

**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: «Дослідження процесу випуску зерна із бункера з боковим випускним отвором»

Виконав: здобувач вищої освіти  
за освітньо-професійною програмою  
Технології і засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва

назва ОПП

спеціальності 208 Агроінженерія

код та найменування спеціальності

ступеня вищої освіти «магістр» групи 3

Чуб Р.В.

прізвище та ініціали здобувача вищої освіти

Керівник: к.т.н, професор Арендаренко В.М.

прізвище та ініціали керівника

Рецензент: к.т.н., доцент Харак Р. М.

прізвище та ініціали керівника рецензента

**Полтава – 2022 року**

## ВСТУП

На сучасному етапі розвитку сільськогосподарського виробництва існує необхідність у підвищенні пропускної здатності зерноочисних агрегатів з дотриманням всіх агротехнологічних вимог до очищеного зерна. Для вирішення цієї задачі необхідно сучасні методи по оптимізації як окремих вузлів і агрегатів так і технологічних ліній в цілому.

Більшість сільськогосподарських процесів пов'язані із транспортуванням, переробкою і зберіганням сипких матеріалів. Для зберігання сипких матеріалів використовуються різноманітні по розмірам і формою бункери. Широке розповсюдження отримали бункери з боковим випускним отвором, наприклад, в повітряних і решітчастих сепараторах, дозуючих пристроях, млинах і т.п. Ці бункери, у порівнянні з симетричними отворами в бункерах, досить легкі у керуванні.

В технологічних лініях подібні бункери повинні забезпечувати рівномірну подачу сипкого матеріалу по всій довжині випускного отвору, що виконати досить важко. Також нерідко необхідно регулювати швидкість витікання із щілинних бункерів сипкого матеріалу для підбирання оптимального режиму роботи агрегату. В сучасних умовах підвищення рівномірного вивантаження сипкого матеріалу і регулювання швидкості витікання можливе двома способами:

- використання різних збуджуючих пристроїв руху зерна в бункерах – шнеків, вібраторів, встановлені всередині бункерів різного виду живильних валиків;
- визначення раціональної форми щілинного випускного отвору бункерів, та його конструктивних розмірів.

У більшості випадків другий спосіб являється найкращим, тому що він виключає необхідність у створенні додаткового обладнання і не потребує значних енерговитрат. Також при мінімальних механічних діях на зерно його травмування зводиться до мінімуму.

**Ціль досліджень:** підвищення рівномірності вивантаження зернового матеріалу із бункерів з боковим випускним отвором, шляхом оптимізації форми випускного отвору бункера.

**Задачі дослідження:**

- провести аналіз робіт по дослідженню вивантаженні сипучих тіл із бункерів;
- провести аналіз робіт по використанню бункерів з боковим випускним отвором в сільському господарстві;
- розробити теоретичні передумови по обґрунтуванні мінімальної висоти бокового прямокутного щілинного випускного отвору бункера;
- визначити роботу, яка витрачається на подолання сил тертя зернового матеріалу;
- встановити взаємозв'язок між параметрами бункера з прямокутною формою випускного отвору і рівномірністю вивантаження зернового вантажу;
- провести лабораторну і виробничу перевірку і визначити економічну ефективність використання бункера з боковим випускним отвором раціональної форми;
- розробити заходи з охорони праці та екологічної безпеки при роботі з бункерами у яких випуск зернового вантажу відбувається через боковий вивантажувальний отвір.

**Об'єкт дослідження** – робочий процес витікання зернового матеріалу із бункера обладнаного боковим випускним щілинним отвором

**Предмет дослідження** – аналітичні і експериментальні залежності вивантаження зернового вантажу із бункерів з боковим випускним отвором під дією гравітаційних сил.

**Методика досліджень** – теоретичне дослідження процесу вивантаження зернового матеріалу оснований на основних положеннях теоретичної механіки, теорії машин і механізмів, гідравліки і механіки сипучих матеріалів. Проведення експериментальних досліджень в лабораторних умовах

здійснювалось з використанням стандартних методик. Результати досліджень оброблялись з використанням комп'ютерних програм.

**Теоретична значущість** – представлена теоретична модель яка встановлює мінімальну висоту випускного отвору, при якому починається сталий витік зернового матеріалу, з урахуванням геометричних параметрів бункера і фізико-механічних властивостей зерна. Обґрунтована методика визначення раціональної форми щілинного випускного отвору бункера, який забезпечить рівномірне по всій довжині випускного отвору вивантаження.

**Практична значущість** – обґрунтована конструкція і розроблений бункер з раціональною формою випускного отвору, який забезпечує рівномірну і стале вивантаження зернового матеріалу. По результатам досліджень виготовлений дослідний зразок бункера з боковим випускним отвором.

# 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМКУ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 1.1 Огляд і аналіз робіт по дослідженню розподілення тиску в сипких матеріалах

В 18 – столітті Coulomb опублікував статтю о розподіленні тиску в силосах [1]. Його гіпотеза базувалась на тому, що тиск в силосі змінюється пропорційно його висоті, але ця гіпотеза не відповідає експериментальним даним. Подібні питання в свій час рішались і в механіці гірничої промисловості.

В 1867 р. П Шульц запропонував теорію тиску сипучих тіл на дно бункера. Він розглядав зерновий матеріал на виході випускного отвору у вигляді зігнутої балки або пружної плівки. Основним недоліком в його теорії було те, що при визначенні тиску на дно бункера він ігнорував взаємодію зернових частинок одна з одною.

Перші досліді по визначенню сил тиску зернового матеріалу на дно і стінки бункера в залежності від висоти насипного шару провів французький вчений А.Е. Делакроа. Всі досліді він проводив на виробничих бункерах. Експерименти показали, що тиск в бункерах при постійному засипанні їх зерном росте подібно гідростатичному тиску, досягаючи свого деякого значення граничної висоти засипки. Подальший ріст тиску знижується до певної величини, після цього він залишається практично не змінним.

М. Фрід [2] вперше експериментально попитався визначити тиск зернового матеріалу на бокові поверхні бункера. Він створив декілька моделей силосів і заповнив їх зерном і за допомогою поршня і рідинних манометрів визначив тиск на дно і стінки бункера. В своїх експериментах Фрід М. встановив, що сила тиску на дно силосу значно менша ваги зерна у ємності, але він не зміг пояснити залежність впливу висоти засипки сипучого матеріалу в бункері на його дно і стінки.

Н. Jansen [3] в 1895 р. розглядаючи безкінечно малий шар зернового матеріалу в бункері, який знаходиться на деякій висоті  $x$  від верхньої поверхні сипучого матеріалу, отримав вираз для визначення вертикального тиску зернового матеріалу в ємності на глибині:

$$P_y = \frac{\rho \cdot g \cdot S}{f \cdot L} \left[ 1 - e^{-\frac{c \cdot L \cdot x}{s}} \right], \quad P_x = \frac{\rho \cdot g \cdot S}{c \cdot L} \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{c \cdot L \cdot x}{s}} \right], \quad (1.1)$$

де  $P_x$  – тиск сипкого матеріалу в середині труби на глибині  $x$ , Па;  $P_y$  – тиск сипкого матеріалу в середині труби на глибині  $y$ , Па;  $\rho$  - щільність сипкого матеріалу, кг/ м<sup>3</sup>;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $S$  – площа поперечного перерізу ємності, м<sup>2</sup>;  $L$  – периметр поперечного перерізу ємності, м;  $C$  – безрозмірний коефіцієнт пропорційності.

Таким чином Янсен теоретично пояснив досліди М.Фріда і А. Делаacroa. Але у формулах не враховувались фізико-механічні властивості зернового матеріалу. Крім того, безрозмірний коефіцієнт пропорційності  $C$  потребує додаткового експериментального визначення.

Н.В. Сорокін [2] удосконалив формулу Янсена для випадку, коли бункер заповнений пошарово різномірним зерновим матеріалом. В своїй роботі [5] він узагальнив формулу Янсена і визначив силу тиску в силосах із змінним перерізом.

В 1968 році Л.В.Гячев [1] у своїй монографії розглядав двомірний випадок безкінечно довгих циліндрів. Він встановив зв'язок вертикальних і горизонтальних тисків. Але результати теоретичних досліджень мали велику розбіжність з експериментальними даними.

П.Н. Платонов, А.П. Платонов [4] виконували експерименти по визначенню тиску зернового матеріалу в симетричних бункерах. В своїх дослідках автори враховували коефіцієнт щільності, який визначався як відношення об'ємної маси сипучого матеріалу до його питомої ваги. Їм вдалося встановити залежність коефіцієнта щільності від висоти засипки.

Одними з перших, хто при визначенні тиску в ємностях стали враховувати явище склепіння були автори, які вивчали виробки гірничих сипучих порід.

В роботі [5] автори, враховуючи уявлення об статично нестійкому склепінні, експериментально узагальнили формулу Янсена для визначення тиску сипучого матеріалу на стінки бункера.

$$P = 1,22 \cdot C \cdot k \cdot P_0, \quad (1.2)$$

де  $k$  – коефіцієнт випуску, який дорівнює відношенню діаметра ймовірного склепіння до діаметра зерна;  $P_0$  – тиск, визначений по формулі Янсена, Па.

Складність практичного використання цієї формули заключається в трудності визначення коефіцієнта випуску.

Із виконаного аналізу по розподіленню тиску сипких матеріалів в ємностях можна зробити висновок про те, що виконані теоретичні і експериментальні дослідження на даний час мають велику кількість емпіричних коефіцієнтів, які не в повній мірі відображають характер і фізико-механічні властивості сипучого матеріалу, впливаючи на процес його випорожнення із бункера.

## **1.2 Огляд і аналіз робіт по дослідженню вивантаження сипкого матеріалу із бункерів**

Більшість виробничих процесів безпосередньо пов'язані з витіканням сипучих матеріалів. При проектуванні технологічних ліній до складу яких входять бункери, часто важко попередньо оцінити швидкість витікання зернового матеріалу. Незважаючи на те, що процес витікання сипучих матеріалів відомий досить давно, але навіть до теперішнього часу закони витікання сипучих матеріалів повністю не вивчені. В основному це пов'язано із складністю математичного опису руху зернового потоку в бункерах. Це пов'язано з меншим практичним використанням подібних бункерів по відношенню з осі симетричними. На характер випорожнення бункера впливає вид витікання зернового матеріалу. Розглянемо їх більш детальноше.

Нормальне витікання спостерігається тоді, коли частинки сипучого матеріалу рухаються безперервно по всьому об'єму, при цьому вільна поверхня являє собою воронку, центр якої зміщений ближче до передньої стінки бункера

(рис. 1.1,а). Сипучий матеріал у зоні дотику днища бункера і задньої стінки утворює застійну зону. По експериментальним даним В.Д. Варсанофьва нормальний вигляд витікання виникає в стаціонарних бункерах, стінки якого мають кут нахилу до горизонту  $\alpha = 45^{\circ} \dots 55^{\circ}$ , відповідно такий кут нахилу в бункерах з боковим випускним отвором має дно [ 6 ].

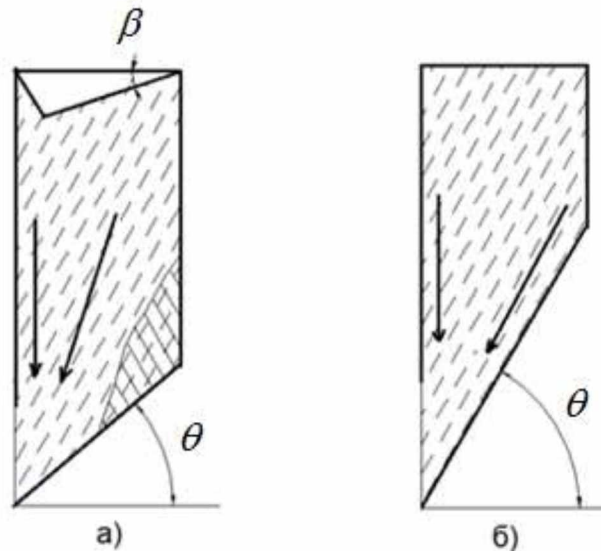


Рисунок 1.1 – Можливі види витікання сипучого матеріалу

Гідравлічний витік спостерігається, тоді коли частинки сипучого матеріалу рухаються рівномірно по всьому об'єму (рис.1.1, б), при цьому вільна поверхня рухається в одній площині і не утворює воронку. Застійна зона у такому виді витікання не утворюється, що дає можливість випорожнити увесь зерновий матеріал, який знаходиться у бункері. Такий вид витікання з'являється в бункері, якщо днище бункера має кут нахилу до горизонту  $\theta \geq 60^{\circ}$ . Проте об'єм таких бункерів значно менший, ніж при нормальному витіканні.

Як правило, в заповнених бункерах в момент відкриття випускного отвору спостерігається нормальний вид витікання, потім зона руху частинок розширюється, утворюючи обрушення сипучого матеріалу по всьому об'єму. В подальшому утворюється гідравлічний вид витікання. В чистому вигляді нормальний або гідравлічний види практично не зустрічаються, але вони завжди існують разом, утворюючи змішаний вид витікання. Змішаний вид витікання відбувається в комбінованих бункерах з переходом гідравлічного виду витікання в нормальний або навпаки.

Який би не був вид витікання зернового матеріалу, його швидкість, витрата і тиск на стінки і дно бункера мало залежить від висоти засипання сипучого матеріалу.

На стадії проектування бункерних установок необхідно звернути увагу на деякі особливості процесу вивантаження:

- при утворенні в бункерній установці статично стійких склепів витікання зернового матеріалу не відбувається;
- необхідна швидкість витікання сипучого матеріалу може не досягти свого значення в результаті утворення в середині бункера склепінь;
- вплив зовнішнього тертя зі сторони бокових стінок бункера може визвати нерівномірне вивантаження зернового матеріалу по ширині випускного отвору.

При правильному проектуванні бункерів подібні явища можна усунути.

При нормальному виді витікання утворюються застійні зони у місцях сполучення задньої стінки бункера і днища. Це сприяє злипанню зернового матеріалу і погіршує процес випорожнення бункера.

При гідравлічному виді витікання в момент відкриття заслінки випускного отвору увесь зерновий матеріал приходить в рух, і утворення застійних зон не відбувається.

В останній час стали використовувати гіперболічні днища бункерів. Подібні днища зменшують вплив склепінь на процес вивантаження зернового матеріалу і підвищують їх продуктивність.

В гіперболічних випускних воронках коефіцієнт звуження потоку залишається величиною постійною, а це, в свою чергу, зменшує опір стінок. Із збільшенням глибини зернового матеріалу, який знаходиться у бункері, його вертикальний тиск збільшується нелінійно і прагне до деякого постійного значення. Це значення досить мале, щоб визвати ущільнення матеріалу і утворенню склепінь [7].

Дослідженнями встановлено, що при відкритті заслінки випускного отвору бункера в рух приходить тільки деякий об'єм зернового матеріалу, який

обмежений стінками бункера і поверхнею ковзання, яка складається із нерухомих частинок самого сипкого матеріалу. Також було встановлено, що в момент відкриття заслінки випускного отвору бункера порушується рівновага сипкого матеріалу. Якщо склепіння нестійке, то воно руйнується, коли випадають центральні частинки зерен. Після руйнування першого склепіння всі вище розміщені склепіння починають руйнуватися один за одним.

В роботі [8] наведені дані про процеси руху сипкого матеріалу в бункері з вертикально розміщеним боковим випускним отвором, разом з подрібненням і змішуванням комбікормів. Дослідами було встановлено, що на початку витікання утворюється еліпсоїд подвійного руху, який підтримує постійний процес витікання зернового матеріалу. Основний недолік цієї роботи є те, що досліджувався тільки бункер із плоским днищем, що неминуче веде до утворення застійних зон і не повному випорожненню бункера.

Витік зернового матеріалу може припинитися, якщо:

- мінімальна висота випускного отвору буде менша висоти статично стійкого склепіння;
- відношення висоти випускного отвору до умовного діаметра зернівки буде менше критичного значення висоти статично стійкого склепіння;
- мінімальний переріз потоку бункера (перпендикуляр від верхньої кромки випускного отвору до днища бункера) буде менше висоти мінімального зводоутворюючого розміру;
- кут нахилу днища бункера менше кута природного відкосу сипучого матеріалу або менше кута тертя по його днищу.

Механіку сипучих матеріалів вивчали багато вчених. Вони досліджували ті фактори, котрі значно впливають на витікання сипучих матеріалів із бункерів. Розглянемо вплив деяких із них на процес витікання зерна із бункерів.

В роботі [9] була розроблена формула для визначення вагової витрати сипкого матеріалу:

$$q = a \cdot D^b \cdot h^c, \quad (1.3)$$

де  $a, b, c$  – постійні величини;  $D$  – діаметр випускного отвору, м<sup>2</sup>;  $h$  – висота стовпа сипучого матеріалу, м.

На базі експериментальних даних Е. Хаген виявив залежність витрати сипкого матеріалу від діаметру випускного отвору, діаметра частинок і висоти стовпа сипучого матеріалу:

$$q = C \cdot (D - 2 \cdot d)^{2,5} \cdot h_c^{0,5}, \quad (1.4)$$

де  $C$  – постійний коефіцієнт, 1/с.

Р. Л. Зенков в роботі [10], застосовуючи закон збереження енергії, визначив швидкість витікання сипкого матеріалу:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot \xi / \rho}, \quad (1.5)$$

де  $\xi$  – нормальна напруга сипкого матеріалу в бункері, Н/м<sup>2</sup>.

В даній формулі не видно, як впливають параметри і режими роботи бункерного пристрою на швидкість витікання сипкого матеріалу.

В роботі [11] встановлено, що величина коефіцієнта тертя зернового по стінкам бункера впливає на його текучість. збільшення коефіцієнта зовнішнього тертя веде до збільшення текучості сипкого матеріалу. При цьому на величину кінематичного кута тертя впливає шорсткість поверхні стінки і фізико-механічні властивості сипкого матеріалу. Тому гладка поверхня не може привести до зменшення коефіцієнта а тертя сипкого матеріалу.

Невеликий кінематичний кут тертя у вертикальній стінці бункера сприяє виникненню великих тисків, що веде до збільшенню ймовірності утворенню склепінь, а шорсткі вертикальні стінки зменшують зводоутворення. Збільшення коефіцієнта тертя на бокових стінках допомагає розподілити вагу сипкого матеріалу на стінки бункера і зменшує ущільнюючого його тиску.

В деяких випадках процес витікання сипкого матеріалу описується законами гідравліки, але тиск рідини, що знаходиться в ємності (у відмінності від сипкого матеріалу), збільшується прямо пропорційно його висоті. Тому, характер витікання сипкого матеріалу із ємності відрізняється від характеру витіканню рідини із-за різних закономірностей розподілення тиску по висоті ємності. Щільність сипкого матеріалу улюбій точці ємності залежить

від тиску у даній точці. Для оцінки зміни ступеню щільності сипкого матеріалу в бункері важливо знати розподілення вертикального ущільнюючого тиску по висоті бункера і співвідношення між вертикальним і боковим тиском сипкого матеріалу.

Час витікання сипкого матеріалу різний і в основному залежить від розміру самих зерен, які приймають участь у витіканні. До цього висновку в своїх експериментах прийшов В.А. Бутковський [12]. Із зменшенням розмірів зернових частинок збільшується відносне ущільнення матеріалу, а шпаруватість зменшується. Відповідно, перед конструюванням бункерів необхідно знати фізико-механічні властивості самого матеріалу, котрий виходить із бункера.

В роботі [13] наведені результати по дослідженню процесу вивантаження зернового вантажу із бункерів з урахуванням його вологості, злежаності та інших фізико-механічних властивостей зернового матеріалу.

Р.В. Кірія в роботі [14] використавши рівняння Бернуллі в дослідженнях руху сипкого вантажу із бункера з боковим щілинним отвором. На основі візуальних досліджень процесу витікання сипкого матеріалу він виділив 4 зони: А, В, С, D, які відрізняються одна від одної структурно-механічним станом (рис.1.2).

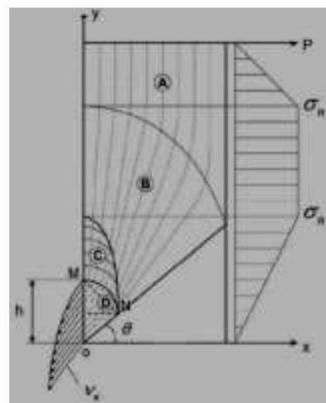


Рисунок 1.2 – Зони структурно-механічного стану сипкого вантажу при його витіканні із бункера з боковим щілинним отвором

Досліджуючи рух зернового вантажу він рахував, що сипкий вантаж у зонах А і В рухається так же як і в бункері з горизонтальним щілинним отвором. Частинки сипкого вантажу зв'язані між собою і рухаються з

постійною швидкістю паралельно стінкам бункера, не перетинаючи траєкторії один одного. Зона С - це зона виникнення динамічних склепінь. В зоні обрушення D зерно знаходиться у безперервному хаотичному русі, зіштовхуючись між собою.

Для випадку  $\delta > 50$  об'ємна витрата сипкого матеріалу визначається:

$$Q = k_d \cdot b \cdot a^{15} \cdot \sqrt{g}, \quad (1.6)$$

а середня швидкість витікання сипкого вантажу визначається як:

$$v_{cp} = k_d \cdot \sqrt{g \cdot a}, \quad (1.7)$$

де  $k_d$  – безрозмірний коефіцієнт,  $k_d = 0,3...0,38$ ;  $a$  – ширина випускного отвору, м;  $b$  – довжина випускного отвору, м.

Його дослідження були в області гірничодобувної промисловості, де діаметр, форма і питома вага сипкого матеріалу непорівнянна з сільськогосподарськими культурами. Відповідно, і використання отриманих залежностей до зернових матеріалів неприйнятне. Також не була визначена гранична висота насипного вантажу, яка впливає на швидкість його витікання.

На думку В.В. Денісова [15], інтенсивне утворення склепінь відбувається у зоні випускного отвору. Склепіння має дві точки опори: одна на днищі, а друга на торцевій стінці. Координати цих точок залежать від кута нахилу днища і характеристик сипкого матеріалу.

Він запропонував формулу для розрахунку максимальної висоти точки опори на торцевій стінці бункера:

$$h_{оп} = h_k \cdot r \cdot \tan(\beta), \quad (1.8)$$

де  $h_k$  – висота точки опори на торцевій стінці, м;  $r$  - радіус бункера, м;  $\beta$  – кут стріли склепіння, град.

Однак, кут стріли склепіння йому так і не вдалось визначити, тому, вираз (1.8) не можливо використовувати для практичного використання.

Подальшу роботу в цьому напрямку проводив І.І. Кононов. Він прийшов до висновку, що утворення склепінь між внутрішньою торцевою стінкою бункера і днищем відбувається пошарово в процесі зберігання зерна. Максимально стійкі склепіння знаходяться в зоні випускного отвору, а

мінімально стійкі – у верхніх шарах бункера. І.І Кононов визначив максимальну висоту верхнього зводуутворюючого шару:

$$h_{кр} = r \cdot \tan(\alpha) - A, \quad (1.9)$$

де  $\alpha$  – кут між днищем бункера і горизонталлю, град;  $r$  – радіус бункера, м;  $A$  – безрозмірний емпіричний коефіцієнт.

На його думку, мінімальна міцність опори склепіння знаходиться на торцевій стінці бункера. Відповідно, порушення склепіння може бути досягнуте підняттям кільцевого затвора вище точки опори склепіння. Однак це може привести до перевищення необхідної швидкості витікання сипкого матеріалу.

З проведеного огляду слідує, що процес вивантаження сипкого матеріалу із бункера впливають як його фізико-механічні властивості, так і ряд інших факторів, наприклад, характеристика зовнішнього середовища (температура повітря в приміщенні, вологість повітря, наявність вітру). Також немаловажними факторами, які впливають на процес вивантаження зернового вантажу являються геометричні параметри бункера. До таких параметрів відносяться кут нахилу стінок і днища бункера до вертикалі, розмір і форма випускного отвору, шорсткість стінок бункера. Тому в наступних розділах даної роботи розглянемо вплив геометричних параметрів бункера на процес вивантаження зернового матеріалу.

### **1.3 Класифікація і коротка характеристика існуючих бункерів**

Бункер – ємність, яка служить для тимчасового або постійного зберігання сипучих матеріалів, а також призначена для забезпечення незалежної роботи окремих вузлів технологічних ліній. Бункери розрізняють:

- по способу вивантаження. Вони бувають із примусовою (механічною) і гравітаційним вивантаженням. До останніх відносяться пристрої, в яких витікання насипного вантажу відбувається по нахиленій або вертикальній площині під дією власної сили ваги;

- по конструктивному виконанні: прості і складні. Прості бункери часто використовуються у сільському господарстві. Вони бувають різної форми: конусні, циліндричні, клиноподібні, параболоїдні, призматичні;

- по розміщенні в просторі: підвісні і підземні, заглиблені у ґрунт;

по способу дії: безперервної і періодичної. У першому випадку під час вивантаження бункера постійно підтримується одна висота засипки сипкого матеріалу за рахунок поповнення бункера. В другому випадку вивантаження відбувається не безперервно, а періодично при включенні вивантажувального пристрою;

- по типу встановлення: стаціонарні, полу стаціонарні (термін використання до 1,5 роки), рухомі

Стаціонарні бункери зазвичай завантажуються і вивантажуються самопливом. Для усунення утворення застійних зон при витіканні зернового вантажу кут нахилу стінок і дна бункера повинен бути більше кута, при якому відбувається самопливний рух вантажу.

Бункери повинні відповідати наступним вимогам: надійність завантаження і розвантаження, відсутності злипання сипкого матеріалу між собою і стінками бункера, мінімальне ушкодження сипкого вантажу.

У випадку злипання сипкого вантажу використовують вібраційні, пневматичні і ланцюгові пристрої.

Матеріалом для виготовлення бункерів являється листова сталь, залізобетон і дерево. В деяких випадках використовують дротяну сітку, всередині обтягнуту щільною тканиною.

Металеві бункери достатньо довговічні при зберіганні сипких вантажів. Вони мають відносно невелику масу і виготовляються на заводах індустріальним методом. Виготовлені стандартні деталі встановлюються на місці збирання. Проте при зберіганні вологих сипких вантажів стінки і днище бункера покриваються корозією, що прискорює знос бункера і збільшує коефіцієнт зовнішнього тертя.

Залізобетонні бункери використовують при зберіганні як сухих, так і вологих вантажів. Вони мають більшу довговічність, але вони вартісні у виготовленні і значно важчі від металічних.

Дерев'яні бункери використовуються досить рідко, тому що вони не довговічні і часто потребують ремонту.

Комбіновані бункери виготовляються із різноманітного матеріалу. Наприклад, для зменшення зношеності в дерев'яних бункерах на днище кладуть сталеві листи або у залізобетонному корпусі встановлюють залізне днище.

Об'єм бункера визначається режимом роботи технологічного процесу, а також об'ємом подачі із транспортного засобу. При необхідності підтримання безперервної подачі сипкого матеріалу встановлюють додаткові компенсатори.

Випускні отвори роблять різної форми: круглі, прямокутні, квадратні, щілинні, криволінійні. В бункері є затвор, котрий призначений для періодичного дозування сипкого вантажу і керуванням струменем зернового потоку.

Затвори повинні відповідати наступним вимогам: простота і надійність в конструкції і експлуатації, відсутність просівання сипкого вантажу при закритому затворі, недопущення само відкриття.

По типу приводу затвори бувають ручні і механічні з дистанційним керуванням. По способу дії затвори діляться на ті що відсікають потік вантажу і ті що створюють підпір. В бункерах з боковим випускним отвором часто використовують затвори що відсікають потік вантажу, у вигляді плоскої заслінки.

Таке різноманіття бункерів обумовлено різними задачами, які ставить сучасне сільське господарство. Вчасності, не дивлячись на простоту конструкції бункерів з боковим випускним отвором, використання їх буває дуже різноманітне. Під кожен задачу виробничого процесу необхідне і індивідуальне рішення. Тому для підвищення рівномірності вивантаження сипкого вантажу по всій довжині випускного отвору необхідно знати область використання подібних бункерів.

#### 1.4 Аналіз робіт по використанню бункерів з боковим випускним отвором

В сільському господарстві бункери з боковим випускним отвором дуже широко використовують. Вони використовуються як бункери накопичувачі, живильні в сепаруючих машинах, дозаторах і т. п.

Бункери – нагромаджувачі прямокутного перерізу з конусним дном типу БНКД 33, БНКД – 46, БНКД – 61 (рис.1.3) використовують як стаціонарні бункери безперервної дії.

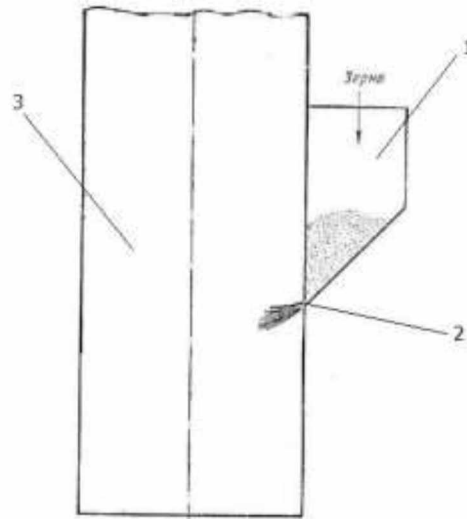


Рисунок 1.3 – Бункери – нагромаджувачі прямокутного перетину з конусним дном та боковим випускним отвором

Подібні бункери використовують під час збирання врожаю для тимчасового зберігання зернових культур, які в подальшому будуть направлені на до опрацювання або на довготривале зберігання. В них є заслінка з електроприводом.

Широке розповсюдження бункери з боковим випускним отвором отримали машини для очистки зернового матеріалу від домішок.

Розглянемо загальну схему доставки зернового матеріалу в пневмосепаруючий канал (рис.1. 4). Сипкий матеріал під дією гравітаційних сил із бункера надходить в пневмоканал, де під дією повітряного потоку відбувається розділення компонентів на фракції.

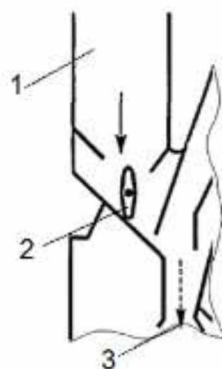


1 – бункер; 2 – випускний отвір; 3 – пневмоканал.

Рисунок 1.4 – Схема надходження зернового матеріалу в пневмосепаруючий канал

Встановлено, що при різній щільності зернового матеріалу який надходить до пневмосепаруючого каналу опір його не однаковий по глибині каналу. Максимальна величина опору в центральній частині каналу і збільшується в напрямку до його бокових стінок.

Для регулювання швидкості витікання і подачі зернового матеріалу в живильних бункерах встановлюють різні види регуляторів. На рис. 1.5 наведений такий регулятор [16].



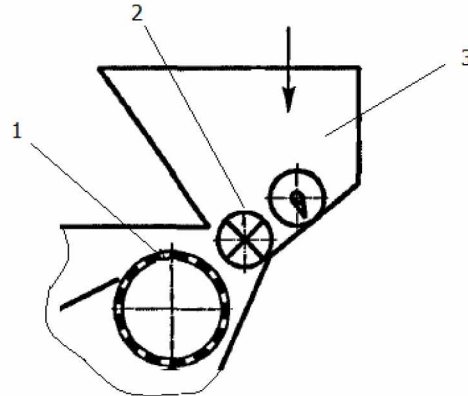
1 – приймальний пристрій; 2 – живильний валик; 3 – пристрій для подачі зернових фракцій

Рисунок 1.5 – Фракційний пневмосепаратор

Приймальний пристрій, оснащений живильним валиком, який забезпечує високу продуктивність і низьке травмування зернових культур. До недоліків

слід віднести невисокий коефіцієнт очистки зернового матеріалу від великих і малих домішок із-за недостатно досконалого регулювання подачі зернового матеріалу.

В пневмоінерційній машині ПВО-3ОМ дана проблема частково усунена (рис.1.6) [16].

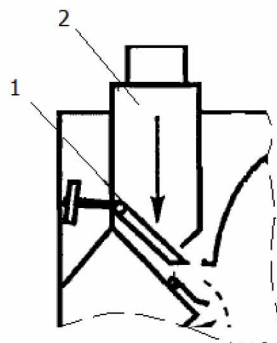


1 – циліндричне решето; 2 – живильний валик; 3 - бункер

Рисунок 1.6 – Пневмоінерційний очисник ПВО-3ОМ з гравітаційним живильником

До переваг такого живильного пристрою слід віднести те, що в ньому спрощена подача зернового матеріалу. Недоліком є те, що він має велику металоємність і великі габаритні розміри живильного пристрою.

Бункери з боковим випускним отвором [17] також знайшли примінення як живильники в повітряно-решітчастих сепараторах (рис. 1.7).



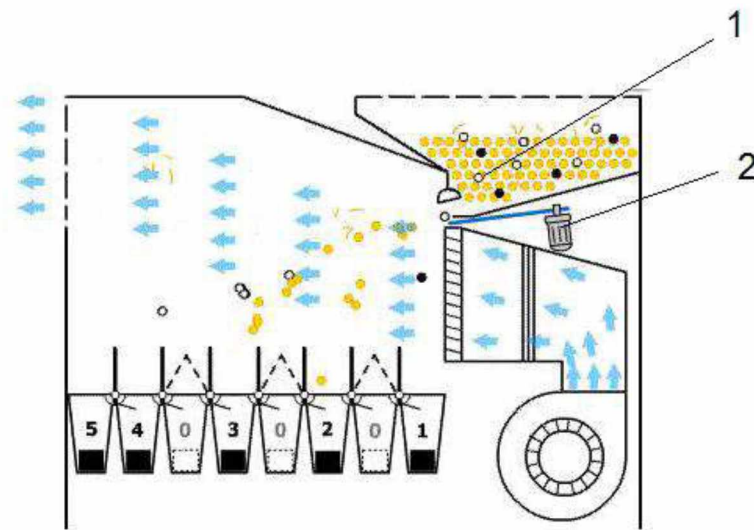
1 – живильна заслінка; 2 – бункер

Рисунок 1.7 – Повітряно-решітчастий сепаратор К-560А

Зерновий матеріал надходить в приймальний бункер і за допомогою живильної заслінки направляється у нахилений до горизонту

пневмосепарирующий канал. Перевага такого приймального пристрою заключається в тому, що він оснащений простим регулювальним механізмом подачі зернового матеріалу. Недоліками являються габаритні розміри і металоємність.

Найбільш розповсюдженим способом забезпечення рівномірності подачі зернового матеріалу вздовж всієї довжини випускного отвору являються різноманітні види вібраційних машин (рис. 1.8).

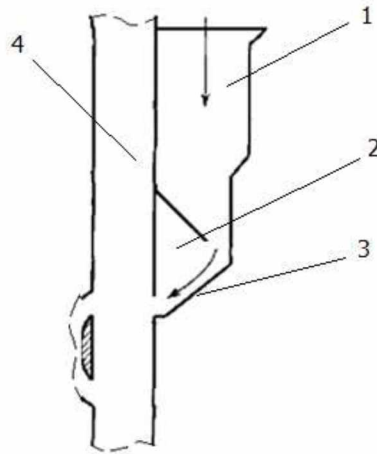


1 – бункер з боковим випускним отвором; 2 – вібропривід

Рисунок 1.8 – Схема аеродинамічного сепаратора АЛМАЗ

В даній машині для створення пневморідного стану сипкого матеріалу, а також можливості рівномірного випорожнення по всій довжині випускного отвору використовується вібропривід. Недоліком сепаратора являється встановлення в його технологічну схему додаткового вузла, що небажано так як необхідні додаткові енергозатрати.

На рис.1.9 наведена схема завантажувального бункера без використання додаткових пристроїв.



1 – завантажувальний бункер; 2 – живильний пристрій; 3 - скатна площа; 4 – вертикальний пневмосепарируючий канал.

Рисунок 1.9 – Живильний пристрій для пневмосистеми зерноочисної машини

Скатна дошка, в даному пристрої має горизонтальну ділянку, це поліпшує розшаруванні зернового матеріалу в пневмосепарируючому каналі і створює умови для рівномірної подачі зернового матеріалу по ширині даного каналу. Недоліком являється те, що наявність горизонтальної ділянки приводить до виникнення застійних зон. Це значно гальмує швидкість витікання на виході із випускного отвору і може не забезпечити необхідний кут входу зернового матеріалу в пневмосепарируючий канал для ефективною очистки.

Існують живильні пристрої в зерноочисних установках, в яких від рівномірності вивантаження зернового матеріалу по ширині випускного отвору залежить тривалість терміну служби вузлів агрегату які швидко зношуються. Так, в сепараторі типу АІ-БИС-100, призначеному для первинної очистки зернових культур (рис. 1.10) днище живильного бункера в центральній частині зношуються швидше, ніж на периферії.

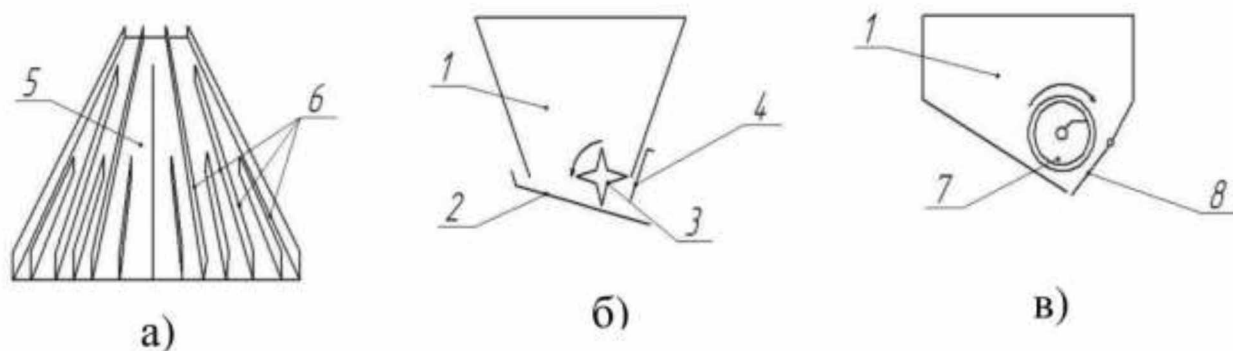
В подібних типах сепараторів такий знос пояснюється нерівномірним питомим тиском, який діє збоку зернового матеріалу на днище бункера. Оптимальним рішенням даної проблеми являється зміна форми щільного випускного отвору бункера. Проте рішення подібної задачі до теперішнього часу практично ніхто не займався.



1 – живильний бункер; 2 – заслінка; 3 – днище бункера; 4- розподільчий рукав.

Рисунок 1.10 – Бокова подача зернового матеріалу в сепаратор типу АІ-БИС-100

Провівши аналіз бункерів з боковим випускним отвором, можна виділити основні групи пристроїв які забезпечують рівномірне завантаження зерноочисних машин. На рис.1.11 представлені основні типи розподільчих пристроїв які використовуються у виробництві.



1 – бункер; 2 – віброуюча заслінка; 3 – живильний валик; 4 – заслінка; 5 – скатна поверхня; 6 – перегородка; 7 – шнек; 8 – Гравітаційний клапан

Рисунок 1.11 – Розподільчі пристрої: а) гравітаційної дії, б) примусової дії, в) комбінованої дії

Пристрій гравітаційної дії (рис.1.11,а) оснований на законі збереження і перетворення енергії [18]. При мінімальних механічних дій на зерно їх травмування зводиться до мінімуму.

Розподільчі пристрої примусової дії (рис.1.11,б) забезпечують рівномірне завантаження зерноочисних машин за рахунок рухомих робочих органів (шнеків, живильних валиків, віброкотків) [19]. Подібні пристрої забезпечують високу ступінь рівномірності подачі зерна, проте ймовірність травмування його досить висока.

В пристроях комбінованої дії використовуються робочі органи двох попередніх груп (рис.1.11,в). Розподілення зернового вороху робочими органами відбувається в середині бункерного пристрою, а подача в зерноочисну машину здійснюється під дією гравітаційних сил. Проте щоб уникнути травмування зерна, необхідно точно налаштувати силу і рівномірність притискання гравітаційного клапану.

Із проведеного аналізу випливає, що є багато сільськогосподарських агрегатів, де широко використовуються бункери з боковим випускним отвором. Основні складності, які зустрічаються при конструюванні подібних бункерів – це забезпечення необхідної швидкості витікання і рівномірності подачі сипкого матеріалу по всій ширині випускного отвору.

### **Ціль і задачі дипломної роботи**

*Ціль роботи:* підвищення рівномірності вивантаження зернових матеріалів із бункерів з боковим випускним отвором, шляхом раціональної форми випускного отвору бункера.

*Основні задачі роботи:*

- провести аналіз робіт по дослідженню вивантаженні сипучих тіл із бункерів;
- провести аналіз робіт по використанню бункерів з боковим випускним отвором в сільському господарстві;
- розробити теоретичні передумови по обґрунтуванні мінімальної висоти бокового прямокутного щілинного випускного отвору бункера;

- визначити роботи, яка витрачається на подолання сил тертя зернового матеріалу;

- встановити взаємозв'язок між параметрами бункера з прямокутною формою випускного отвору і рівномірністю вивантаження зернового вантажу;

- провести лабораторну і виробничу перевірку і визначити економічну ефективність використання бункера з боковим випускним отвором раціональної форми;

- розробити заходи з охорони праці та екологічної безпеки при роботі з бункерами у яких випуск зернового вантажу відбувається через боковий вивантажувальний отвір.

- зробити висновки та пропозиції на основі виконаної дипломної роботи.

## 2 МЕТОДИКА Й ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Модель сипкого зернового тіла

Модель сипучого зернового матеріалу можна представити, як суцільне середовище, в якому зернівки дуже малі з розмірами випускного отвору і мають пошарове укладання з деяким середньостатистичним кутом. Таке припущення дозволяє розглядати процеси з точки зору неперервності їх протікання, тобто витікання зернового матеріалу являється стаціонарним і до нього можна використати теорему про нерозривність потоку [20]. Ця теорема використовується, тоді коли розмір випускного отвору бункера перевищує максимальний зводуутворюючий розмір.

В процесі випорожнення бункера сипкий матеріал рухається у бік випускного отвору, при цьому частинки зернівок здійснюють переміщення відносно одна до одно, а також відносно всіх стін і днища бункера. Ці переміщення супроводжуються тертям частинок зерна між собою і об стінки бункера. При цьому тертя сипкого матеріалу може бути рідинним, сухим або граничним. В сільському господарстві найбільш часто зустрічаються сипкі матеріали, у яких тертя між частинками до граничного випадку сухого тертя при вологості зернового матеріалу в межах від 13% до 16%. В зв'язку з цим, одним із основних припущень моделі прийнято припущення про сухе тертя між зернівками, а також між зернівками і всіма стінками і днищем бункера (закон Кулона). Це емпіричний закон, він описує властивості сил сухого тертя:

- модуль сили сухого тертя спокою приймає значення від нуля до деякого свого максимального значення :  $0 \leq F_n \leq F_{max}$ ;

- модуль сили сухого тертя ковзання дорівнює максимальному значенню модуля сили сухого тертя спокою  $F_{ck} = F_{max}$ ; обумовлено це найбільшими швидкостями руху зернівок у об'ємі бункера;

- модуль сили сухого тертя ковзання пропорційний модулю сили нормального тиску:

$$F_{ck} = \mu \cdot N, \quad (2.1)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт сили сухого тертя, він не залежить від сили нормального тиску.

- вектор сили сухого тертя ковзання направлений в протилежну сторону вектора швидкості відносного руху зернівки  $V_{\text{від}}$ .

Сипкий матеріал, який знаходиться в бункері можна представити сипучим тілом з пошаровим укладанням зернинок. Розглянемо тепер таке укладання сипкого тіла в бункері (рис.2.1). Така укладка сипучого тіла складається із однакових абсолютно твердих пошарових зерен, які укладені правильними горизонтальними шарами [20].

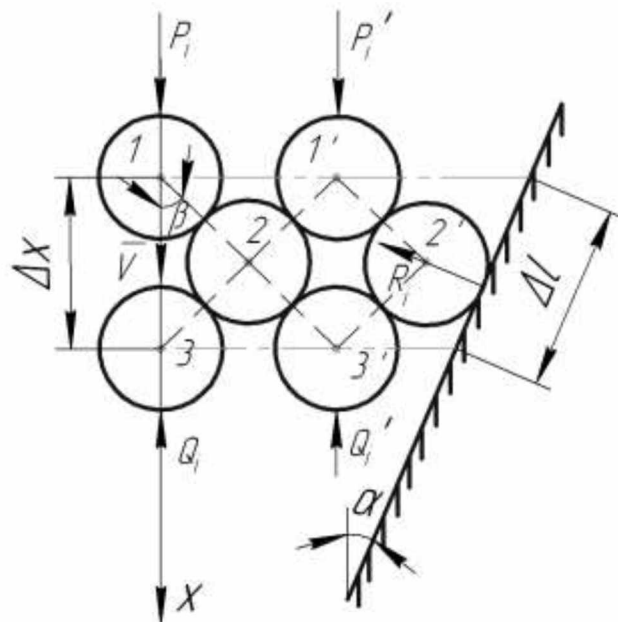


Рисунок 2.1 – Схема пошарового укладання умовних кульових зернівок

На рис.2.1 зображений дискретний елемент зернового матеріалу. Даний елемент складається із трьох шарів: ведучого, відомого і проміжного.

Ведучий шар складається із шарів 1, 1', тому що їх рух співпадає з напрямком прикладених до них зовнішніх сил  $P_i$ . Зовнішні сили опору  $Q_i$  направлені протилежно руху цього шару, відповідно шари 3 і 3' утворюють відомий шар, а 2 і 2' утворюють проміжний шар. У подібній системі шарів під час руху кожен шар ведучого шару буде скочуватися під дією вертикальних сил у заглиблення між шарами. Шар 2' буде постійно зміщуватись у бік осі  $X$ , і між ним і шарами 1' і 3' будуть виникати сили, які будуть направлені протилежно руху шару 2'.

У виділеному шарі всі зернові частинки знаходяться в контакті з зернівками які їх оточують, це означає, що кожна пара зернових частинок дотикаючись має свій певний кут укладання  $\beta$ , відповідно, і певне співвідношення осьового і бокового зусилля. Для елементарного об'єму це співвідношення являється певною величиною, яке відповідає уже якомусь середньому значенню кута  $\beta$ . Таким чином, найбільш ймовірний кут  $\beta$  є характеристикою механічної еквівалентності виділеного елементарного шару, притому його частинки утворюють з частинками які їх оточують один і той же кут  $\beta$ , рівний найбільш ймовірному куту укладання.

Під властивостями сипкого дискретного матеріалу необхідно розуміти здатність його зернівок під дією стискуючого зусилля вклинюватись в нижні шари зернівок, розсовуючи їх. При цьому виникають розпирні зусилля, які діють в напрямку, перпендикулярно стискаючому зусиллю. Якщо частинка не може вклинитись між суміжними зернами, тоді розпирні зусилля не виникають і тоді виникає безрозпирне дискретне середовище [20].

При закритому випускному отворі бункера щільність сипкого тіла прагне до свого граничного значення  $\rho_{max}$ . Це явище необхідно враховувати при визначенні середнього значення кута  $\beta$ .

Кут укладання – це середнє можливе значення кута укладання. Професор В.А. Богомягкий встановив величину цього кута в  $29^{\circ}40'$ . Кут  $\beta$  являється кутом, який утворює вертикальна вісь бункера і загальна нормаль проведена через центри шарів 1, 2 і 3 (див. рис.2.1).

Умовний діаметр зерен сипкого матеріалу  $d$  визначається за формулою [21].

$$d = k_{\phi} \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c}, \quad (2.2)$$

де  $k_{\phi}$  – коефіцієнт, який враховує форму зернівки;  $a$  – довжина зерна, м;  $b$  – ширина зерна, м;  $c$  – товщина зерна, м.

Коефіцієнт  $k_{\phi}$  враховує форму частинок реального зернового матеріалу відносно ідеальної кульової частинки. Він був визначений В.А. Богомягким (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Коефіцієнт форми деяких зернових матеріалів

Форма зернового матеріалу	Зерновий матеріал	Коефіцієнт спотворення форми $k_f$
Піраміда	Соняшник	0,96
Еліпсоїд	Пшениця	1,0
Просторовий клин	Кукурудза	0,98
Циліндр	Кормові гранули	1,15
Тетраєдр	Гречка	0,54

На рис. 2.2 показані лінійні розміри зернових культур.

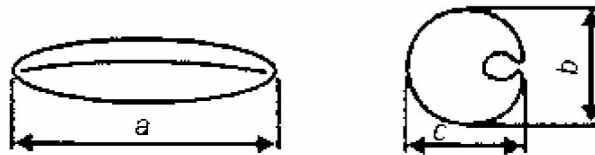


Рисунок 2.2 – Лінійні розміри зернових культур:  $a$  - довжина зерна,  $b$  – ширина зерна,  $c$  – товщина зерна.

Дослідами було встановлено, що у заповнених бункерах з боковим випускним отвором в момент відкриття заслінки випускного отвору відбувається динамічний удар. Внаслідок чого рух сипкого матеріалу в бік випускного отвору відбувається по всьому об'єму (гідравлічний вид витікання). Через деякий час в місці переходу днища і задньої стінки формується застійна зона, і сипкий матеріал, який розміщається уздовж торцевої стінки бункера, витікає раніше, утворюючи воронку (нормальний вид витікання). Це говорить про те, що в бункерах з боковим випускним отвором спостерігається змішаний вид витікання.

Експериментальні дані досліджень вказують на те, що під час опустошення бункера з боковим отвором відсутній обертальний рух зернівок сипкого матеріалу, що підтверджується дослідами і других робіт [22]. Це пояснюється тим, що внаслідок дискретності будови сипкого матеріалу граничні частинки потоку мають декілька точок дотику з частинками які її оточують, а деякі частинки – ще одну точку дотику з стінкою.

Експериментальні дані досліджень [23] вказують на те, що для любого сипкого матеріалу існує своя мінімальна висота випускного отвору, при якому розпочинається стійкий витік сипкого матеріалу. Якщо висота випускного отвору менша мінімальної висоти, тоді в зоні випускного отвору утворюється стійке склепіння, що приводить до припинення витікання сипкого матеріалу із бункера.

В результаті проведеного аналізу була прийнята наступна модель сипкого тіла, яка має наступні властивості:

- зернова модель складається із кулькових зернівок, які укладені пошарово;
- переміщенню зерна перешкоджають сили внутрішнього і зовнішнього тертя;
- під час вивантаження зерна із бункера воно рухається тільки поступально, без здійснення обертового руху;
- щільність зернового матеріалу при опустошенні бункера не змінюється;
- для бункерів з боковим випускним отвором при висоті випускного отвору  $(7...15)d$  формуються динамічні склепіння, для зруйнування яких витрачається енергія гравітаційних сил;
- при висоті випускного отвору менше  $(3...7) d$  формуються статично стійкі склепіння, і процес витікання зерна із бункера припиняється.

Таким чином, при теоретичних дослідженнях явищ, які пов'язані з витіканням сипучих тіл, можна замінити це сипуче тіло з кінцевими розмірами частинок еквівалентним в механічному розумінні суцільним сипким середовищем. Це припущення дозволяє розглядати процеси, які відбуваються в сипких тілах, з точки зору дискретності їх протікання, що повністю підтверджується експериментальними дослідженнями [1].

## **2.2 Обґрунтування мінімальної висоти бокового прямокутного випускного отвору бункера**

На рис.2. 3 представлена схема розміщення трьох шарів зерна в бункері з боковим випускним отвором.

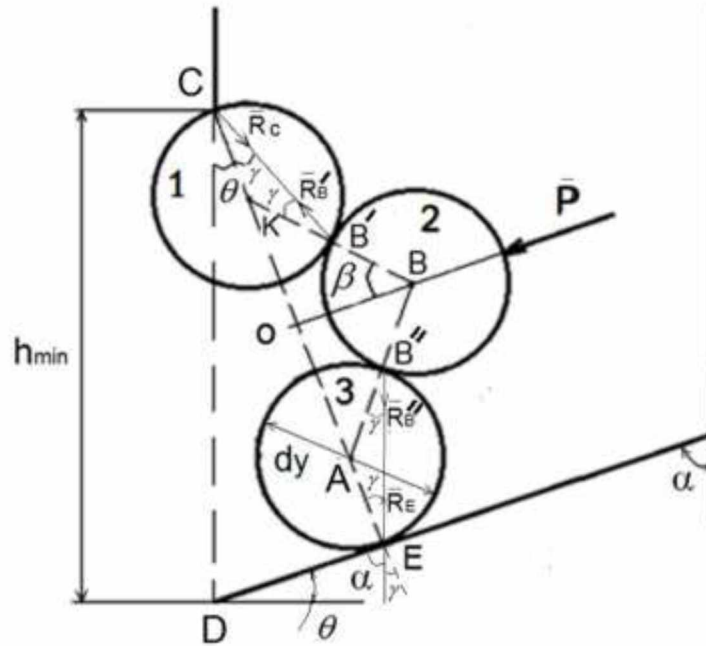


Рисунок 2.3 – Схема розміщення трьох шарів зерна в бункері з боковим випускним отвором

Інтенсивне утворення склепінь зерна відбувається в зоні випускного отвору. Склепіння має дві точки опори: одну на днищі, а другу на торцевій стінці. Чим ближче координати цих точок, тим вища і ймовірність утворення склепінь. Склепіння порушиться при втраті рівноваги кулі 1 або кулі 3. Умовою рівноваги шару 1 являється рівновага сил реакції  $R_c$  і  $R'_B$ , котрі прикладені в точках  $C$  і  $B'$  утворюючи при цьому два кути  $\gamma$ . Умовою рівноваги кулі 3 являється рівність сил реакції  $R$  і  $R''_B$ , які прикладені в точках  $C$  і  $B''$ . Кут  $\gamma$  це кут між мінімальним перерізом бункера  $AE$  і реакціями  $R_c$  і  $R'_B$ , які виникають від дії стискаючого зусилля  $\bar{P}$ .

В зв'язку з прийнятим припущенням, що обертання зерна не відбувається, можна прийняти значення для сил сухого тертя у відповідності з законом Кулона. Відносне ковзання зернівок можливе, якщо виконується нерівність  $\beta \geq \psi \leq \gamma$  або  $\beta \geq \varphi \leq \gamma$  [24].

Розглянемо рівнобедрений трикутник  $KBA$  (рис.2.3) у якого висота  $OB$ . Сторони  $KB$  і  $BK$  рівні умовному діаметру кулі  $d$ . Сторона  $KO$  визначається як  $KO = d \cdot \sin \beta$ , тоді сторона трикутника  $KA$  буде  $KA = 2 \cdot d \cdot \sin \beta$ . Виходячи із цього, можна знайти мінімальний поперечний переріз потоку зернового

матеріалу  $CE$ .  $CE = d \cdot (2 \cdot \sin \beta + 1)$ . Знаючи  $CE$  визначимо мінімальну висоту випускного отвору в метрах.

$$h_{min} = d_y \frac{(2 \cdot \sin \beta + 1)}{\cos \theta}, \quad (2.3)$$

де  $\beta$  – кут укладання зернового матеріалу, градус,  $\theta$  – кут між днищем і горизонталлю, градус,  $\alpha$  – кут між днищем і вертикальною лінією, градус.

З рис.2.2 видно, що кут  $\theta$  залежить від кута  $\gamma$ . Наприклад, при збільшенні  $\theta$  кут  $\gamma$  збільшується і рівновага диску 3 може бути порушена. Визначивши кут  $\theta$  і підставивши його у формулу (2.3) визначимо мінімальну висоту випускного отвору при різних співвідношенні кутів  $\psi$  і  $\varphi$  та для склепіння яке складається із трьох зерен для  $(h/d)_3$ .

$$h_{min} = d_y \frac{(2 \cdot \sin \beta + 1)}{\sin(\beta + 2 \cdot \psi)} \quad \text{при } \psi \leq \varphi. \quad (2.4)$$

$$h_{min} = d_y \frac{(2 \cdot \sin \beta + 1)}{\sin(\beta + 2 \cdot \varphi)} \quad \text{при } \psi \geq \varphi. \quad (2.5)$$

У відповідності до (2.3) мінімальна висота випускного отвору, при якому почнеться стійке витікання зернового матеріалу, залежить від геометричних розмірів зернівок, кута укладання зерна і кута нахилу днища.

Підставивши у формули (2.4 і 2.5) реальні значення кутів  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $\beta$ , отримаємо приблизне значення висоти  $h$  до діаметра  $d$ . Величина  $(h/d) \approx 3 \dots 5$ .

В загальному випадку стійкий процес витікання зернового матеріалу із таких бункерів спостерігається в тому випадку, якщо висота прямокутної щілини « $h$ » буде більшою від найбільшого склепіння. Але для рішення цієї задачі необхідно знати – для якого виду витікання зернового матеріалу призначений бункер.

З проведених теоретичних досліджень встановлено, що мінімальна робоча висота « $h_{min}$ » (див. рис.2.3) щілинного прямокутного бокового випускного отвору залежить від розміру  $CE$ , він є самим вузьким перетином потоку зернівок перед виходом їх із вертикальної бокової щілини бункера. Якщо розмір  $CE$  не є статичним по відношенню до склепінь, то тоді висота « $h$ » щілини бункера також не являється статично склепіння утворюючою. Тому щілина буде робочою і буде дозувати зерновий матеріал.

### 2.3 Визначення роботи, яка іде на подолання сил тертя

Визначимо роботу сил тертя сипкого матеріалу об дно і кожну стінку бункера.

В роботі [1] наведена формула для визначення роботи на подолання сил зовнішнього тертя об вертикальні стінки бункера в Дж/м<sup>3</sup>.

$$A'_{\text{тр}} = \frac{S_1 \cdot \rho \cdot g}{P \cdot V} \cdot S_{\text{СТ}} \cdot \frac{l_n}{2}, \quad (2.6)$$

де  $S_{\text{СТ}}$  – площа стінки бункера, м<sup>2</sup>;  $P$  – периметр поперечного перетину бункера, м;  $l_n$  – пройдений шлях зерновим матеріалом, м.

Вираз (2.6) можна використати для всіх вертикальних стінок бункера. Складність тільки буде виключно у визначенні пройденого шляху зерновим матеріалом і площі стінок бункера.

Пройдений шлях зерновим матеріалом уздовж бокової стінки бункера  $h_1/2$ , а його площа буде складатись із площі прямокутника АВКМ і трикутника МКД (рис. 2.4). Площа прямокутника рівна  $b \cdot (h_1 - MD)$ , а трикутника  $0,5 b \cdot MD$ .

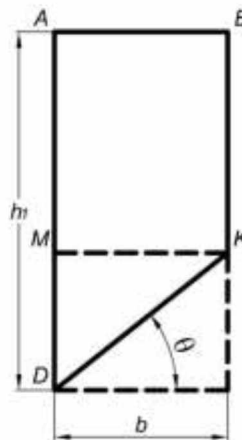


Рисунок 2.4 – Витікання зернового матеріалу із бункера з боковим випускним отвором

Знаючи кут нахилу днища  $\theta$  і ширину бункера  $b$ , визначимо  $MD$ .

$$MD = b \tan(\theta). \quad (2.7)$$

Відповідно площі трикутника МКО буде рівною:

$$S_{\text{тр}} = \frac{b^2 \cdot \tan(\theta)}{2}. \quad (2.8)$$

Площу прямокутника АВМК знайдемо за формулою:

$$S_{\text{АВМК}} = (b^2(h_1 - \tan \theta)), \quad (2.9)$$

Тоді робота на подолання сил зовнішнього тертя  $A_1$ , при змішуванні зернового матеріалу уздовж двох бокових стінок бункера з урахуванням (2. 9) і (2. 8) визначиться за формулою;

$$A_1 = \frac{S_1 \cdot \rho \cdot g}{2 \cdot P \cdot V} \cdot \left[ (b^2 (h_1 - \tan \theta)) + \frac{b \cdot \tan \theta}{2} \right] h_1. \quad (2.10)$$

Питома робота на подолання сил тертя  $A_2$ , при переміщенні зернового матеріалу уздовж задньої стінки бункера буде:

$$A_2 = \frac{S_1 \cdot \rho \cdot g}{2 \cdot P \cdot V} \cdot \left[ (a (h_1 - b \cdot \tan \theta)) + \frac{b \cdot \tan \theta}{2} \right]. \quad (2.11)$$

Питома робота на подолання сил тертя  $A_3$ , при переміщенні зернового матеріалу уздовж передньої стінки бункера визначається за формулою:

$$A_3 = \frac{S_1 \cdot \rho \cdot g \cdot a}{2 \cdot P \cdot V} (h_1 - h)^2. \quad (2.12)$$

Визначимо питому роботу на подолання сили тертя  $A_4$ , при переміщенні зернового матеріалу уздовж днища бункера:

$$A_4 = f \cdot \frac{\rho \cdot g}{k_3 \cdot V} \cdot a \cdot \left( \frac{b}{\sin(\alpha)} \right)^2 \cdot \cos \theta. \quad (2.13)$$

Коефіцієнт опору руху залежить від властивостей зернового матеріалу, а також від матеріалу, з якого виготовлені стінки бункера, і висоти засипки.

Коефіцієнт опору визначається за таким виразом [1]:

$$k_3 \approx \frac{\gamma}{\sigma} = \frac{P}{P_0 \cdot h_1}. \quad (2.14)$$

Значення коефіцієнта  $k_3$  були визначені Л.В. Гячевим. Результати їх наведені у додатку А.

Питома робота, яка іде на подолання сил зовнішнього тертя з боку бокових стінок і дна бункера, визначається шляхом додавання  $A_1 + A_2 + A_3 + A_4$ .

Тоді:

$$A_{\text{пит.}}^{\text{зов.}} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}{V}. \quad (2.15)$$

Загальна питома робота, на подолання сил тертя, визначається як сума сил опору внутрішнього і зовнішнього тертя:

$$A_{\text{пит.}} = A_{\text{пит.}}^{\text{вн.}} + A_{\text{пит.}}^{\text{зов.}}. \quad (2.16)$$

Питому роботу визначити досить складно, тому ми її визначимо як різницю між питомою роботою, котра витрачається на подолання сил тертя, і питомою роботою, затраченою на подолання сил зовнішнього тертя:

$$A_{\text{пит.}}^{\text{вн.}} = A_{\text{пит.}} - A_{\text{пит.}}^{\text{зов.}} \quad (2.17)$$

Таким чином, ми визначили питому роботу, яка іде на подолання сил тертя при переміщенні сипкого матеріалу уздовж всіх стінок і днища бункера з різними конструктивними параметрами бункерного отвору.

Знаючи питому роботу на подолання сил тертя, можна оцінити швидкість витікання зернового матеріалу із бункера з боковим випускним отвором.

## 2.4 Ціль і задачі експериментальних досліджень

Основна ціль роботи – виявлення закономірностей, які забезпечують рівномірне вивантаження зернового матеріалу по всій довжині випускного отвору бункера.

В зв'язку з цим ціллю експериментальних досліджень являлась перевірка результатів теоретичних досліджень, а також виявлення основних закономірностей процесу витікання сипкого матеріалу із бункера, який забезпечує стійке і рівномірно мірне вивантаження по всій довжині випускного отвору.

Основні задачі експериментальних досліджень:

- визначити необхідне число повторності дослідів при проведенні дослідів;
- виявлення впливу конструктивних параметрів бункерного пристрою на процес витікання сипкого матеріалу;
- виявити вплив конструктивних параметрів бункерного пристрою на рівномірність вивантаження зернового матеріалу по всій довжині випускного отвору;

оцінити адекватність теоретичних розрахунків раціональної форми щілиного випускного отвору, котрий би забезпечував рівномірне вивантаження зернового матеріалу по всій його довжині, а також провести лабораторні і виробничі випробування.

## 2.5 Обладнання яке використовувались при проведенні досліджень

При проведенні експериментальних досліджень були використані таке обладнання і прибори: бункер, електронний секундомір, цифровий фотоапарат; сушильна шафа, літровий мірний стакан, ящик для визначення рівномірності вивантаження сипкого матеріалу, штангенциркуль, персональний комп'ютер з пакетом прикладних програм.

Для збільшення точності вимірювання витікання зернового матеріалу із бункера використовувався електронний секундомір. На рис.2.5 показане місце установки електронного секундоміра, який починає відлік часу з моменту відкриття заслінки.



1 – кінцевий вимикач, 2 – кнопка «stop», 3 – електронний секундомір

Рисунок 2.5 – Лабораторна установка з секундоміром

Електронний секундомір 3 автоматично включається кінцевим виключати лем 1 в момент відкриття заслінки бункера. Після повного спустошення бункера час фіксувався кнопкою «stop». Дані по спустошенню бункера і час спустошення заносились у дослідний журнал.

Для візуальної фіксації процесів, які відбуваються у бункері використовувався цифровий фотоапарат.

Штангенциркуль використовувався при визначенні розмірів випускного отвору і розмірів зернівок сипкого матеріалу.

На рис. 2.6,а показана лабораторна установка. Установка являє собою модель бункера, дві бокові сторони якого виконані з скла (інші з листової сталі) для візуального спостереження процесів, які відбуваються в бункері. Фронтову рухому стінку можна зафіксувати на різних висотах бункера відносно його днища. Це необхідно для регулювання площі випускного отвору. Днище закріплено шарнірно із заднією стінкою, що дозволяє змінювати кут нахилу відносно горизонту. Під час дослідів встановлювались наступні кути нахилу стінок бункера: 20; 30; 37; 45; 53; 60<sup>0</sup>.



Рисунок 2.6 – Експериментальні установки

Установка на рис.2.6,б аналогічна попередній, за виключенням того, що із скла виконана одна бокова стінка бункерної установки. Крім того в ній можна змінювати площу випускного отвору за рахунок зміни ширини бокової стінки. Установка на рис.2.6,в має висоту 1 метр, що дозволяє досліджувати вплив висоти насипного шару зернового матеріалу на процес вивантаження.

Для визначення нерівномірності витікання зернового матеріалу по довжині випускного отвору використовувався ящик прямокутної форми, розділений на секції, рівного об'єму.

По всій висоті ящика нанесена шкала об'єму. Торцева стінка ящика виконана із скла. Після повного спустошення бункера через скло можна повне об'ємне вивантаження зернового матеріалу, яке приходить на кожну секцію ємності.

В якості сипких матеріалів використовували: пшеницю, соняшник, кукурудзу, просо вологістю від 13 до 16%.

### Підготовка до проведення досліджень

Кількість необхідного числа повторності дослідів  $n$  визначали по формулі [25].

$$n = \frac{t^2 \cdot \sigma^2}{(\Delta_{\text{від}} \cdot \bar{X})^2}, \quad (2.18)$$

де  $t$  – величина  $t$  – критерія Стьюдента;  $\sigma^2$  – дисперсія генеральної сукупності величини часу витікання;  $\Delta_{\text{від}}$  - задана відносна похибка;  $\bar{X}$  - середня арифметична величина часу витікання сипкого матеріалу по результатам дослідів.

При проведенні дослідів було прийнято, що  $t = 2,447$  при  $\alpha = 0,05$  (рівень значимості). Дисперсія  $\sigma^2 = 1,66$  (табл. 2.2), відносна похибка  $\Delta_{\text{від}} = 5\%$ . Середня арифметична величина часу витікання пшениці по результатам пробного дослідів  $\bar{X} = 38,7$ сек.

Підставивши ці дані у формулу (2.18) отримали:

$$n = \frac{2,447^2 \cdot 1,66^2}{(0,05 \cdot 38,7)^2} = 2,66$$

Виходячи з таких розрахунків, кількість повторень дослідів приймали  $n = 3$ .

Таблиця 2.2 – Час вивантаження пшениці із лабораторного бункера з боковим отвором по результатам пробного дослідів

№ дослідів	1	2	3	4	5	6	7	Сер. час	$\sigma^2$
Час витікання	38,7	38,4	37,4	41	38,0	39,7	37,5	38,7	1,66

### Методика обробки дослідних даних

Обробіток отриманих результатів дослідних даних проводили так.

Об'єм зернового матеріалу  $V$  знаходили по формулі:

$$V = \frac{m}{\rho}. \quad (2.19)$$

Швидкість витікання зернового матеріалу визначали за формулою:

$$v = \frac{V}{S_2 \cdot t}, \quad (2.20)$$

Витрата зернового матеріалу визначали за виразом:

$$q = \vartheta \cdot S_2. \quad (2.21)$$

Середнє значення вимірюваного параметра визначали по формулі:

$$\bar{q} = \frac{q_1 + q_2 + \dots + q_n}{n}, \quad (2.22)$$

де  $q_1, q_2, \dots, q_n$ , - результати окремих досліджень,  $n$  – число вимірювань.

Для нормального закону розподілення випадкових величин середнє значення квадрата відхилення випадкової величини від її середнього значення визначали за формулою:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n-1}, \quad (2.23)$$

де  $q_i$  – результат любого вимірювання.

Після знаходження дисперсії визначали середнє квадратичне відхилення:

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n-1}}. \quad (2.24)$$

Після цього визначали довірчий інтервал за формулою:

$$\Delta y = t_T \cdot \frac{S_i}{n-1}. \quad (2.25)$$

Для перевірки гіпотези про однорідність двох генеральних дисперсій використовувався критерій Фішера:

$$F_P = \frac{\sigma_{t1}^2}{\sigma_{t2}^2}, \quad (2.26)$$

де  $\sigma_{t1}^2$  – велика дисперсія;  $\sigma_{t2}^2$  - менша дисперсія.

## 3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Вплив фізико-механічних властивостей сипкого матеріалу на процес витікання зерна із бункера з боковим випускним отвором

Процес зберігання, транспортування завантаження і вивантаження зерна безпосередньо залежить від фізико-механічних властивостей насипного сипкого вантажу, від якого, в кінцевому рахунку, залежить і вибір конструктивних параметрів ємності. На гравітаційне витікання із бункерів впливає велика кількість факторів (рис. 3.1).

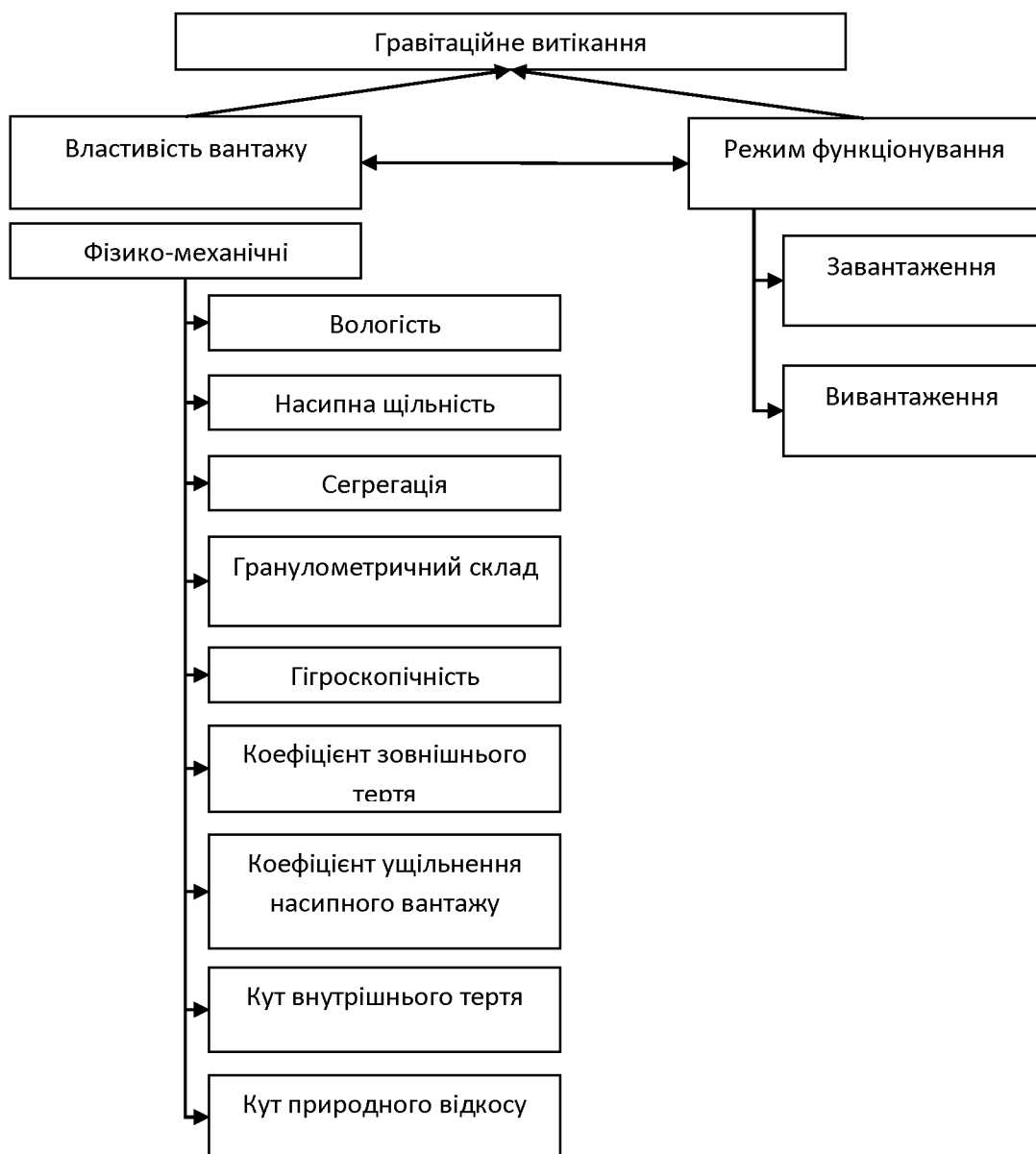


Рисунок 3.1 – Класифікація факторів, які впливають на гравітаційний витік сипкого вантажу із ємності

Визначимо властивості сипких матеріалів, які являються найбільш значимі і чинять суттєвий вплив на процес опустошення бункерного пристрою.

Вологість – відношення маси випаруваної води (після просушування) до початкової маси зернового матеріалу.

Гранулометричний склад насипного вантажу – це кількість розподілення частинок по крупності (розміру), яке визначається ситовим аналізом.

Насипна щільність визначається як відношення маси насипного вантажу до займаемого ним об'єму.

Кут природного відкосу – це кут, який утворений горизонтальною площиною і лінією відкосу насипного вантажу при вільному його зсипанні. Якщо кут природного відкосу має мінімальне значення (наприклад, зерна проса), то при опустошенні ємності рухомість його частинок буде максимальна.

Кут зовнішнього тертя – це мінімальний кут нахилу площини, при якому починається вільне скочування сипкого вантажу. Відповідно до цього мінімальний кут нахилу днища бункерного пристрою повинен бути більшим від кута зовнішнього тертя.

Для проведення дослідів були взяті зернові культури, фізико-механічні властивості яких наведені в таблиці 3.1. Вони були вирощені на полях ФГ Еко-Ленд Чорнобаївської ОТГ Черкаської області в 2021 році, наступних сортів : пшениця озима - Богемія, соняшник - Сенгента неома, кукурудза - ДКС 3969, просо - Левада.

Таблиця 3.1 – Фізико-механічні властивості зернових матеріалів

Зерновий матеріал	Середній діаметр зерен, мм	Кут зовнішнього тертя $\varphi$ , град.	Кут внутрішнього тертя $\psi$ , град.	Кут укладки $\beta$ , град.	Вологість зернового матеріалу, %	Щільність $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Пшениця	3,7	23,1	17,2	31	14,4	811
Соняшник	5,1	24,6	16,5	30	14,7	454
Кукурудза	7,5	22,5	18,3	29	15,6	783
Просо	2,7	21,2	16,1	32	15,0	780

Під час дослідів вологість повітря була 60%, максимальний об'єм засипаного зернового матеріалу – 0,03 м<sup>3</sup>.

Із аналізу табличних даних випливає, наступне, умовний діаметр частинок зернівок знаходиться в межах 2...8 мм, тому при дослідженні процесу витікання зернового матеріалу необхідно враховувати його дисперсійні властивості.

### 3.2 Вплив кута нахилу днища бункера з боковим випускним отвором на процес витікання зерна

В сільськогосподарських бункерах при випуску зернових існує три види витікання: нормальне, гідравлічне і змішане. Причому витікання в основному залежить від фізико-механічних властивостей сипкого матеріалу і конструкції бункерного пристрою (кута нахилу днища, висоти випускного отвору бункера, його геометричних розмірів і т.п.) Розглянемо більш детально вплив кута нахилу днища на процес витікання сипкого матеріалу.

Досліджувався зерновий матеріал, фізико-механічні властивості якого наведені в таблиці 3.1. Кути нахилу днища бункера до вертикалі приймали значення 25°, 30°, 37°, 45°, 53°, 60°. Відносна вологість повітря складала 63%, а температура повітря 21 ... 25°C.

На основі проведених досліджень були побудовані графіки залежностей витрати кукурудзи (рис.3.2) і соняшнику (рис 3.3) в залежності від часу витікання.

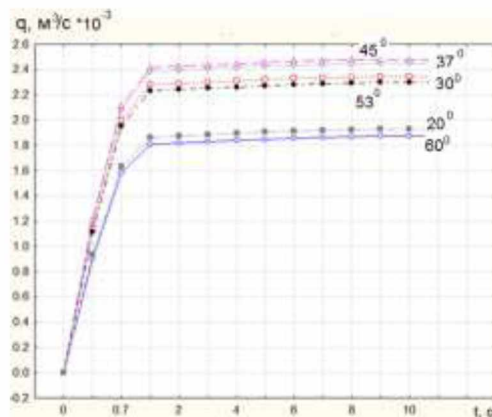


Рисунок 3.2 – Залежність витрати кукурудзи від часу витікання при  $V = 0,03 \text{ м}^3$ ,  $S_2 = 0,015 \text{ м}^2$  і різних значеннях кута нахилу днища  $\theta$ .

Встановлено, що в процесі витікання зернового матеріалу із бункера з боковим випускним отвором завжди спостерігається перехід із гідравлічного виду витікання в нормальний всіх досліджуваних матеріалів.

Із рис.3.2 видно, що при куті нахилу днища  $\theta = 45^\circ$  витрата кукурудзи має максимальне значення. Із зменшенням або збільшенням кута нахилу днища вона зменшується. Це обумовлено тим, що із збільшенням кута нахилу днища інерційні сили, які отримують зернівки в зоні випускного отвору, перевищують сили тертя, відповідно, витрата збільшується, досягаючи максимального значення при  $\theta = 45^\circ$ . Потім із збільшенням  $\theta$  переріз потоку зменшується, а ймовірність утворення склепінь збільшується, Це в свою чергу приводить до збільшення енергії, яка витрачається на руйнування склепінь, і як, наслідок зменшується масове вивантаження зернового вантажу. Рекомендований діапазон кута нахилу днища знаходиться в межах від  $30^\circ$  до  $50^\circ$ .

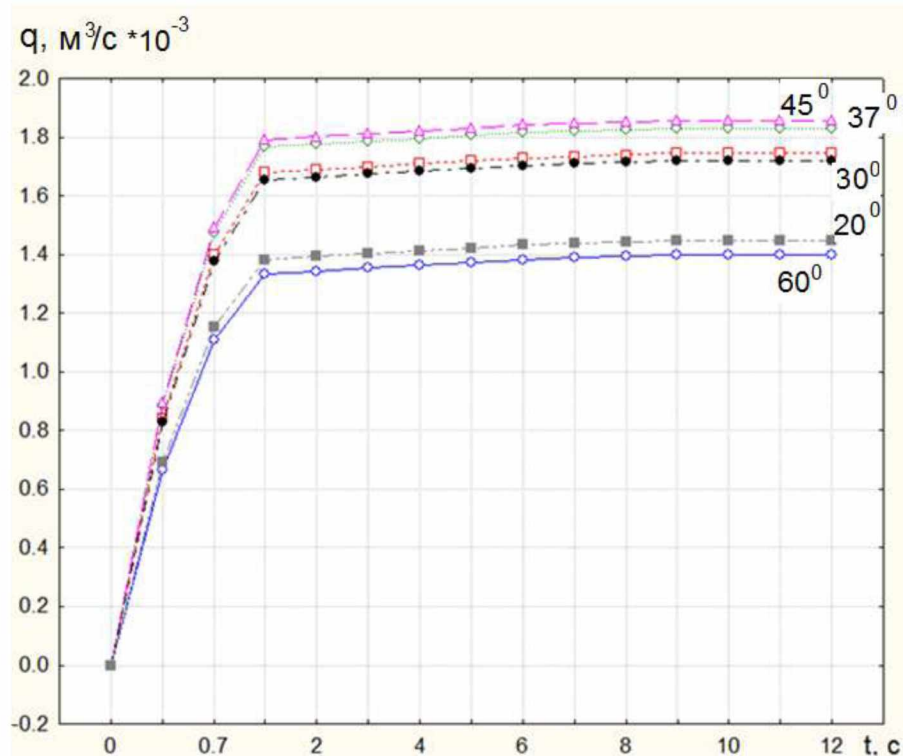


Рисунок 3.3 – Залежність витрати соняшнику від часу витікання при  $V = 0,03 \text{ м}^3$ ,  $S_2 = 0,015 \text{ м}^2$  і різних значеннях кута нахилу днища  $\theta$

Зернівки соняшнику володіють найбільшою шорсткістю, що веде до погіршення процесу його витікання. Якщо розміри частинок схожі з розмірами частинок кукурудзи, тоді витрата буде схожою з витратою кукурудзи ( рис 3.3).

Результати підрахунку питомої роботи зернового матеріалу ( на прикладі пшениці), яка іде на подолання сил зовнішнього і внутрішнього тертя представлені в табл. 3.2.

Встановлено, що із зростанням величини  $h/d$  пульсуюче витікання зернового матеріалу із бункера і воно набуває стійкий характер. Очевидно, що з ростом  $h/d$  формування склепінь стає менш ймовірним, а стійкість їх зменшується. На їх руйнування витрачається менше енергії.

Таблиця 3.2 – Питома робота яка іде на подолання сил внутрішнього і зовнішнього тертя при витіканні пшениці із модельного бункера при  $h_1 = 0,5$  м і  $h = 0,03$  м

Місце подолання сил тертя	Кут нахилу днища $\beta$ , град.					
	20	30	37	45	53	60
Питома робота						
Торцева стінка	1,56	0,97	0,69	0,53	0,42	0,34
Задня стінка	0,41	0,36	0,32	0,28	0,21	0,19
Передня стінка	0,53	0,58	0,76	0,81	0,86	0,90
Днище	0,43	0,48	0,58	0,70	0,76	0,81
Зовнішнє тертя, $A_{\text{ПТ}}^{\text{ЗОВ}}$	2,92	2,38	2,35	2,31	2,24	2,23
Внутрішнє тертя, $A_{\text{ПТ}}^{\text{ВН}}$	0,3	1,01	1,26	1,51	1,71	2,01
Загальне, $A_{\text{ПТ}}$	3,22	3,39	3,61	3,82	3,95	4,24

На рис.3.4 наведена залежність питомої роботи, котра іде на подолання сил зовнішнього тертя при перемішенні пшениці уздовж всіх стінок і днища бункера, від кута нахилу днища.

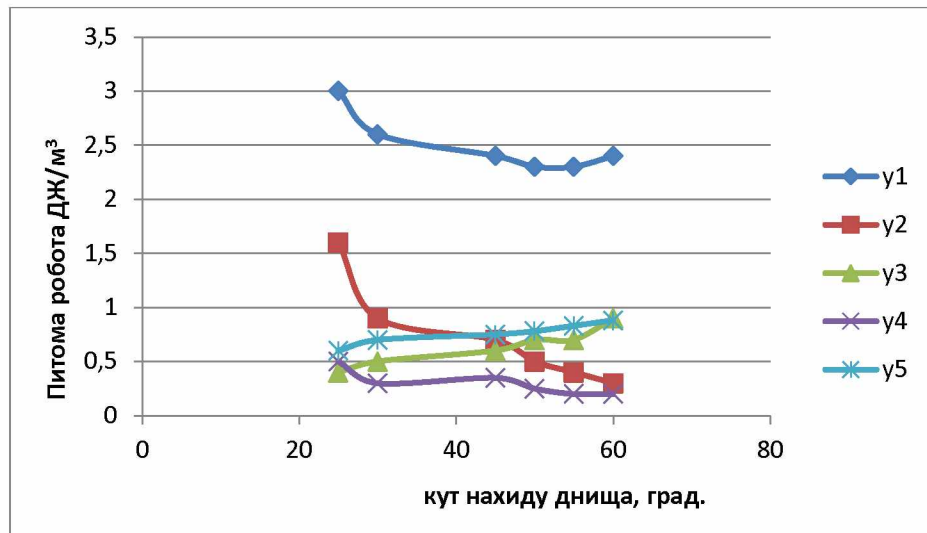


Рисунок 3.4 - Графік залежності питомої роботи  $A_{пт}$ , котра іде на подолання сил зовнішнього тертя зернівок пшениці при переміщенні її уздовж всіх стінок і днища модельного бункера від кута нахилу днища ( $V = const$ ): (У1 – загальна, У2 – торцева, У3 – задня, У4 – днище, У5 – передня)

Із графіка видно, що при збільшенні кута нахилу днища питома робота, яка іде на подолання сил зовнішнього тертя при переміщенні зернового матеріалу уздовж задньої і торцевої стінок бункера, зменшується. Це обумовлено тим, що при збільшенні  $\theta$  нормальний тиск на стінки бункера залишається величиною сталою, а площа цих стінок зменшується. В зв'язку з тим, що об'єм зернового матеріалу був фіксованим, то площа взаємодії зернового матеріалу з передньою стінкою бункера із збільшенням кута нахилу днища  $\theta$  збільшилась, відповідно, росла і питома робота, яка іде на подолання сил тертя.

### 3.3 Вплив площі випускного отвору бункера на процес витікання зернового матеріалу

Крім кута нахилу днища і висоти насипного шару на процес витікання впливає також і площа випускного отвору. Площа випускного отвору може регулюватись двома параметрами, це його висота і ширина. Розглянемо більш детально вплив цих двох параметрів бункера на процес витікання сипкого матеріалу.

1. Розглянемо перший випадок, коли збільшення площі випускного отвору відбувається за рахунок його ширини. Результати досліджень занесені в табл.3.3.

Таблиця 3.3 – Вплив площі випускного отвору на витрату сипкого матеріалу з фіксованої висоти випускного отвору  $h = 0,018\text{м}$ .

Сипкий матеріал	Об'єм зернового вантажу 30 літрів					
	Кут нахилу днища $45^0$					
	Витрата сипкого вантажу, $\text{м}^3/\text{с}$					
	При $S_2 = 60,$ $\text{см}^2$	При $S_2 = 80,$ $\text{см}^2$	При $S_2 = 100,$ $\text{см}^2$	При $S_2 = 130,$ $\text{см}^2$	При $S_2 = 150,$ $\text{см}^2$	При $S_2 = 170,$ $\text{см}^2$
Кукурудза	0,55	0,85	1,15	1,46	1,80	2,13
Соняшник	0,50	0,80	1,10	1,38	1,72	2,05
Пшениця	0,69	0,98	1,27	1,63	1,99	2,34

На основі даних таблиці був побудований графік (рис.3.5) залежності витрати кукурудзи від часу витікання при різних значеннях площі випускного отвору.

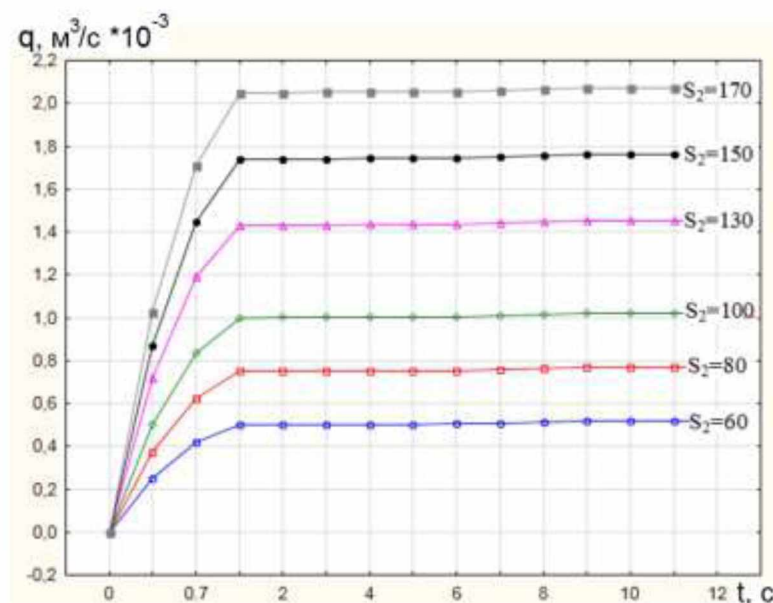


Рисунок 3.5 – Залежність витрати кукурудзи від часу витікання при різних значеннях площі випускного отвору бункера:  $V = 0,03 \text{ м}^3$ ,  $\theta = 45^0$ .

Із графіка видно, що в початковий момент часу ( до 1 секунди ) витрата дуже збільшується. Значення витрати зростає ще деякий час, а потім спостерігається усталений процес витікання сипкого матеріалу. Із збільшенням

площі випускного отвору витрата також збільшується. Це пояснюється тим, що із збільшенням площі випускного отвору зростає і зона обрушення сипкого матеріалу.

Із збільшенням площі випускного отвору значення витрати для всіх досліджуваних сипких матеріалів також збільшується (рис. 3.6).

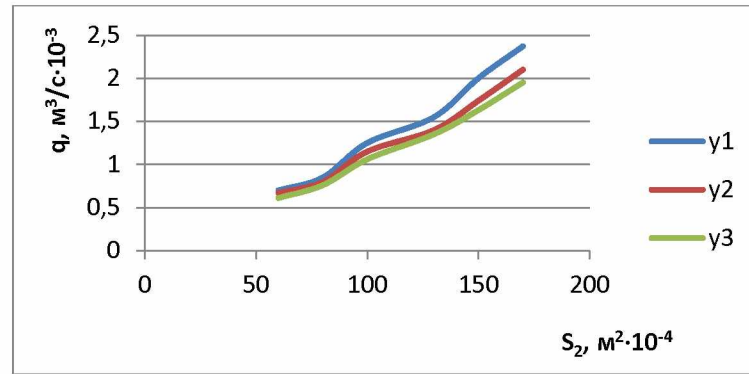


Рисунок 3.6 – Залежність об'ємного вивантаження різних зернових культур від площі випускного отвору при постійній висоті бункера (y1 – пшениця, y2 – кукурудза, y3 – соняшник)

Із графіка видно, що витрата знаходиться в прямо пропорційній залежності від площі випускного отвору (при  $h = \text{const}$ ), а швидкість витікання зернового матеріалу практично не змінюється.

2. Розглянемо другий випадок, коли збільшення площі випускного отвору відбувається за рахунок його висоти.

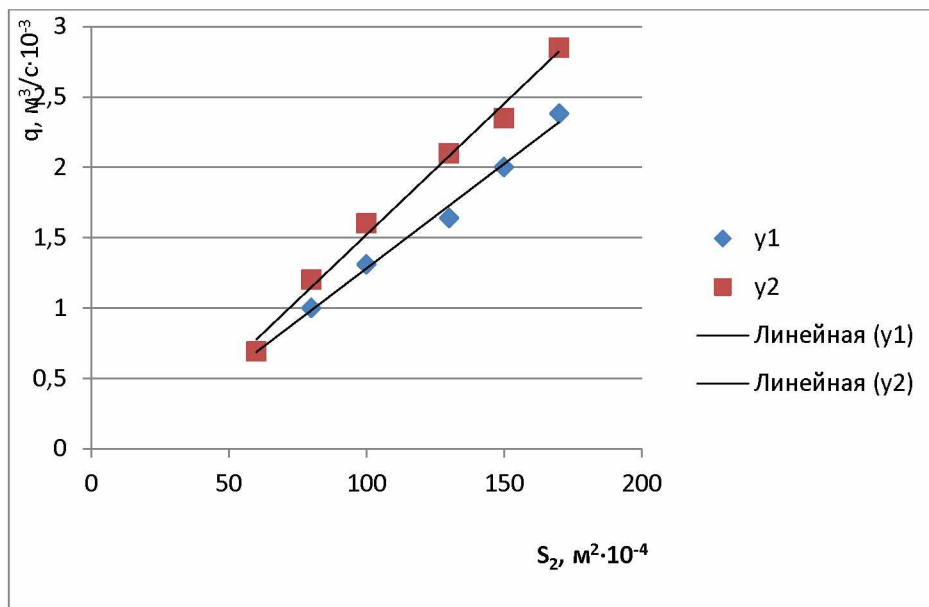
Результати експериментальних досліджень наведені в табл.3.4.

Таблиця 3.4 – Вплив площі випускного отвору на витрату сипкого матеріалу з фіксованою шириною випускного отвору ( $a = 0,325 \text{ м}$ )

Сипкий матеріал	Об'єм зернового вантажу $0,03 \text{ м}^3$					
	Кут нахилу днища $45^\circ$					
	Витрата сипкого вантажу, $\text{м}^3/\text{с}$					
	При $S_2 = 60, \text{см}^2$	При $S_2 = 80, \text{см}^2$	При $S_2 = 100, \text{см}^2$	При $S_2 = 130, \text{см}^2$	При $S_2 = 150, \text{см}^2$	При $S_2 = 170, \text{см}^2$
Кукурудза	0,55	0,95	1,31	1,80	2,19	2,58
Соняшник	0,50	0,91	1,26	1,75	2,13	2,50
Пшениця	0,69	1,48	1,90	2,33	2,70	3,06

Із табл.3.3 і табл. 3.4 видно, що гранично максимальне значення витрати залежить від площі випускного отвору. Проте в залежності від того, яки параметр регулює витрату ( ширина чи висота випускного отвору ), існують різні значення цієї межі. На рис. 3.7 приведені залежності витрати пшениці від площі випускного отвору бункера.

Із графіка 3.7 видно, що із збільшенням площі випускного отвору значення витрати пшениці збільшується. Це обумовлено тим, що питома робота, яка іде на подолання сил внутрішнього і зовнішнього тертя при опустошенні бункера постійна і не залежить від параметрів і режимів роботи бункерного пристрою. Вона залежить тільки від фізико-механічних властивостей сипкого матеріалу. Тому при невеликих висотах випускного отвору ( малих значень  $h/d$ ) ймовірність утворення склепінь максимальна, що приводить до погіршення процесу витікання. В даному випадку енергія, витрачається на руйнування склепінь, і прагне до свого максимально граничному значенню. Тому при малих площах випускного отвору витрата різко іде вгору.



У1 – висота випускного отвору дорівнює *const*; У2 - ширина випускного отвору дорівнює *const*;

Рисунок 3.7 – Залежність витрати пшениці від площі випускного отвору

Виходячи із вищесказаного, можна зробити висновок, що витрата і швидкість витікання сипкого матеріалу не залежить чим і як регулюється площа випускного отвору бункера. Якщо площа регулюється висотою отвору то на процес витікання впливає додатковий зовнішній опір, який чинять бокові стінки бункера. Їх вплив позначається на зниженню витікання в крайніх частинах випускного отвору.

### **3.4 Обґрунтування розмірів бокового випускного отвору бункера**

Під рівномірною витратою зернового матеріалу по всій довжині бункера розуміють, що при опустошенні в кожен момент часу на одиницю довжини випускного отвору припадає рівна кількість сипкого матеріалу. Аналіз процесу витікання сипкого матеріалу із бункера з боковим випускним отвором, а також теоретичні посилення показали, що найбільш важливими для процесу витікання являються наступні фактори:

*Некеровані:*

1) фізико-механічні властивості сипкого матеріалу.

*Керовані:*

- 1) кут нахилу днища бункера  $\theta$ ;
- 2) висота випускного отвору  $h$ ;
- 3) довжина бункера  $l$ ;
- 4) висота насипаного сипкого матеріалу  $h_1$ .

До некерованих факторів були віднесені фактори, які не залежать від зміни конструктивних параметрів бункерного пристрою. В експериментальних дослідженнях величина коефіцієнта зовнішнього тертя  $f$  приймали рівним 0,5, що є прийнятним для досліджуємого зернового вантажу.

Дослідами було встановлено, що оптимальний кут нахилу днища, при якому нерівномірність вивантаження має мінімальне значення, рівний 45 градусам. Збільшення висоти випускного отвору веде до зростання нерівномірності вивантаження зернового матеріалу.

Був проведений аналіз впливу конструктивних параметрів бункерного пристрою на нерівномірність витікання зернового матеріалу із бункера з

прямокутної формою випускного отвору. На основі планування багатофакторного експерименту було отримано рівняння регресія для пшениці.

$$R = 38,364 + 0,283 \cdot h - 0,007 \cdot h^2 - 0,106 \cdot \theta + 0,007 \cdot \theta^2 + 0,00628 \cdot h \cdot \theta \quad (3.1)$$

З формули 3.1 видно, що на нерівномірність вивантаження впливає кут нахилу днища бункера і висота випускного отвору.

Подальшими дослідженнями була розроблена раціональна форма випускного отвору бункера (рис.3.8).

Перевірка впливу конструктивних параметрів бункера на рівномірність вивантаження сипкого матеріалу. Для цього була використана кукурудза. Випускний отвір мав наступні параметри:  $h = 30$  мм;  $h_1 = 450$  мм;  $a = 300$  мм;  $\theta = 45^\circ$ . Була підрахована додаткова площа випускного отвору в його крайніх зонах і вона дорівнює  $0,000281$  м<sup>2</sup>.

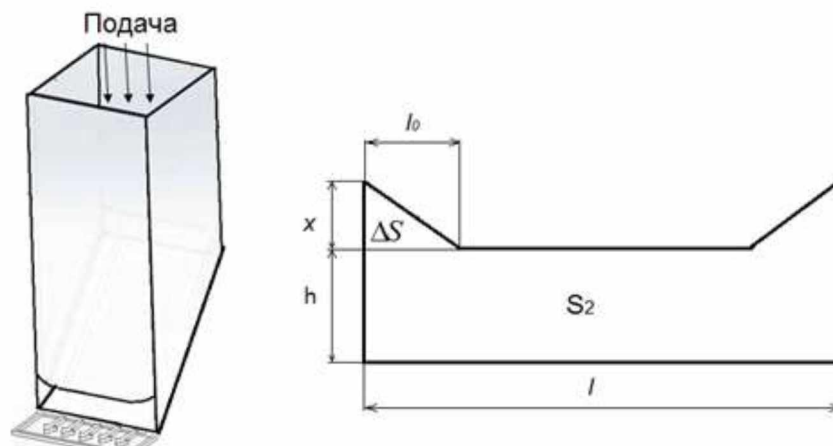


Рисунок 3.8 Раціональна форма випускного отвору бункера

Таким чином, ми отримали катети трикутника з сторонами  $l_0 = 0,041$  м;  $x = 0,0068$  м. Подальші дослідження показали, що раціональними розмірами катета для кукурудзи є  $l_0 = 41$  мм; для соняшнику  $l_0 = 45$  мм; для пшениці  $l_0 = 35$ .

При таких розмірах нерівномірність вивантаження сипкого матеріалу складає 1,62%.

### Висновок

Встановлено, що при збільшенні висоти випускного отвору вплив склепін на процес витікання сипкого матеріалу зменшується по

експоненціальному закону, при цьому швидкість витікання досягає свого максимального значення при куті нахилу днища  $\theta = 45^{\circ}$ .

Об'ємна витрата зернового матеріалу залежить від способу регулювання площі випускного отвору. Якщо площу випускного отвору регулювати її висотою, то витрата зернового матеріалу в середньому на 16% вища випадку, коли вона регулюється її довжиною.

## **4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ РОЗРОБКИ**

### **4.1 Екологічна експертиза розробки**

Охорона навколишнього середовища є важливою народногосподарською задачею країни. Шкідливі речовини які продукуються промисловістю приводять до виснаженості природних ресурсів нашої землі. Викид в атмосферу шкідливих і токсичних речовин дуже погіршує екологічну ситуацію у великих містах та в селищах.[26,27].

Охорона навколишнього середовища на елеваторах в значній ступені залежить від технологічних процесів котрі виконує це підприємство. Промислові елеватори повинні забезпечити екологічний баланс оточуючого середовища. Виконання усіх екологічних правил не потребує від підприємства великих грошових витрат. Але ці витрати виправдовують себе тому, що екологічна безпека будь якого елеваторного підприємства є державною політикою нашої держави. Всі заходи з охорони навколишнього середовища оцінюються за допомогою проведення екологічної експертизи.

Мета екологічної експертизи полягає в тому, щоб запобігти негативного впливу шкідливих речовин на стан довколишнього середовища та на здоров'я людей і тварин. Відомо, що екологічна експертиза, на елеваторному підприємстві оцінює його екологічний стан.

При розвантаженні силосів зерновим матеріалом в середині його завжди буде присутній пил і легкі домішки. Їхня загальна маса становить 0,16% від загальної маси зерна, яке розвантажуються з бокового отвору силосу.

Головною загрозою на сучасних елеваторах є пил. Він виникає при виконанні усіх технологічних операціях. До таких операцій відносяться – приймання, транспортування, очистка, зберігання та вивантаження зернового матеріалу із силосів.

Взяття проб зерна для оцінки його якості на елеваторах використовують автоматичні вакуумні пробовідбірники. Вони відсмоктують 2...3 кг зерна і не дають можливості підніматись вгору зерновому пилю.

Транспортні засоби, котрі привозять зерно на елеватор повинні бути щільно закриті брезентом. Така проста процедура виключає попадання побічних предметів в зерновий вантаж. Крім того викид пилю зводиться до нуля. Не відбувається розсипання зерна при переміщенні транспортного засобу по самій території елеватора.

Елеваторні підприємства мусять мати завальні ями, які розміщуються у спеціальних приміщеннях, котрі оснащені воротами. При заїзді в дане приміщення ворота закриваються, тільки при цьому відбувається розвантаження зерновоза. Даний прийомний пункт повинен бути оснащений аспіраційними обладнаннями. Аспіраційні системи повинні бути по всій технологічній лінії елеватора. Екологічна норма аспіраційних систем повинна бути в межах 10...50 мг на 1 м<sup>3</sup> у точці викиду.

Іншим джерелом забруднення навколишньої атмосфери на елеваторах зерносушарки. Атмосферне повітря засмічується зерносушарками в результаті спалення твердого або рідкого палива. Тліні речовини, що надходять в атмосферу від спалення продуктів горіння, можуть привести до виникнення тяжких респіраторних захворювань у робітників які обслуговують зерносушарки. Продукти горіння можуть визвати у робітників таке професійне захворювання як астма. В зв'язку з цим на елеваторному підприємстві повинен бути спеціальний дозвіл. Він має таку назву «Дозвіл на викид забруднюючих речовин в атмосферу»

Даний санітарний документ повинен мати розрахунки норм викидів забруднюючих речовин. Тобто даний документ є своєрідною «екологічною конституцією» для роботи елеваторного підприємства. По «екологічній конституції» відбуваються перевірки, які проводить державна екологічна служба. На основі перевірок складається звіт. В звіті приводиться моніторинг атмосферного повітря на елеваторному підприємстві.

Всі зерносушарки повинні вранці і у вечері ретельно зачищатись. Робітники елеваторних підприємств повинні мати спец одяг, маски, респіратори, і рукавиці.

Бункери оснащені боковим випускним отвором повинні мати аспіраційне обладнання, яке здатне уловлювати пил та інші дрібні домішки.

#### **4.2 Аварійні і травмонебезпечні ситуації при розвантаженні бункерів, які оснащені боковим випускним отвором.**

Травмонебезпечні та аварійні ситуації при розвантаженні бункерів можуть виникнути внаслідок недотримання правил техніки безпеки. В зв'язку з цим адміністрація елеваторного підприємства повинна встановити небезпечні загрози які можуть виникнути при розвантаженні силосних ємностей.

Всі небезпечні чинники, які впливають на робітників які зайняті на розвантаженні силосів, можна розділити на небезпечні і шкідливі[28]. Розглянемо основні фактори які впливають на робітників.

*Небезпечні фактори* – вплив їх спричинює до погіршення здоров'я робітників. Вони діляться на: фізичні, біологічні, хімічні та психофізіологічні.

*Виробничі небезпеки* – це фактори при яких з'являються передумови пошкодження здоров'я робітників.

*Нещасні випадки* – невеликий проміжок часу в наслідок якого робітник елеваторного виробництва отримав каліцтво або інше ушкодження.

*Небезпечна зона* – простір, де можуть діяти на робітників небезпечні фактори. Наприклад, яким чином встановити привод для відкриття бокової заслінки ємності. Він може бути встановлений паралельно до заслінки або перпендикулярно. Небезпечні зони на елеваторах знаходяться там де є пасові, ланцюгові та інші відкриті передачі, що рухаються і знаходяться на висоті.

*Небезпечна дія* – така дія оператора силосної ємності, яка суперечить науково-обґрунтованим нормам фахової поведінки робітника при відкритті та закритті бокової заслінки. Небезпечна дія виникає внаслідок порушення встановленого на підприємстві розпорядку роботи обладнання, нормативних вимог з охорони праці, норм експлуатації споруд і будівель, тощо.

*Небезпечні обставини* – вони поділяються на обставини, які вказують ті чи інші обставина які можуть виникнути непередбачено. Щоб їх уникнути необхідно користуватись всіма благами автоматизації.

*Небезпечні умови* - це недоліки при виготовленні та встановленні бокового випускного отвору, який використовують при розвантаженні силосів зерном, та недостатньої надійністю виробничого обладнання силосу.

При розвантаженні силосів можуть виникнути і небезпечні ситуації. Небезпечна ситуація – може з'явитися при певному збігу небезпечних умов (НУ) і небезпечних обставин (НО). На елеваторах небезпечна ситуація виникає як правило при одночасному поєднанні кількох небезпечних дій (НД), або при спів паданні декількох НУ.

Працюючі на елеваторних підприємствах робітники, можуть виконувати на робочому місці небезпечні дії. Наприклад, при ремонті механізму закриття і відкриття бокової заслінки. Травми або летальні випадки, можуть виникнути тоді, коли до ремонту обладнання беруться робітники які не мають відповідної кваліфікації. Такі небезпечні обставини створюють небезпечні умови. Вони мають пряме відношення до небезпечних чинників. Наприклад, недосвідчений робітник взявся полагодити непрацюючу бокову заслінку і забув знеструмити обладнання. Дана дія веде до утворення небезпечної обставини, а це в свою чергу приводить робітників до небезпечних ситуацій. Якщо НС трапляється при функціонуванні такої системи як людина – машина, то наслідками можуть бути аварія (А), травма (Т) або подія без будь яких наслідків (П<sub>бн</sub>). В окремих випадках на елеваторних підприємствах можуть з'явитись додаткові НУ і (або) додаткові НД, які можуть викликати катастрофічну ситуацію. Внаслідок чого може бути значне руйнування силосів або значні матеріальні збитки і загибель людей.

На рис. 4.1 показана загальна схема утворення небезпечних ситуацій при розвантаженні силосів зерновим матеріалом.

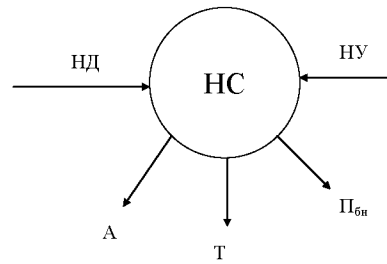


Рисунок 4.1 - Логічна модель функціонування людино - машинної системи

Незалежно від характеру НС, процес їх на елеваторному підприємстві починається із однієї події: небезпечної умови або небезпечної дії. НС – порушення нормальних умов діяльності і життя людей на елеваторному підприємстві. Якщо при розвантаженні силосів зерном синхронно утворюються кілька початкових подій, то одна із них завжди буде пріоритетною. Як правило на елеваторному підприємстві виникають НС техногенного характеру. Дана властивість зародження НС повинна бути покладена в основу розробки концепції підприємства, щодо запобігання можливих наслідків НС. Це в свою чергу дасть можливість своєчасно усунути пріоритетну подію або не допустити її виникнення, що зупиняє розвиток небезпечного явища на елеваторному підприємстві.

#### **4.3 Аналіз виробничих небезпек які виникають при розвантаженні силосів**

Щоб уникнути нещасних випадків на елеваторному підприємстві перед початком його роботи інженер з охорони праці повинен провести інструктаж робітникам які будуть працювати на даному підприємстві. Майстер повинен перевірити машини і механізми котрі будуть задіяні у технологічному процесі завантаження та розвантаження силосів зерновим вантажем. Ремонтувати та проводити інші регламентні роботи з працюючими механізми не можна.

Допускати до роботи осіб у широкому або громіздкому одязі не потрібно. Такий одяг може бути захоплений рухомими ланками механічних передач. До них на елеваторному підприємстві відносяться пасові передачі, ланцюгові передачі, зубчасті колеса та інші рухомі ланки. Внаслідок чого на елеваторних

підприємствах можуть виникнути нещасні випадки. Вони приводять до того, що робітник який працює на цих механізмах може травмуватись.

У процесі розвантаження силосів зерновим матеріалом можуть виникнути різні виробничі небезпеки. До них відносяться механічні, хімічні, теплові, електричні, біологічні [29]. Ці фактори негативно впливають на здоров'я працюючих людей. Організм людини може переносити без наслідків різні небезпеки, але вони не повинні перевищувати допустимого рівня. За межами цих рівнів і тривалості виникає пошкодження організму. Чималу роль у забезпеченні безаварійної роботи та недопущення нещасних випадків на елеваторному підприємстві має бути дотримання працівниками технологічних карт з виконання робіт по розвантаженні силосів зерном, та інструкцій з охорони праці.

Ризики які можуть виникнути при експлуатації силосних споруд:

- падіння працівника підприємства в силосну споруду або в завальну яму,
- неправильне завантаження і вивантаження зерна в силоси, що також може стати причиною падіння ємності,
- потрапляння частини одягу працівників, ніг і рук у рухомі частини механізмів,
- ремонт обладнання не знеструмивши обладнання, або експлуатують його несправним.

Небезпечні умови, які існують чи виникають безпосередньо на елеваторному підприємстві можна поділити на декілька груп [29]:

– характеризують стан або рівень небезпеки виробничого обладнання або певного робочого місця, конструктивні недоліки конкретного вузла чи машини, та інші;

– спонукають працюючого допускати помилок у процесі роботи, низька кваліфікація працюючого та низький рівень знань з охорони праці;

– відсутність з боку керівництва підприємства належного контролю за дотриманням законів з охорони праці;

#### **4.4 Техніка безпеки при експлуатації електроустановок елеваторного підприємства**

Щоб уникнути ураженням електричним струмом необхідно заборонити працювати під напругою при виконанні ремонтних робіт та приєднанні електродвигунів та струмоведучих частинах без відому особи яка відповідає за експлуатацією електроустановок на підприємстві.

Більшість обладнання на елеваторах працює на електричній енергії. Тому існує реальна небезпека ураження електричним струмом робітників які працюють з цим обладнанням. Причини ураження електричним струмом. Працююча особа. може випадково торкнутись до оголених струмоведучих частин. Відкриті струмоведучі частини можуть виникнути в результаті проведення регламентних або необхідних технологічних операцій. Причиною ураження струмом робітника може бути і несправність захисних засобів. Поява напруги на металевих частинах обладнання в результаті пошкодження ізоляції струмоведучих частин теж може привести до ураження людини електричним струмом. Замикання фази електро мережі на землю, падіння дротів на конструктивні частини обладнання, несправність захисного заземлення також може привести до травм або смерті працівника.

Забезпечення безпеки робіт з діючими електроустановками [28,29] при частковому або повному знятті напруги необхідно виконати наступні технічні заходи. По перше необхідно відключити всі електроустановки або деяку їх частини. Після цього можна проводити відповідні заходи по усуненню несправностей. Для цього відключені електроустановки заземлюють, а робоче місце огороджується і вивішуються попереджуючі плакати.

Підвищення електробезпеки виконується шляхом застосуванням систем захисного заземлення, занулення, захисного відключення та інших засобів. При виконанні ремонтних робіт з обладнанням, яке оснащено електродвигунами після зняття напруги необхідно встановити знаки безпеки або попереджувальні плакати та написи.

#### 4.5 Техніко – економічна оцінка вивантажувального пристрою з боковим щілинним отвором

Капітальні затрати на модернізацію силосу з установкою бокового щілинного вивантажувального пристрою складаються із виготовленням і його монтажем. Визначимо необхідні грошові кошти на виготовлення даного пристрою [30].

$$C = C_{op} + C_{nd} + C_{np} + C_{пр.} + C_{зв}, \quad (4.1)$$

де  $C_{op}$  – вартість виготовлення оригінальних деталей, грн.;  $C_{nd}$  – вартість покупних деталей, грн.;  $C_{np}$  – затрати на оплату праці робітникам, грн.;  $C_{пр.}$  – вартість електроприводу, грн.;  $C_{зв}$  – загально виробничі витрати, грн..

Вартість виготовлення оригінальних деталей визначаємо за формулою:

$$C_{op} = C_{зн.пов.} + C_m, \quad (4.2)$$

де  $C_{зн.пов.}$  – заробітна плата робітникам які зайняті на виготовленні оригінальних деталей, грн.;  $C_m$  – вартість металу, який іде на виготовлення оригінальних деталей, грн..

Заробітна плата робітникам які зайняті на виготовленні не стандартних деталей:

$$C_{зн.пов.} = C_{oc} + C_d + C_{соц}, \quad (4.3)$$

де  $C_{oc}$  і  $C_d$  – основна і додаткова заробітна плата працівників зайнятих на виготовленні не стандартних деталей, грн.;  $C_{соц}$  – відрахування на соцзабезпечення, грн..

Основна заробітна плата визначається за формулою:

$$C_{oc} = t_{cp} \cdot C_{год} \cdot K_d, \quad (4.4)$$

де  $t_{cp}$  – середній термін виготовлення оригінальних деталей (приймаємо 20 годин);  $C_{год}$  – погодинна ставка основних робітників, приймаємо  $C_{год} = 60$  грн.;  $K_d$  – коефіцієнт доплати, приймаємо  $K_d = 1,2$  [31].

$$C_{oc} = 20 \cdot 60 \cdot 1,2 = 1440 \text{ грн.}$$

Додаткову заробітну плату визначаємо за формулою:

$$C_d = (5 \dots 12) \cdot C_{oc} / 100, \quad (4.5)$$

Тоді,

$$C_{\partial} = \frac{10 \cdot 1440}{100} = 144 \text{ грн.}$$

Нарахування у фонди соціального страхування, пенсійний і фонд безробіття визначимо із формули:

$$C_{соц} = \kappa \cdot (C_{np} + C_{\partial}) / 100, \quad (4,6)$$

де  $\kappa$  – сумарний коефіцієнт нарахувань на соціальне страхування, пенсійний фонд і фонд безробіття.

$$C_{соц} = 37 \cdot (1440 + 144) / 100 = 586,08 \text{ грн.}$$

$$C_{зп пов.} = 1440 + 144 + 586,08 = 2170,08 \text{ грн.}$$

Вартість металу для виготовлення оригінальних деталей визначається:

$$C_M = C_{M} \cdot Q_M, \quad (4,7)$$

де  $C_{M}$  - ціна одного кілограму металу, приймаємо  $C_{M} = 50$  грн / кг;  $Q_M$  - маса металу, який необхідний для виготовлення завантажувального пристрою, приймаємо  $Q_M = 200$  кг.

$$C_M = 50 \cdot 200 = 10000 \text{ грн.}$$

Отже вартість виготовлення оригінальних деталей складе

$$C_{op} = 586,08 + 10000 = 10586,08 \text{ грн.}$$

Для приводу заслінки щілинного бокового отвору необхідно придбати мотор-редуктор, кріпильні матеріали, підшипники та інше. Загальна вартість цих пристроїв приблизно складе  $C_{np} = 8480$  грн. Для кріплення необхідні болти, гайки, шайби, підшипники, приймаємо  $C_{нд} = 450$  грн.

Повну заробітну плату виробничих робітників, котрі зайняті на монтажі устаткування визначаємо за формулою:

$$C_{зп} = T_{зб} \cdot C_{зод} \cdot K_{\partial}, \quad (4,8)$$

де  $T_{зб}$  – нормативна трудомісткість на монтаж бокового щілинного пристрою для вивантаження зерна із бункера, год;

$$T_{зб} = K_c \cdot \Sigma t_{зб}, \quad (4,9)$$

де  $K_c$  – коефіцієнт, котрий ураховує співвідношення між новим і базовим часом збирання,  $K_c = 1,08$ ;  $\Sigma t_{зб}$  - сумарна трудомісткість збирання завантажувального пристрою, год.

$$\sum t_{зб} = \frac{\sum_{i=0}^n (m_1 \cdot t_1 + \dots + m_n \cdot t_n)}{t_{зб}}, \quad (4.10)$$

де  $m_1 \dots m_n$  – відповідно маси заслінки, напрямних та площадки для установки приводу, кг;  $t_1 \dots t_n$  – час який відводиться на збирання окремих частин завантажувального пристрою, год.

Тоді

$$\sum t_{зб} = \frac{\sum_{i=0}^n (80 \cdot 5 + 15 \cdot 4 + 5 \cdot 1 + 50 \cdot 4)}{14} = 47,5 \text{ год}$$

$$T_{зб} = 1,08 \cdot 47,5 = 51,3 \text{ год.}$$

На збирання пристрою необхідно приблизно вісім днів.

$$C_{зп} = 51,3 \cdot 60 \cdot 1,2 = 3693,6 \text{ грн.}$$

Додаткова заробітна плата :

$$C_{д.зп} = 10 \cdot 3693,6 / 100 = 369,36 \text{ грн.}$$

Нарахування у фонд соціального страхування, у пенсійний фонд і в фонд безробіття визначаються за формулою 4.6:

$$C_{соц} = 37 \cdot (3693,6 + 369,36) / 100 = 1503,30 \text{ грн.}$$

$$C_{зп.зб} = 3693,6 + 369,36 + 1503,30 = 5566,26 \text{ грн.}$$

Загальні виробничі витрати на виготовлення бокового щілинного вивантажувального отвору складуть:

$$C_{зв} = C_{зп} \cdot R_{он} / 100, \quad (4.11)$$

де  $C_{зп}$  – основна заробітна плата робітників які виготовляють і встановлюють вивантажувальний пристрій, грн;  $R_{он}$  – відсоток загальновиробничих витрат ( $R_{он} = 15\%$ ).

$$C_{зп} = C_{зп.нов} + C_{зп.зб}. \quad (4.12)$$

$$C_{зп} = 5566,26 + 2170,08 = 7736,34 \text{ грн.}$$

Тоді

$$C_{зв} = 7736,34 \cdot 15 / 100 = 1160,45 \text{ грн.}$$

Визначимо капітальні вклади які необхідно затратити щоб виготовити і змонтувати боковий розвантажувальний пристрій в силосі..

$$C = 10586,08 + 450 + 8480 + 7736,34 + 1160,45 = 28412,87 \text{ грн.}$$

Очікувана економічна ефективність капітальних вкладень від запровадження бокового розвантажувального пристрою визначається за формулою:

$$E_o = \frac{E_p}{C}, \quad (4.13)$$

де  $E_p$  – очікувана економія від рівномірного та ефективного розвантаження силосу (по літературним даним втрати  $E_p$  можуть складати в межах від 17000 до 18000 грн.)

$$E_o = \frac{17500}{28412,87} = 0,62 \text{ грн.}$$

Термін окупності розробки підраховуємо за такою формулою:

$$T = \frac{C}{E_p}. \quad (4.14)$$

$$T = \frac{28412,87}{17500} = 1,6 \text{ роки.}$$

Основні техніко - економічні показники даної розробки наведено у таблиці 4.1

Таблиця 4.1 – Техніко - економічні показники вивантажувального пристрою з боковим щілинним отвором

Показники	Значення
1. Витрати на виготовлення оригінальних деталей, грн.	10586,08
2. Вартість покупних деталей, грн.	8480
3. Затрати на оплату праці робітникам, грн.	7736,34
4. Капітальні вкладення на виготовлення пристрою, грн..	28412,87
5. Очікувана річна економія , грн.	17500
6. Термін окупності, років.	1,6

Проводячи аналіз виконаних економічних розрахунків по виготовлені і устаткуванні вивантажувального пристрою в силосі, можна зробити такий висновок. Боковий щілинний отвір дасть можливість рівномірно і ефективно вивантажувати зерно із силосу.

## ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

1. Проведений аналіз літературних джерел по питанням розвантаження ємностей в яких зберігається зерновий матеріал з використанням різних пристроїв для розвантаження. Встановлено, що бокові щілинні пристрої які існують мають суттєвий недолік, а саме вони не забезпечують рівномірне і стабільне розвантаження ємності по всій довжині випускного отвору.

2. Виявлені основні сучасні тенденції росту ефективності функціонування ємностей для зберігання зернового матеріалу з використанням бокового щілинного отвору. Установлено, що при збільшенні кута нахилу днища  $\theta$  мінімальна висота випускного отвору бункера збільшується. Наприклад, для пшениці при  $\theta = 25^\circ$ ,  $h_{\min} = 104$  см.

3. Установлено, що сили зовнішнього тертя бокових стінок бункера знижують швидкість витікання і витрату зернового матеріалу у крайніх частинах випускного отвору на 17% відносно до його центральної частини. Основними факторами які впливають на рівномірність вивантаження зернового матеріалу по довжині випускного отвору, являються кут нахилу днища і висота випускного отвору. Причому кут нахилу днища, при якому нерівномірність вивантаження має мінімальне значення рівний 45 градусів.

4. Встановлено, що при збільшенні коефіцієнта зовнішнього тертя з  $f = 0.38$  до  $f = 0.63$  питома робота сил тертя у бокових частинах випускного отвору збільшиться з 1,184 до 1,201, що дозволить приймати значення цього коефіцієнта у вибраних межах.

5. Лабораторними дослідженнями встановлено, що використання бункерів з раціональною формою бокового щілинного випускного отвору у порівнянні з прямокутною формою за наступними показниками:

- нерівномірність вивантаження зменшується з 18,5 до 4 %;
- за рахунок вирівнювання висоти зернового вороху по ширині зменшується кількість склепінь у ємності.

6. На основі проведених досліджень розроблена методика розрахунку бункера з раціональною формою випускного отвору, що забезпечує рівномірне

вивантаження зернового матеріалу по всій довжині. Дана методика дозволяє на стадії проектування отримати геометричні параметри щілинного бокового отвору раціональної форми.

7. Розраховано, що капітальні затрати на модернізацію ємності з установкою бокового щілинного отвору раціональної форми складуть близько 28412,87 грн. Термін окупності пристрою для бокового вивантаження зернового матеріал складе 1,6 роки.