатній рівень та точність проведених досліджень. Згідно RS критерію значення залишкового ряду є нормально розподіленими для рівня значущості 0,05 та $n=25$. Однорідність дисперсій досліджень, коефіцієнт множинної кореляції експериментальних та теоретичних даних кінцевої швидкості $R=0,998$, середня відносна похибка залишків 9,85% та їх нормальний розподіл свідчать про адекватність розробленої моделі.

Співставлення теоретичних та експериментальних значень максимальної та кінцевої швидкості руху зерна за величиною відносних похибок вказує на прийнятно високий рівень точності розробленого експериментального зразка ПВГК згідно дослідженої та обґрунтованої аналітичної моделі.

4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ РОЗРОБКИ

4.1 Екологічна експертиза зерноскладищ

Функціонування силосних складів, комбикормових заводів, елеваторів і будь-яких зерноскладищ зумовлює досить багато різноманітних виробничих процесів, зокрема приймання, зберігання, і завантаження зерна, його перевезення, очистка, сушка, помел тощо. Наведені дії зумовлюють виникнення значного об'єму пилу, що інколи призводить до його небезпечної концентрації у навколишньому середовищі і створює загрозу для соціуму.

Таким чином, основний вплив на екологію діяльності довільного силосного складу є пил, що утворюється при здійсненні переважної більшості техніко-технологічних дій із зерном: прийом, транспортування, очищення, сепарація, зберігання в підлогових складах, а також при відвантаженні. Запиленість може досягати 2-3 гр/м³. Наявність пилу у повітрі також має дратівливий вплив на людей.

Основні шляхи негативного впливу зерноскладищ на навколишнє середовище:

– насосні станції, які споживають кисень і перетворюють його на вуглекислий газ, викидають шкідливі токсичні речовини і пил в атмосферу. Найнебезпечнішими викидами у повітря від зерноскладищ є сірководень – 5 мг/м³, аміак, окис азоту, діоксид сірки, складні ефіри – 125...325 мг/м³.

– на людей мають негативний вплив шум та вібрація силосних складів, що збільшує стомлюваність працівників підвищуючи і зменшує їх працездатність.

– стоки, що у своєму складі мають господарсько-побутові та виробничі забруднення, які зливають у каналізацію.

Для зменшення вібраційних коливань детально продумують проекти фундаментів для силосів та обладнання. Для зменшення викидів пилу та гучності шуму підприємства обладнують фільтрами з глушниками. Вони знижують концентрацію небезпечних викидів під час виробничих процесів.

Дане технологічне рішення спроможне зменшити і знизити забруднення навколишнього середовища.

- склад атмосфери погіршують вихлопи транспортних засобів, завантажувальний бункер, обладнання для очистки зернової маси, сушарки.

- погіршення якості води: господарські, побутові і загальні питні потреби для зберігання насіння.

- якість родючості землі і ґрунтів у цілому погіршується через забруднення лампами денного світла, комунальними відходами, шлаками, ошурками від чищення насінневої маси тощо.

- негативний вплив на флору та фауну за рахунок дії електромагнітних полів електричних підстанцій, електрощитових, автоматів захисту, аварійного освітлення та іншого електричного устаткування.

Вище зазначені фактори впливу силосів та зерносквоищ на атмосферу, водні запаси, земельні ресурси, флору та фауну мають прямий вплив і постійний характер.

Рекомендовані принципи, методи і засоби зниження антропогенного впливу на навколишнє середовище

Рекомендовані рішення відносяться перш за все до засобів пожежогасіння на зернових елеваторах для підвищення ефективності ліквідації вогнища самозаймання.

Важливим засобом піклування про збереження довкілля є система екологічного менеджменту. Системи екологічного менеджменту, відповідні вимоги та настанови щодо їх застосування відображені в Міжнародному стандарті *ISO 14001*. У ньому прописані всі основні вимоги, які повинні бути впроваджені і на елеваторі.

Розглянемо, як впроваджується система екологічного менеджменту на основних етапах роботи елеваторів.

Технологічні операції з зерном починаються на елеваторах з відбору проб. Цю процедуру на елеваторах доцільно проводити автоматичними пробовідбірниками. Це вакуумні герметичні установки, які висмоктують 2-3 кг

зерна на зразок і не дають можливості підніматися зернового пилу. Для ефективного знепилювання кожного технологічного вузла необхідно, щоб аспираційне обладнання задовольняло всім нормам і вимогам екологічної безпеки.

Далі вантажівки рухаються на завальну яму, автомобілі повинні пересуватися по елеваторах затентованими. Це правило дозволяє не тільки виключити потрапляння сторонніх домішок в зерно, а й також зводить до нуля викиди пилу і розсипи зерна при переміщенні зерновозу по елеватору.

При вивантаженні зерна приймаються більш радикальні заходи для запобігання викидів пилу. Місця для вивантаження зернових «защиті» з усіх боків і мають в'їзні та виїзні ворота. Вони закриваються після в'їзду автомобіля на завальну яму. Таким чином, в момент вивантаження зерна, пил локалізується і не забруднює навколишнє середовище на території елеватора. На транспортному обладнанні повинні бути встановлені аспираційні системи, як і в підсилованих галереях і на сепараторах. Транспортери теж повинні бути закритого типу, щоб не було викидів у галерею.

Боротьба з пилом може вестись механічним шляхом: закриття воріт при розвантаженні вантажівки, раз на тиждень зачищають майданчик прийому авто, транспортні лінії та інше технологічне обладнання.

Для індивідуального захисту робітників під час вивантаження зерна повинні видаватися респіратори, маски, печатки і закритий одяг.

Основне джерело можливого забруднення повітря на зерносушищах є зерносушарка. У кожного підприємства, де є таке обладнання, повинні бути дозволи на викиди забруднюючих речовин у атмосферу. У документі визначаються максимально допустимі значення викидів зерносушарок, з якими порівнюються реальні викиди у ході регулярних перевірок. Перевірки повинні проводити незалежні сертифіковані компанії.

Наявні вентилятори на кожній зерносушарці повинні мати аспираційне обладнання. Пил і мало-дисперсійні фракції потрапляють і окремо зберігаються

в спеціальному бункері. Зерносушарки кожного елеватора по графіку повинні зачищатися, і якщо потрібно миються і сушаться.

Якщо викиди починають перевищувати норму, то оптимальний варіант це зменшення кількості годин роботи зерносушарки, а для цього важливо строго вести журнал обліку її робочого часу.

Невеликі протікання машинного мастила, що інколи трапляються у авто на території зерносховищ, потрібно засипати піском чи деревною тирсою.

Зерносховища повинні мати дійсні контракти з організаціями по утилізації відходів, тобто не потрібно займатися їх самовивезенням. Якщо відходи тимчасово зберігаються на території, то їх обов'язково огорожують.

Вимоги до обслуговуючого персоналу: наявність відповідного спецодягу і распіраторів; регулярне проходження навчання та підвищення кваліфікації

Важливим аспектом є постійна модернізація аспіраційних систем, очисного обладнання та виконання наявних екологічних норм зберігання зернових та чинних вимог по охороні навколишнього середовища.

Необхідною є боротьба з можливими вибухами і самозайманням на зернових елеваторах. Вона включає розміщення у силосах елеваторів речовини, що перешкоджає самозайманню зерна. В якості цієї речовини використовують газоподібний антипіроген, безпечний в санітарному відношенні і розміщений в герметичних легкоплавких ампулах, ампули перемішують із зерном і розміщують їх у силосах елеваторів при їх завантаженні зерновими. Як антипіроген можуть також бути використані хлориди лужних і лужноземельних металів або бром заміщені вуглеводні.

Транспортування відходів повинно проводитись тільки за рахунок використання спеціальних транспортних засобів, які унеможливають втрати під час перевезення, пропонують максимальну зручність при перевантаженні і мінімізують забруднення. Зокрема під час транспортування відходів, які можуть пилити, необхідно використовувати самоскидний пристрій, що обладнаний пологом.

4.2 Охорона праці під час транспортування, завантаження та зберігання зерна на елеваторах

Суворе виконання вимог охорони праці є запорукою життя і безпеки робітників [37]. Силосні споруди і бункери для зберігання зернової маси, незалежно від місця їх розташування, закриваються суцільним перекриттям з обладнаними в них завантажувальними лазами та люками. Силоси, що мають радіус більше 6 м характеризуються наявністю плоского днища і можуть бути обладнані засобами для автоматичного очищення насіння. Всі силосні споруди мають облаштовані засоби аспірації та інше обладнання, що запобігає, під час наповнення силосів зерновою масою, витіснення повітря у робочі приміщення. Вимірювання температурних показників і забір проб насіння у силосних приміщеннях безпосередньо за допомогою проникнення туди людей не дозволяється.

Всі люки силосів і бункерних веж зерносховищ повинні закриватися заслінками. В процесі відкриття службових лазів для транспортування виробничих механізмів необхідне їх міцне оточення перилами, висота яких повинна бути не меншою ніж 1 м.

Всі лази і розвантажувальні заслінки силосних споруд та бункерів, будь-якого конструктивного розміщення, за виключенням «кришок», повинні містити міцні металеві решітки з комірками розміром не більше 0,25 на 0,075 м. Огородження не потрібно заглиблювати на рівень, що перевищує 0,6 м від площини підлогового покриття споруди. Отвори лазів необхідно робити прямокутної форми з габаритом не менше 0,5...0,6 м. Всі риштування лазів монтуються на петлі або болти; вони повинні мати пристосування для замикання.

Облаштування підземних поверхів веж елеваторів, підсилосних поверхів сполучених підземних галерей, приймальних та відвантажувальних механізмів має виключати проникнення у них ґрунтових вод.

За наявності конвеєрів відстань між ними для обслуговування повинна дорівнювати для ланцюгового і стрічкового обладнання не менше 750 мм. При

паралельному розміщенні конвеєрів відстань між ними повинна бути не менше одного метра.

Обладнання, механічні пристрої, виробничі апарати, самоплинні транспортні засоби та інші пристосування повинні бути розміщені так, щоб їх монтаж, ремонт і обслуговування були безпечними та зручними. Частина механізмів що лінійно рухаються чи обертаються повинні бути захищені належним чином.

У робочих вежах зерносховищ можуть встановлюватися ліфтові пристрої. Установка і сертифікація ліфтів повинні відповідати чинним вимогам. Вимоги щодо конструкції, будови і безпечної експлуатації ліфтів затверджені держтехнаглядом.

Працівники спускаються у силосні приміщення і бункери тільки у виняткових випадках, коли немає можливості цього уникнути. Дозвіл на спуск людей оформлюється через письмове розпорядження начальника цеху згідно правил техніки безпеки і санітарних вимог. Відповідальна за це особа особисто повинна перевірити достатнє провітрювання силосів, справність механізму лебідки, тросів, люльки, поясів, канатів, протигазів, будівельних касок. Вона також слідкує за чітким дотриманням працівниками зерносховища необхідних правил безпеки в процесі спускання-опускання та інших попередньо узгоджених робіт.

Спуск до силосів, чи ремонт лебідки дозволений працівникам, які мають допуск для проведення таких робіт. Зокрема працівнику, що спускається у силос, необхідно мати медичну справку, що дозволяє за станом здоров'я виконувати роботи на висоті і спускатися у силоси. Спускання працівників у силосні конструкції без письмової згоди робітника заборонено.

Якщо у силосному приміщенні конструктивно передбачена нижня заслінка, право на її використання дає лише начальник ділянки або змінний майстер, у вигляді письмового наряду і за його особистим наглядом.

Перед початком використання силоси мають оглянути зверху і перевірити відсутність прилиплої маси насіння. Працівника допускають у силосне

приміщення лише після усунення зі стін остатків зернової маси, тривалого провітрювання силосу за допомогою відкриття одночасно верхніх і нижніх заслінок та строгої перевірки. Для уникнення падіння випадкових предметів зверху, верхню заслінку потім потрібно закрити.

Випускаючи воронки, що подають зернову масу на розташований знизу конвеєр у автоматизованих плоско підлогових зерносховищах потрібно забезпечити горизонтальними ґратками, що міцно закріплені відносно підлоги вертикальними колонами, що убезпечить робітників від падіння у отвір. У іншому випадку використання таких силосних складів заборонено.

Аспіраційне повітря мереж перед його виходом у зовнішню атмосферу необхідно очищувати за допомогою циклонів або фільтрів. Для цього постійно проводять перевірку обладнання на наявність у них пилу, не допускаючи його накопичення. Концентрація пилу, що надходить у атмосферу, не повинна бути більшою максимально дозованих показників або узгоджених викидів, встановлених відповідно до ДСТУ ISO 14001:2015.

Якість повітря у виробничих приміщеннях повинна регулярно перевірятися для визначення наявної концентрації пилу і хімічного складу. Дана перевірка в період інтенсивного виробництва повинна проводитися не пізніше ніж один раз на рік. Вихідні патрубки циклонів мають бути розташовані на висоті 2 м від покрівлі будівлі, у якій вони розташовані.

Щорічно повинні здійснюватися заходи для зниження викидів пилу у атмосферу, щодо підвищення ефективності роботи аспіраційних мереж та установок, зниження норм водоспоживання на вироблення продукції, усунення скидання нефільтрованих водних стоків, будівництва водоочисних споруд, наприклад станцій біологічного або механічного очищення стічних вод.

Потрібно звернути увагу на спеціальну підготовку водіїв транспортних засобів, які постійно зайняті на перевезеннях небезпечних відходів зернових вантажів. Вона включає:

- систематичне вивчення інформації про безпеку (позначення транспортних засобів і упаковок);

- вивчення властивостей небезпечних вантажів;
- навчання прийомам надання першої допомоги постраждалим;
- підготовку і передачу повідомлень (доповідей) відповідним посадовим особам про те, що стався інцидент.

4.3 Техніко-економічні показники модернізованого зерносховища

Економічна оцінка досліджуваних технологій економного зберігання ресурсів та застосування високопродуктивних ощадних розробок є запорукою успішної роботи будь-якого елеватора та зерносховища в умовах ринкових відносин. Робота будь-якого підприємства спрямована на зниження до мінімуму витрат при виробництві і реалізації продукції. Зокрема, необхідне ефективне транспортування та зберігання зернової продукції у силосах. Це дозволить досягти забезпечення високих доходів зерносховищ та їх кваліфікованих працівників.

Розрахунок економічної ефективності проводився з урахуванням методики літературних джерел [38, 39].

Для повного відображення співвідношення доходів і витрат, пов'язаних із завантаженням і зберіганням зерна у силосах необхідний розрахунок наведених нижче техніко-економічних показників.

Всі техніко-економічні показники можна умовно розділити на дві групи, що відображають витрати і доходи. Кожен з цих показників, у свою чергу, поділяється на підгрупи.

До групи витратних показників відносяться:

1. Капітальні витрати на переобладнання силосу, тобто будова і монтаж всередині запропонованого гвинтового пристрою обережного завантаження зернової маси. Ці витрати містять сукупність витрат на будівництво ПВГК, закріплення на стінках силосу, оснащення механічними пристроями для можливості регулювання кутів розгінної та гальмівної ділянки, і введення силосу в експлуатацію). Капітальні витрати обчислюються у два етапи: перший етап - визначення необхідної суми інвестицій на будівництво та обладнання;

другий - визначення капітальних вкладень з урахуванням їх розподілу за часовими періодами і упущеної вигоди. Таким чином, розрахунок капітальних витрат необхідний для реалізації проєкту та обґрунтування його ефективності.

2. Експлуатаційні витрати. Зазвичай розраховуються за рік і є сукупністю витрат необхідних для нормальної діяльності підприємства. У цю підгрупу входять: витрати на заробітну плату; витрати на амортизацію; витрати на ремонт, обслуговування; витрати на освітлення; витрати на енергоносії; витрати на сплату податків (на прибуток, ПДВ, на землю тощо).

Для виявлення доцільності впровадження основних результатів дослідження необхідно в середину силосу вмонтувати розроблений ПВГК. Перелік обладнання елеватора, його кількість, орієнтовна вартість на базовому і проєктному силосному комплексі для зберігання зерна та посівного матеріалу представлені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Перелік обладнання, його кількість, вартість на базовому і проєктованому комплексах післязбиральної обробки і зберігання зернового матеріалу

Найменування обладнання, марка	Вартість, тис. грн	Кількість, шт		Вартість, тис. грн	
		<i>базовий</i>	<i>проєкт</i>	<i>базовий</i>	<i>проєкт</i>
1	2	3	4	5	6
Завальна яма з ланцюговим або стрічковим конвеєром	250	2	2	500	500
Конвеєр ланцюговий або стрічковий	320	2	2	640	640
Норія, НВ-250/30	1400	2	2	2800	2800
Конвеєр ланцюговий КСВ-250 (У9-УКЦ 450/21)	1300	2	2	2600	2600
Конвеєр ланцюговий КСВ-175/15	440	4	4	1760	1760
Зерноочисна машина: ТАС204А-4	3600	2	2	3600	3600
Норія, НВ-175/22	800	1	1	800	800
Конвеєр ланцюговий КСВ-175/31	800	1	1	800	800

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5	6
Конвеєр ланцюговий КСВ-175/29	650	3	3	1950	1950
Зерносушарка СВМ-7-24	14500	2	2	29000	29000
Норія, НВ-175/30	900	4	4	3600	3600
Конвеєр ланцюговий КСВ-175/17	460	18	18	8280	8280
Норія, НВ-175/34	1100	2	2	2200	2200
Конвеєр ланцюговий КСВ-175/11	300	2	2	600	600
Норія, НВ-175/36	1200	4	4	4800	4800
Конвеєр ланцюговий КСВ-50/12	220	2	2	440	440
Конвеєр ланцюговий КСВ-175/44	1000	1	1	1000	1000
Силосне зерносховище з пласким дном ВК.20.20.В12	4000	10	10	40000	40000
Конвеєр ланцюговий КСВ-175/7	250	2	2	500	500
Зачисний шнек	235	18	18	2115	2115
Ввід подвійний круглий, СВ08	1	20	20	20	20
Електрозасув, У12-ТЭА-15М	10	44	44	440	440
Магнітний сепаратор, МСН- 175	40	2	2	80	80
Фільтр локальний, ФЛ700	220	13	13	2860	2860
Конвеєр гвинтовий, КВ/14	140	2	2	280	280
Циклон, VR68/560-S1-290D	25	2	2	50	50
Датчик обриву ланцюга конвеєра, РДД-03А	3	2	2	6	6
Аерозольний затвор на норію, ЗАГ×п-1,0	13	13	13	169	169
Перекидний клапан на два напрями, SLK2×45×300	20	6	6	120	120
Перекидний клапан на три напрямки, К3×45×300	25	4	4	100	100
Датчик контролю обертання гвинтового конвеєра, РДД-02	4	2	2	8	8
Конвеєр ланцюговий КСВ-175/24	600	1	1	600	600

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5	6
Прилади лабораторії	400	9	9	400	400
ПВГК	40	0	10	0	400
Витрати на обладнання				113238	113518
Витрати на монтаж устаткування, 50% від вартості обладнання				56619	56759
Загальнобудівельні витрати, 40% від вартості обладнання				45295	45407
Витрати на пусконаладжувальні роботи, 7% від вартості обладнання				7927	7946
Інші витрати, 3% від вартості обладнання				3397	3406
Капітальні витрати, K				226476	227036
Капітальні додаткові витрати, K^{dod}					560

У середньому витрати на монтаж пристроїв та обладнання з урахуванням необхідних металоконструкцій становлять 50%. Загальнобудівельні витрати при виробництві елеваторів досягають 40%. Витрати на пусконаладжувальні роботи складають 5...10%. Інші витрати досягають 3% від вартості обладнання [38, 39].

Аналіз таблиці 4.1 показав, що для будівництва елеватора з одноразовим зберіганням 60000 т зернового матеріалу необхідно понад 226 млн. грн. Для модернізації комплексу необхідно ще **560 тис. грн** додаткових капіталовкладень. У зв'язку з додатково встановленим обладнанням на проєктованому комплексі експлуатаційні витрати будуть вище, ніж у базовому варіанті. Амортизаційні відрахування визначимо за формулою:

$$A_m = K \cdot N_a / 100, \quad (4.1)$$

де A_m – витрати на амортизацію, грн.; K – капітальні вкладення (табл. 4.1), грн;
 N_a – річна норма амортизації, при терміні служби елеватора 20 років $N_a=5\%$.

У базовому варіанті амортизаційні відрахування $A_m^{баз}$ складуть:

$$A_m^{баз} = K_{баз} \cdot N_a / 100 = 226\,476\,000 \cdot 5 / 100 = 11\,323\,800 \text{ грн.}$$

У проєктному варіанті амортизаційні відрахування A_m^{np} складуть:

$$A_m^{np} = K_{np} \cdot N_a / 100 = 227\,036\,000 \cdot 5 / 100 = 11\,351\,800 \text{ грн.}$$

Тоді додаткові амортизаційні відрахування, що викликані встановленням ПВГК при модернізації силосів, дорівнюватимуть:

$$A_m^{\text{дод}} = A_m^{np} - A_m^{\text{баз}} = 11\,351\,800 - 11\,323\,800 = 28\,000 \text{ грн} \quad (4.2)$$

Витрати на ремонт і технічне обслуговування визначимо за формулою:

$$P_m = K \cdot N_p / 100, \quad (4.3)$$

де P_m – витрати на ремонт і технічне обслуговування, грн; N_p – щорічна норма відрахувань на ремонт і технічне обслуговування обладнання. Для машин післязбиральної обробки врожаю, $N_p = 6\%$.

У базовому варіанті витрати на ремонт і технічне обслуговування $P_m^{\text{баз}}$ обладнання складуть:

$$P_m^{\text{баз}} = K_{\text{баз}} \cdot N_p / 100 = 226\,476\,000 \cdot 6 / 100 = 13\,588\,560 \text{ грн.}$$

У проєктному варіанті витрати на ремонт і технічне обслуговування P_m^{np} обладнання складуть:

$$P_m^{np} = K_{np} \cdot N_p / 100 = 227\,036\,000 \cdot 6 / 100 = 13\,622\,160 \text{ грн.}$$

Тоді додаткові витрати на ремонт і технічне обслуговування, викликані встановленням обладнання при модернізації, дорівнюватимуть:

$$P_m^{\text{дод}} = P_m^{np} - P_m^{\text{баз}} = 13\,622\,160 - 13\,588\,560 = 33\,600 \text{ грн} \quad (4.4)$$

Витрати на електроенергію для базисного і проєктного варіантів, визначаються за формулою:

$$C_{el} = Q_{el} \cdot \Pi_{el}, \quad (4.5)$$

де C_{el} – витрати на електроенергію, грн.; Q_{el} – річне споживання електроенергії, кВт·год; Π_{el} – середня ціна 1 кВт·год в Україні для сільгоспвиробників, $\Pi_{el} = 3,3$ грн.

За даними виробників, сумарна потрібна потужність базового варіанту елеватора становить 1024 кВт. При цьому річні витрати електроенергії Q_{el} досягають 5120000 кВт год [39]. Враховуючи однаковість електроспоживання для базисного і проєктного варіантів, додаткових затрат $C_{el}^{\text{дод}}$ не буде:

$$C_{el}^{\text{дод}} = 0 \text{ грн} \quad (4.6)$$

Загальні експлуатаційні витрати базового варіанту в рік складуть:

$$I_p^{баз} = A_m^{баз} + P_m^{баз} + C_{ел} \quad (4.7)$$

Загальні експлуатаційні витрати проєктованого варіанта в рік складуть:

$$I_p^{np} = A_m^{np} + P_m^{np} + C_{ел} \quad (4.8)$$

Тоді річні додаткові експлуатаційні витрати \mathcal{E}_I враховуючи (4.1)-(4.8) складуть:

$$\mathcal{E}_I = I_p^{np} - I_p^{баз} = A_m^{дод} + P_m^{дод} = 28\,000 + 33\,600 = 51\,600 \text{ грн} \quad (4.9)$$

Аналіз представлених розрахунків показав, що модернізація зерносховища позначається на підвищенні експлуатаційних витрат на 51 тис. грн на рік у порівнянні з базовим варіантом за рахунок установки ПВГК.

Однак на проєктованому зерносховищі, за рахунок обережного завантаження зерна можна отримувати не тільки товарне і фуражне зерно, а й посівний матеріал. Це розширює спектр виконуваних робіт і забезпечує отримання додаткової продукції. Крім того, якість товарного зерна буде вищою. Це пояснюється меншим пошкодженням зерна під час завантаження за рахунок ПВГК і відповідно більшою якістю та тривалістю зберігання зерна у силосах.

Розрахунок річного економічного ефекту від модернізації комплексу післязбиральної обробки і зберігання зернового матеріалу за рахунок реалізації додатково отриманої продукції зробимо в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Річний економічний ефект від модернізації комплексу післязбиральної обробки і зберігання зернового матеріалу

Показники	Базовий варіант	Проектний варіант
1	2	3
Річний обсяг оброблюваного зернового матеріалу, т:	60 000	60 000
- зерно четвертого класу (фуражне);	25 000	20 000
- зерно третього класу;	20 000	20 000
- зерно другого класу;	15 000	18 000
- насінневий матеріал	-	2 000

Продовження таблиці 4.2

1	2	3
Ціна тонни зернового матеріалу [40], грн / т:		
- зерно четвертого класу (фуражне);		6 050
- зерно третього класу;		6 250
- зерно другого класу;		6 270
- насіннєвий матеріал		9 000
Вартість продукції на рік, тис. грн:		
- зерно четвертого класу (фуражне);	151 250	121 000
- зерно третього класу;	125 000	125 000
- зерно другого класу;	94 050	112 860
- насіннєвий матеріал	-	18 000
Вартість продукції разом, тис. грн:	370 300	376 860
Коефіцієнт оборотності	2	2
Вартість продукції з урахуванням оборотності, тис. грн	740 600	753 720
Річний економічний ефект E , грн		13 120 000

Враховуючи (4.1)...(4.9) і дані таблиць 4.1...4.2, термін окупності проєкту при установці ПВГК на 10-ти силосах даного зерносховища буде:

$$T = (K^{од} + \mathcal{E}_T) / E = (560\ 000 + 51\ 600) / 13\ 120\ 000 \approx 15 \text{ днів.}$$

Потрібно враховувати, що оборотність зберігання зерна у зерносховищах рівна 2-ом, тому реальна окупність одночасно з прибутком буде досягнута не раніше ніж за 4-6 місяців.

Висновки по розділу

Піклування про збереження довкілля на зерносховищах здійснюється за допомогою впровадження системи екологічного менеджменту. Вона покликана: запобігати ліквідації вогнищ самозаймання; ефективно знепилювати усі технологічні вузли зерносховища; зводити до нуля викиди пилу і розсипи зерна при переміщенні зерновою по елеватору; запобігати можливим вибухам на зернових елеваторах; здійснювати заходи для зниження викидів пилу у

атмосферу та підвищувати ефективність роботи аспіраційних мереж та установок.

Основні вимоги до обслуговуючого персоналу зерносховищ: наявність відповідного спецодягу і респіраторів; регулярне проходження навчання та підвищення кваліфікації; працівники спускаються у силосні приміщення тільки у виняткових випадках через письмове розпорядження начальника цеху.

Вимоги до силосів: люки силосів повинні закриватися заслінками; у процесі відкриття службових лазів необхідне їх міцне оточення перилами, висотою не меншою ніж 1 м; якість повітря повинна регулярно перевірятися; випускаючі воронки, що подають зернову масу потрібно забезпечити горизонтальними решітками; аспіраційне повітря мереж необхідно очищувати за допомогою циклонів або фільтрів.

Обладнання, механічні пристрої, виробничі апарати, самопливні транспортні засоби та інші пристосування зерносховищ повинні бути розміщені так, щоб їх монтаж, ремонт і обслуговування були безпечними та зручними.

Розрахунок річного економічного ефекту від модернізації зерносховища за рахунок установки у 10-ти силосах розробленого ПВГК показав високу його ефективність і окупність на протязі 4-6 місяців. Це відбувається за рахунок більш обережного завантаження зерна у силоси і відповідно меншого його травмування. Така модернізація дає змогу зберігати зерно більш високої якості та особливо цінний насіннєвий матеріал, що є більш економічно вартісним.

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

1. Проведений аналіз існуючих технічних пристроїв і засобів завантаження силосів зерновим матеріалом, а також наявних відповідних теоретичних та практичних досліджень дозволив провести їх загальну класифікацію та показав, що незважаючи на значну кількість наукових досліджень, присвячених питанням травмування зерна під час його завантаження у силос, проблема досі залишається актуальною і не до кінця вирішеною. Існуючі технічні пристрої і засоби завантаження силосів зерновим матеріалом, а також наявні теоретичні аналітичні моделі та практичні дослідження, не в повній мірі задовольняють потреби виробництва. Зокрема, недостатньо освітлена проблема регулювання, контролю та зменшення швидкості руху зерна під час виконання операції його завантаження у силоси.

2. Згідно із проведеними дослідженнями представлено та обґрунтовано теоретичну модель швидкості руху зерна по гвинтовій лінії із двома змінними кутами. Модель дає змогу знаходити швидкість руху зерна у будь-який момент часу, враховує висоту отвору бункера від краю розгінної ділянки та залежність між кутами нахилу спіралей розгінної та гальмівної ділянок. Наведено співвідношення, що визначає час за якого зерно переходить із розгінної до гальмівної частини гвинтового каналу, а швидкість досягає максимального значення.

3. Окремо виведено залежність між кутами розгінної та гальмівної частини гвинтового каналу, що забезпечує проходження зерна без його згруження на будь-якій ділянці пристрою та водночас запобігає травмуванню зернової маси за рахунок контрольованого зменшення кінцевої швидкості.

4. Досліджено основні параметри аналітичної моделі швидкості руху зерна у відкритому гвинтовому каналі із двома змінними кутами нахилу. Запропонована аналітична модель враховує радіус та висоту силосу, кути нахилу розгінної та гальмівної ділянок гвинтового жолоба, кількість витків спіралей, початкову швидкість зерна, а також коефіцієнт тертя-ковзання між зерною масою та поверхнею жолоба.

5. На основі наведеної теоретичної моделі запропонований периферійний відкритий гвинтовий канал. Пристрій запобігає травмуванню зерна завдяки наявності в ньому одночасно розгінної і гальмівної гвинтової ділянки з двома різними кутами нахилу витків спіралі до горизонту. Для даного каналу встановлено взаємозв'язки між його ключовими параметрами, зокрема обґрунтовано значення рекомендованих кутів $41^\circ \dots 45^\circ$ для розгінної та $39^\circ \dots 35^\circ$ для гальмівної ділянок відповідно, а також відношення між висотою отвору бункера та радіусом силосу не менше $0.6 \dots 0.7$.

6. Статистичний аналіз експериментальних даних та значень залишків кінцевої швидкості сходу зерна вказує на достатній рівень та точність проведених досліджень. Однорідність дисперсій досліджень, коефіцієнт множинної кореляції експериментальних та теоретичних даних кінцевої швидкості $R=0,998$, середня відносна похибка залишків $9,85\%$ та їх нормальний розподіл свідчать про адекватність розробленої моделі. Співставлення теоретичних та експериментальних значень максимальної та кінцевої швидкості руху озимої пшениці вологістю 14% за величиною відносних похибок вказує на прийнятно високий рівень точності розробленого експериментального зразка ПВГК. Відмінність отриманих результатів не перевищує 12% , що дає можливість застосування моделі та ПВГК для подальших дослідницьких цілей.

7. Розрахунок річного економічного ефекту від модернізації зерносховища за рахунок установки у 10-ти силосах розробленого ПВГК показав високу його ефективність і окупність на протязі $4 \dots 6$ місяців. Це відбувається за рахунок більш обережного завантаження зерна у силоси і відповідно меншого його травмування. Така модернізація дає змогу зберігати зерно більш високої якості та особливо цінний насіннєвий матеріал, що є більш економічно вартісним. Перспективами подальших досліджень є вивчення доцільності розробки ПВГК з трьома різними кутами нахилу, а також дослідження потреби виготовлення ПВГК з різних матеріалів, залежно від їх фрикційних властивостей.